



HAL
open science

Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité

Jean-Christophe Loubier

► **To cite this version:**

Jean-Christophe Loubier. Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité. Géographie. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2004. Français. NNT : . tel-00006990

HAL Id: tel-00006990

<https://theses.hal.science/tel-00006990>

Submitted on 29 Sep 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Thèse

présentée par

Jean-Christophe LOUBIER

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Joseph Fourier - Grenoble 1

Discipline : Géographie

**Perception et simulation des effets
du changement climatique sur
l'économie du ski et la biodiversité
(Savoie et Haute-Savoie)**

Soutenue publiquement le 6 mai 2004 devant le jury composé de :

Maryse GUIGO, directrice de thèse

Pierre DUMOLARD, co-directeur de thèse

Joël CHARRE, examinateur

Martin BENISTON, rapporteur

Petros PETSIMERIS, rapporteur

RESUME

Dans les hautes vallées alpines, on observe des conflits d'intérêts entre l'économie du ski et les objectifs de préservation de la biodiversité dans le cadre du changement climatique global. Les enjeux sont importants et la concertation en matière d'aménagement devient très difficile

Nous avons cherché à développer une méthodologie et un instrument d'aide à la concertation par heuristique visuelle. L'expérimentation de cet instrument est conduite sur le territoire de la Savoie et de la Haute Savoie. Cette thèse se développe en trois temps. Le premier temps définit le contexte général du changement climatique d'un point de vue global. Nous établissons ensuite un changement d'échelle pour nous rapprocher de l'échelon local. Il s'agit d'identifier les mécanismes d'émergence des conflits d'intérêts en fonction des enjeux simultanés économie du ski/préservation de la biodiversité. Le second temps développe une méthodologie pour aider la concertation autour de ce type de conflits par simulation interactive. C'est l'approche par heuristique visuelle. Nous montrons comment, une base de données doit être conçue, pour permettre la mise en œuvre de ce concept. Nous définissons également les types d'outils qui doivent être utilisés ainsi que leurs agencements pour la construction de l'environnement de simulation. Cette partie propose également une stratégie particulière d'amélioration de l'information continue quand il apparaît un besoin d'interpolation sur un faible jeu de données. Enfin, le dernier temps développe l'expérimentation sur notre terrain d'étude.

Mots clés : Systèmes d'Information Géographique ; géostatistique ; interpolation ; modélisation ; concertation ; réalité virtuelle

In the Alpine valleys antagonism frequently occurs between interests of the ski economy and objectives for biodiversity preservation ecologist over land use. This situation is actually being amplified by the climatic changes. The objective of this work is to develop methodology approach and appropriate tools which can assist decision making by means of visual heuristics. Our starting point is the visualisation of probable areas of conflict interests in the confines of Savoie and Haute Savoie. This thesis is composed of three parts. Firstly we define the general context of climatic change from a global point of view; from there we descend to a local level in order to identify the mechanisms which create such conflicts of interest. Secondly we describe the development of a methodology which can help the opposing parties to arrive at a concerted agreement. The specific tools which we created permit visual heuristics by interactive simulation. We demonstrate how a data base should be designed in order to implement our concept, which computer programs should be used and how they should be fitted together in order to construct interactive environmental simulation. A strategy is proposed which is destined to ameliorate the interpretation of spatial data when their spatial distribution is weak. In conclusion we apply the tools we developed to a specific case study in Savoie and Haute Savoie.

Key Word: Geographic Information System; Géostatistic; interpolation; decision making; virtual reality

RESUME

REMERCIEMENTS

INTRODUCTION GENERALE.....	1
1 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.....	6
1.1 CONTEXTE GÉNÉRAL DU CHANGEMENT.....	6
1.1.1 LES GRANDS CYCLES DU CLIMAT: EXPLICATIONS COSMIQUES.....	6
1.1.2 L'EFFET DE SERRE : PARAMÈTRE INTERNE DE LA MACHINERIE CLIMATIQUE.....	7
1.1.2.1 Les gaz à effet de serre de l'atmosphère : faibles quantités et actions fortes.....	8
1.1.3 ELÉVATION DE LA CONCENTRATION DANS L'ATMOSPHÈRE DES PRINCIPAUX GAZ : UNE CORRÉLATION AVEC LES ACTIVITÉS HUMAINES	10
1.1.3.1 Les mesures de concentration temporelle du carbone : mesures directes et carottages ..	10
1.2 HYPOTHÈSES, SURVEILLANCES, SIMULATIONS : LES INSTITUTIONS, LES INSTRUMENTS D'ÉTUDE DU CLIMAT ET LES CONSÉQUENCES ENVISAGÉES.....	12
1.2.1 COMPLEXITÉ DU SUJET D'ÉTUDE : ORGANISATION SUPRANATIONALE.....	12
1.2.1.1 Le Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat (GIEC)	12
1.2.1.2 Méthodes de construction des « rapports d'évaluation ».....	13
1.2.2 ESTIMATION DU CHANGEMENT CLIMATIQUE: TROIS APPROCHES.....	14
1.2.2.1 Approche par la mesure instrumentale	14
1.2.2.2 Méthode des analogues climatiques.....	14
1.2.2.3 Modélisation du climat et usage des Modèles Généraux de Climat (GCMs).....	14
1.2.3 PROJECTION POUR L'ÉVOLUTION FUTURE DU CLIMAT TERRESTRE: LES SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS	18
1.2.3.1 La famille de scénario A1.....	18
1.2.3.2 La famille de scénario A2.....	19
1.2.3.3 La famille de scénario B1	19
1.2.3.4 La famille de scénario B2	19
1.2.4 LES CONSÉQUENCES POSSIBLES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ÉQUILIBRES ANTHROPIQUES UN ENJEU ÉCOLOGIQUE MAIS AUSSI MORAL.....	20
1.2.4.1 Un enjeu global sur les équilibres planétaires	21
1.3 LE CLIMAT SPATIALISÉ : DE LA COMPLEXITÉ GLOBALE AUX EFFETS LOCALISÉS.....	22
1.3.1 LE CLIMAT À L'INTERFACE DES SYSTÈMES NATURELS ET ANTHROPIQUES.....	22
1.3.2 LES EFFETS DU CHANGEMENT: ENTRE ACTIONS DIRECTES ET EFFETS SECONDAIRES, LE CAS DE LA VARIABILITÉ ET DE LA TENDANCE.....	23
1.3.2.1 Le cas de la variabilité	23
1.3.2.2 Le cas de la tendance.....	24
1.3.2.3 Le CO2 perçu comme un bonifiant du potentiel végétatif.....	28
1.4 L'ÉCONOMIE DU TOURISME EN MONTAGNE: MOTEUR DU DÉVELOPPEMENT.....	31
1.4.1 LE TOURISME EN MONTAGNE.....	32
1.4.2 RETOMBÉES ÉCONOMIQUES GLOBALES DU TOURISME EN MONTAGNE.....	33
1.4.3 L'EMPLOI LIÉ AUX ACTIVITÉS TOURISTIQUES EN MONTAGNE.....	34
1.4.3.1 Profils professionnels du tourisme en montagne.....	35

1.5 LE SKI ALPIN EN FRANCE : PRÉSENTATION DU PARC	36
1.5.1 LE PARC DE REMONTÉES MÉCANIQUES.....	37
1.5.1.1 Des installations anciennes en voie de modernisation	38
1.5.2 LA NEIGE DE CULTURE.....	40
1.5.2.1 La répartition des installations : une progression régulière à l'échelon national	41
1.5.2.2 Le fonctionnement et le coût des installations de neige de culture	41
1.5.3 LE CHIFFRE D'AFFAIRES DES DOMAINES SKIABLES	43
1.6 ENTRETIEN DES DOMAINES : LE TRAVAIL DES PISTES.....	46
1.6.1 LES INTERVENTIONS SUR LE MILIEU : UN IMPACT IMPORTANT	47
1.6.1.1 Les contraintes du milieu naturel	48
1.6.1.2 Les contraintes techniques	48
1.6.2 LES TRAVAUX EFFECTUÉS SUR LES PISTES EN VUE D'UN REVERDISSEMENT.....	48
1.6.3 LES RÉSULTATS SUR LE TERRAIN.....	50
2 LE MILIEU NATUREL : QUEL INTÉRÊT POUR LES HOMMES ?	52
2.1 STRUCTURE, DYNAMIQUE ET TYPOLOGIE DU MILIEU NATUREL.....	52
2.1.1 APPROCHE ÉCOSYSTÉMIQUE DE L'ÉTUDE DES MILIEUX NATURELS.....	53
2.1.2 FONCTIONNEMENT ET DYNAMIQUE DES ÉCOSYSTÈMES.....	53
2.1.3 TYPOLOGIE DES FORMATIONS VÉGÉTALES.....	54
2.1.3.1 Les facteurs écologiques	55
2.1.4 LES ÉCOSYSTÈMES DE MONTAGNE: ORGANISATION SPATIALE ET STRUCTURE	58
2.2 LA QUESTION DE LA BIODIVERSITÉ.....	60
2.2.1 POURQUOI PROTÉGER LA BIODIVERSITÉ?.....	60
2.2.2 LE CONCEPT DE BIODIVERSITÉ SUR LE PLAN BIOLOGIQUE.....	62
2.2.2.1 Des ambiguïtés techniques et conceptuelles	62
2.2.3 PROTÉGER OU CONSERVER: UNE POSITION IDÉOLOGIQUE, DES CONSÉQUENCES DE TERRAINS	64
2.2.3.1 La protection : une approche utilitaire	64
2.2.3.2 La conservation : une approche romantique	65
2.2.3.3 Finalités différentes et existence par opposition.....	65
2.3 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE MILIEU NATUREL EN MONTAGNE.....	66
2.3.1 LES IMPACTS SUR LE MILIEU PHYSIQUE.....	67
2.3.1.1 Les impacts sur la cryosphère	67
2.3.1.2 Les impacts sur le régime hydrologique	67
2.3.1.3 Les impacts sur les processus géomorphologiques	68
2.3.2 LES IMPACTS SUR LE VIVANT.....	68
2.3.2.1 La migration des écosystèmes	69
2.4 RÉFLEXIONS ET HYPOTHÈSES AUTOUR DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	69
2.4.1 QUEL IMPACT EN CAS DE CHANGEMENT?.....	69
2.4.2 RÉÉQUILIBRAGE ÉCONOMIE/ ENVIRONNEMENT SUR UN ESPACE RÉDUIT	70

3 VOIR, DÉCIDER, AMÉNAGER : COMPLEXITÉ DU TERRITOIRE VÉCU ET AMÉNAGÉ	75
3.1 TRADUIRE UN POINT DE VUE EN PHÉNOMÈNE SPATIAL: LE PROBLÈME DE LA CONSCIENCE DU FAIT SPATIAL.....	77
3.2 ASPECT COGNITIF DU CANAL VISUEL: VERS DES SYSTÈMES GÉNÉRATEURS DE FAITS DE CONSCIENCE.....	78
3.2.1 LA PERCEPTION VISUELLE DU FAIT SPATIAL.....	78
3.2.1.1 Les variables visuelles	79
3.2.2 LA CONSCIENCE DU FAIT SPATIAL.....	81
3.2.2.1 L'espace construit par le sens : le sens construit par la conscience	82
3.3 LES OUTILS INFORMATIQUES POUR L'AIDE À LA DÉCISION	86
3.3.1 MODÉLISER LES DÉCISIONS POUR PERMETTRE DES AMÉNAGEMENTS CONCERTÉS.....	86
3.3.2 LA MODÉLISATION DES DONNÉES SPATIALES DANS UNE BASE DE DONNÉES.....	89
3.3.2.1 Le niveau géométrique des SIG : l'information spatiale par nature	89
3.3.2.2 L'information spatiale par destination : particularité des SIG vecteurs.....	91
3.3.3 UNE APPROCHE OBJET DE LA DONNÉE POUR UNE NOUVELLE CONSTRUCTION DE LA DÉCISION.....	93
3.3.3.1 Définition des concepts : l'objet ; la classe, l'héritage et la position des attributs	93
3.3.4 LA GÉOMATIQUE INTERACTIVE: LES NOUVEAUX MOYENS D'AIDER LA CONCERTATION	97
3.3.4.1 Animer la convergence par la cinématique SIG : Réalité virtuelle, cartographie dynamique et interactivité	98
3.3.4.2 Présentation de la troisième dimension dans les SIG : une technologie en devenir	102
4 SIMUL-IMAGE : UN OUTIL CONÇU POUR LA SIMULATION INTERACTIVE DE PHÉNOMÈNES SPATIAUX.....	105
4.1 STRUCTURE ET ORGANISATION DE SIMUL-IMAGE.....	106
4.1.1 LA TOPOLOGIE ET LA RÉALITÉ VIRTUELLE POUR LA RECONSTRUCTION AUTOMATIQUE DE MODÈLES NUMÉRIQUES DE PAYSAGES.....	109
4.1.1.1 Méthode d'interaction entre analyse spatiale et reconstitution du paysage	110
4.2 TRADUIRE LE TERRAIN D'ÉTUDE EN MODÈLES SPATIAUX:	112
4.2.1 ORGANISATION DE LA BASE DE DONNÉES OBJETS.....	113
4.2.2 LES BIBLIOTHÈQUES DE PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES.....	116
4.2.3 LE PROBLÈME DE L'INFORMATION CONTINUE : INTERPOLATION GÉOMÉTRIQUE ET/OU PROBABILISTE.....	118
4.2.3.1 Les méthodes géométriques : une relation forte à la distance inter-stations	119
4.2.3.2 La voie de la Géostatistique : une alternative séduisante.....	121
4.2.4 INTERPOLER UN PHÉNOMÈNE CLIMATIQUE PAR LA DÉMARCHE GÉOSTATISTIQUE.....	122
4.2.4.1 Les écueils relatifs à une démarche opérationnelle au sein de SIMUL-IMAGE	123
4.2.4.2 Choix des méthodes d'interpolations	123
4.2.4.3 Qualité de l'interpolation : la victoire des méthodes modernes	125
4.2.5 INTERPOLER DES PHÉNOMÈNES SPATIAUX COMPLEXES: LA VOIE DU KRIGEAGE.....	126
4.2.5.1 La variographie : présentation des concepts.....	126
4.2.5.2 Krigeage : une méthode optimale d'interpolation spatiale	127
4.2.5.3 Variogrammes erratiques: les limites fonctionnelles du krigeage.....	128
4.2.6 LES FONCTIONS BASE RADIALE : UN EXEMPLE À TRAVERS LES SPLINES DE TYPE PLAQUE MINCE.....	138
4.2.6.1 Définition physique des fonctions splines.....	139
4.2.6.2 Exemple d'interpolation par fonction Base radiale de type plaque mince	141

4.3 DES DONNÉES VERS LA CARTE: UNE AUTRE APPROCHE POUR INTERPOLER DES PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES	142
4.3.1 CONSTRUCTION DES MODÈLES DE RÉGRESSION LINÉAIRE.....	143
4.3.1.1 Développement de la démarche	143
4.3.1.2 Analyse en composante principale.....	144
4.4 UNE APPROCHE D'ENRICHISSEMENT D'INFORMATIONS : CRÉER DES STATIONS VIRTUELLES POUR OPTIMISER L'INTERPOLATION	159
4.4.1 INTÉRÊT DU RAJOUT DE STATIONS VIRTUELLES DANS UN CONTEXTE D'INTERPOLATION ; UN MOYEN DE RÉDUCTION DE L'ERREUR D'ESTIMATION	159
4.4.1.1 Elaboration d'une méthode spécifique aux températures	160
4.4.1.2 Détermination et choix judicieux de P	163
4.4.1.3 Calcul des distances des points connus au point P	166
4.4.1.4 Calcul des pondérateurs altitudes.....	166
4.4.1.5 Calcul des pondérateurs orientation.....	167
4.4.1.6 Calcul des pondérateurs distances	167
4.4.1.7 Détermination des W_i	168
5 EXEMPLE DE MISE EN ŒUVRE : LA SAVOIE ET LA HAUTE SAVOIE	171
5.1 LE TOURISME HIVERNAL DE LA SAVOIE ET DE LA HAUTE SAVOIE	172
5.1.1 UN POIDS ÉCONOMIQUE TRÈS IMPORTANT.....	172
5.1.1.1 Une offre maximale... ..	174
5.1.1.2 Fortement mise en valeur	174
5.1.2 PROFIL DU TISSU SOCIAL.....	176
5.1.2.1 Populations des deux départements	176
5.1.3 LE MILIEU « NATUREL » EN SAVOIE ET HAUTE SAVOIE.....	178
5.1.3.1 Analyse de la répartition spatiale de l'occupation du sol	181
5.1.4 DÉFINITION DU CONTEXTE DE SIMULATION.....	183
5.2 LA CONSTRUCTION DE LA BASE DE DONNÉES	183
5.2.1 LES DONNÉES DE LA BASE ER30 : HISTORIQUE ET PRÉSENTATION.....	184
5.2.2 INTERPOLATIONS OPÉRATIONNELLES: UNE BIBLIOTHÈQUE DE CARTES DE TEMPÉRATURES ET DE PRÉCIPITATIONS	186
5.2.2.1 Les cartes de précipitations : analyse du phénomène	186
5.2.2.2 Les cartes de températures : amélioration du semis.....	189
5.2.2.3 Identification des espaces favorables à l'ajout de stations virtuelles	193
5.2.2.4 Mise en œuvre et construction des facteurs flous	197
5.2.3 INTERPOLATION SUR LA BASE DU SEMIS AMÉLIORÉ: EXEMPLE DU MOIS DE JANVIER TYPE.....	201
5.2.3.1 Interpolation : krigeage déconseillé.....	201
5.2.3.2 Etude du déploiement du phénomène des températures	203

6 ANALYSE SPATIALE : DÉTERMINATION DES ESPACES DE CONFLIT ÉCONOMIE/ ENVIRONNEMENT	206
6.1 MÉTHODE D'ANALYSE SPATIALE POUR L'ÉVOLUTION DE L'ISOTHERME ZÉRO MENSUEL	207
6.1.1 RÉSULTATS CARTOGRAPHIQUES : DES SITUATIONS À 15 ANS	208
6.1.2 ÉTUDE COMPARÉE DES DOMAINES SKIABLES DANS UN SCÉNARIO À 15 ANS	209
6.1.2.1 Organisation des domaines skiabiles en situation thermique habituelle	210
6.1.2.2 Simulation et tendance dans le cadre duscénario A1b	214
6.2 OCCUPATION DU SOL : SIMULATION POUR LES MICROS ÉCOSYSTÈMES	218
6.2.1 MISE EN ÉVIDENCE DES ZONES À RISQUE ÉLEVÉ POUR LES PELOUSES ET PRAIRIES SUBALPINES EN FONCTION DU FACTEUR TEMPÉRATURE	220
6.2.2 MISE EN ÉVIDENCE DES ZONES À RISQUE ÉLEVÉ POUR LA PELOUSE ET PRAIRIE SUBALPINE EN FONCTION DU FACTEUR PRÉCIPITATION	222
6.2.3 MISE EN ÉVIDENCE DES ZONES À RISQUES CONJUGUÉS: TEMPÉRATURES ET PRÉCIPITATIONS	224
6.3 MISE EN ŒUVRE DE L'HEURISTIQUE ENVIRONNEMENTALE EN RÉALITÉ VIRTUELLE	226
6.3.1 MISE EN ÉVIDENCE DES ESPACES DANS L'ENVIRONNEMENT DE RÉALITÉ VIRTUELLE	228
CONCLUSION GENERALE	236
BIBLIOGRAPHIE	241
ANNEXES	

Remerciements

Les raisons qui poussent à entreprendre un travail comme celui-ci sont parfois assez disparates. Dans mon cas, il en existe autant de scientifiques que de personnelles qui se promènent entre le Diois et Grenoble. Je tiens à remercier ici les personnes qui m'ont soutenu et participé à ce travail. Merci donc à :

- Madame Guigo : Directrice de ce travail. Tout au long des cinq ans que j'ai passé avec elle (DEA et Thèse), elle s'est battue contre mon côté frénétique, et n'a eu de cesse de me montrer qu'il faut parfois brider ses idées pour avancer ;
- Monsieur Domolard : co-directeur de thèse et Directeur du laboratoire SEIGAD. Durant ces trois ans passés au sein du laboratoire, j'ai pu apprécier les échanges variés et fréquents que nous avons, ses remarques judicieuses, et la rigueur de sa correction ;
- Monsieur Beniston pour la chaleur de son accueil lors de notre rencontre à Fribourg, ses encouragements, et d'avoir accepté d'être rapporteur de ce travail ;
- Monsieur Petsimeris pour avoir accepté également d'être rapporteur de cette thèse ;
- Monsieur Charre pour sa participation au jury de cette thèse.

Je remercie également la société ORODIA et le groupe DIANEIGE pour leur accueil dans le cadre de cette thèse financée par convention CIFRE. Je crois sincèrement, après cette expérience, que ce mode de financement permet un enrichissement mutuel et profitable pour l'entreprise et le doctorant.

Merci aussi à mes amis doctorant (Laure, Noujoud, Nicolas, Jeremy, Remi, Olivier, et Hayan) du laboratoire qui m'ont laissé boire les 4000 litres de café (sur trois ans) nécessaires à mon métabolisme et avec lesquels j'ai partagé bien plus que la discipline qui nous relie.

Je n'oublie pas mes frères (Ludovic et Laurent) car leur clairvoyance et parfois (souvent) leur soutien pratique m'ont sorti de situations délicates.

Dans le désordre, merci également à Sophie et Sébastien, Hervé, Robert, Sam et Pierre pour leur participation amicale. Mille excuses à ceux qui ne sont pas cités.

Enfin, je pense à mon père qui m'a montré que la connaissance rend libre .

C'est bien plus que des remerciements que je dois à ma femme, Valérie et à ma fille Oriane car ce travail ne les concernait pas. Elles m'ont cependant laissé vivre cette aventure jusqu'au bout dans les conditions les plus enviables pour moi. Les mots restent des mots, j'espère que mes actes au quotidien leur montreront tout l'amour que j'ai pour elles comme elles le font pour moi.

Introduction générale

Dans le courant des années 80, les sept pays les plus riches de la planète décidèrent de créer le Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat. Cette organisation placée sous l'égide de l'ONU a été chargée de répondre à trois questions : Le climat de la terre est-il en train de se modifier ? Dans le cas d'une mise en évidence d'un changement climatique global, l'Homme, ou plutôt, ses activités économiques sont-elles responsables de ce changement ? Enfin, ce changement est-il préjudiciable à l'espèce humaine ? En 2004, la mission du GIEC se poursuit toujours.

L'influence des activités humaines sur le climat était une chose démontrée depuis déjà fort longtemps au moment de la création du GIEC. Au 19^{ème} siècle, le savant suédois Arrhénius avait mis en évidence une augmentation du gaz carbonique présent dans l'atmosphère. Ce phénomène était dû à l'industrialisation massive, en cours dans le monde occidental de l'époque. Il en avait déduit que cette augmentation du CO² de l'atmosphère, allait améliorer le mécanisme d'effet de serre, et, par répercussion, augmenter naturellement la température globale de la planète. Arrhénius considérait cela comme un bienfait pour l'espèce humaine car, il voyait là un moyen efficace pour se prémunir des glaciations, phénomènes climatiques récemment découverts et dont le caractère cyclique ne lui avait pas échappé. Il croyait que la planète se situait aux prémices d'un épisode glaciaire nouveau.

Aujourd'hui, certains événements majeurs liés au climat global montrent que ce point de vue

doit être, au minimum, largement nuancé, sinon réfuté.

Sur le plan global, l'élévation potentielle du niveau des océans pourrait faire disparaître ou rendre infertiles, des espaces très fortement peuplés. Or, plus de 50% de la population mondiale se concentre sur une frange côtière de 50 kilomètres de large. A plus grande échelle, la répétition de phénomènes climatiques catastrophiques et de grande ampleur, comme les cyclones, les inondations, les sécheresses posent de graves problèmes au niveau régional. C'est le cas par exemple du phénomène El Nino¹, qui est passé d'une périodicité de 10 à 15 ans environ dans la première moitié du XX^{ème} siècle, à 5 ans dans la seconde moitié. Ses effets sont souvent dramatiques pour les populations qui vivent dans les zones concernées. A plus grande échelle encore, les températures caniculaires enregistrées par l'Europe durant l'été 2003, avec les conséquences que l'on connaît pour la France, mettent en évidence le danger que fait courir aux populations, une élévation subite et importante des températures.

Tous ces phénomènes tendent à montrer que l'idée d'Arrhénius, concernant les bienfaits d'un réchauffement climatique global, est fautive.

Cependant, on peut s'interroger sur l'idée que les observations faites actuellement ne soient que le fruit de la variabilité naturelle du climat. A ce moment, l'idée d'Arrhénius devrait se

¹ Il s'agit d'un phénomène d'inversion des masses d'eaux chaudes et froides qui s'exerce dans le pacifique qui introduit des conséquences sur la pêche (disparition des poissons) le long des côtes du Pérou et du Chili et sur le climat andin avec des

révéler juste, sur le long terme, avec des nuances à formuler, essentiellement sur le plan de la spatialisation des effets du changement.

Actuellement, les synthèses du GIEC et les mesures météorologiques massives, apportent des éléments de preuves pour permettre une réponse affirmative à deux des trois questions posées par les pays du G7. Oui, le climat est en train de se modifier très rapidement dans le sens d'un réchauffement global². Oui, les activités humaines, particulièrement les moyens de production d'énergie à partir de combustibles fossiles, sont la cause de cette modification [GIEC 2001].

La réponse à la troisième question fait, en revanche, l'objet d'une intense controverse. Celle-ci se développe sur deux axes principalement : les impacts sur la vie en général et les hommes en particulier ; la vitesse à laquelle ces impacts pourraient survenir. Toutefois, l'effet favorable prédit par Arrhénius, est très probablement inexact. Les perspectives et simulations développées par la communauté scientifique tendent vers des résultats inquiétants pour l'espèce humaine et son mode de vie actuel. Mais la mesure et la portée exacte des impacts à venir reste imprécise.

La question des impacts

La question de l'évaluation des impacts est complexe. Le facteur d'échelle, temporel et

spatial, joue ici un rôle considérable. Sur le plan global et au niveau de la biosphère toute entière, il semble que la vitesse actuelle d'extinction des espèces soit supérieure à celle calculée pour les deux grandes périodes d'extinctions qu'a connue la Terre (Permien et Crétacé). Compte tenu de l'extrême lenteur de retour à une biodiversité élevée après ces deux périodes (30 millions d'années) et de la durée de vie moyenne d'une espèce en particulier (environ 10 millions d'années), les extinctions enregistrées actuellement seraient irréversibles à l'échelle de notre espèce.

Dans un autre registre, ces impacts s'exercent sur des processus physiques, écologique et aussi socio-économiques. Pour pouvoir en comprendre tous les enjeux, il convient de les spatialiser. Plusieurs problèmes apparaissent ici. Tout d'abord, les instruments de modélisation et d'exploration du climat global restent assez réduits sur le plan de la discrétisation. Les modèles généraux actuels de modélisation du climat, ne proposent dans les cas les plus précis, que des mailles de 200 kilomètres de côté, insuffisantes pour permettre à des décideurs de prendre la mesure des enjeux du changement climatique sur leur territoire. De surcroît, ce territoire n'est pas isomorphe et les incidences de l'évolution du climat ne seront pas identiques selon que l'on cherche à les évaluer en plaine, en montagne, en milieu rural ou en zone urbaine. Enfin, sur un plan purement social, ces impacts ne peuvent être uniformes. Dans certains secteurs, les enjeux sont considérables comme dans l'agriculture ou l'industrie du tourisme, particulièrement celle des sports d'hiver. Dans d'autre, ils n'exercent aucune influence. C'est le cas par exemple des commerçants, des enseignants, et d'un façon générale, tous ceux dont les métiers ne sont pas liés directement au climat.

sécheresses ou des inondations très importantes selon les zones.

² En France, les années 90 ont été les plus chaudes depuis que des mesures sont effectuées.

Pour finir sur ce point, ces enjeux se perçoivent plus ou moins fortement en fonction de la vitesse avec laquelle ils se mettent en place. Concrètement, un enjeu global concernant l'espèce humaine dans son entier comme celui de la préservation de la biodiversité sera perçu avec moins de force par les hommes que l'éventuelle restriction d'usage de véhicules à énergie fossile. Les raisons de cette différence de perception sont doubles et triviales. La biodiversité n'exerce pas d'influence sur notre vie quotidienne. Dix millions d'années ou trente millions d'années représentent des périodes tellement longues à l'échelle d'une vie humaine qu'elles paraissent sans importance. A l'inverse, nous utilisons notre voiture chaque jour. Renoncer à son usage représente une modification profonde de notre mode de vie. Quel individu, décideur ou politique, prendrait le risque de créer une telle perturbation dans le quotidien individuel ou commun, sur les seules conclusions des travaux du GIEC.³

Ce dernier l'a bien compris et oriente désormais une partie de ses synthèses autour des travaux de spatialisation locale des effets du changement climatique, et, sur les moyens mis en œuvre pour aider à mieux percevoir les enjeux à des échelles de temps plus proches des consciences quotidiennes.

Objectifs de ce travail

Nous poursuivons deux objectifs dans cette thèse. Le premier concerne le développement d'une stratégie de changement d'échelle pour spatialiser localement, sur la Savoie et la Haute Savoie, les résultats de l'évolution des précipitations et des températures données par un modèle général de circulation climatique. Le second objectif consiste en une tentative de développement d'une méthodologie couplée avec un instrument informatique pour aider à comprendre les enjeux locaux du changement climatique par la simulation. Cet instrument est également un outil d'aide à la concertation face aux aménagements proposés dans un contexte de conflit d'intérêts.

Ce travail ne peut se faire que dans un environnement socio économique bien cerné. En effet, si la méthode générale se veut transposable dans tous les registres où le changement climatique s'exerce, pour peu que le problème à traiter soit spatial, sa mise en œuvre ne peut intervenir que dans un cas précis, limité dans l'espace physique mais aussi socio économique. Sans cette limite, l'explosion combinatoire rendrait notre instrument inopérant.

Les terrains où se télescopent des enjeux physiques et socio économiques sont légions en géographie. L'étude de l'espace en soi ne représente qu'une partie du champ disciplinaire de la géographie. Mais cette dernière prend, à notre sens, toute sa force quand elle considère simultanément le milieu physique et les hommes qui l'habitent. Ce positionnement n'est pas nouveau. Au XIX^{ème} siècle, trente ans avant Paul Vidal de la Blache, il constituait le point de départ de la

³ Le GIEC a depuis le début de son action de synthèse, produit des « résumés pour décideurs » destinés à expliquer les points principaux de l'état de l'art scientifique en matière d'étude du climat

« Nouvelle Géographie Universelle » d'Elisée Reclus.

Le contexte du changement climatique et les enjeux qu'il génère se situent exactement dans cette interface homme/milieu. Nous avons, tout au long de ce travail, cherché à cerner cet entrelacement. Il s'agit pour nous de traduire les continuités spatio-temporelles, physiques et humaines, mais aussi leurs dynamiques et leur interrelations, afin de les intégrer dans notre raisonnement.

En effet, pour proposer un instrument de simulation capable d'aider la concertation, nous devons établir un pont entre la perception que les acteurs du territoire étudié, ont du phénomène « changement climatique », en fonction de leurs propres enjeux et avec la donnée présente dans le système qui permet la concertation.

Cela nous oblige également à mesurer les effets du traitement de cette donnée en fonction du phénomène qu'elle est censée représenter. Par exemple, dans le contexte du changement climatique appliqué à un niveau local, il s'agit de mesurer les écarts entre le réel, les températures ou les précipitations, avec les modèles que nous mettons en œuvre quand nous interpolons ce phénomène pour construire une carte. La mesure de cette erreur est alors introduite dans le système pour les acteurs et non pas pour la validation de la démarche d'interpolation.

Ces considérations nous amènent à réfléchir sur le sens donné aux choses (les objets du réel) par rapport à leur perception en fonction de l'enjeu et des individus qui les manipulent, plutôt que par leur réalité sensible. C'est à dire, introduire et prendre en compte le caractère relatif de la donnée dans un raisonnement que nous voulons scientifique. La finalité de cela étant de construire une base

de données, utilisable en pratique, dans un Système d'Information Géographique, structurée pour la prise en compte simultanée de points de vue univoques (les enjeux des acteurs du territoire) mais multiples (il existe plusieurs acteurs du territoire aux points de vue différents). C'est ce que nous avons appelé : l'approche heuristique pour l'aide à la concertation. Nous la mettons en œuvre sur notre terrain d'étude, les domaines skiables de Savoie et Haute Savoie.

Le choix du terrain et des objets d'étude

Ce travail consiste à proposer un moyen de comprendre les effets locaux (à échelle moyenne) du changement climatique sur les domaines skiables et le milieu naturel de Savoie et Haute Savoie. Les conflits d'intérêts entre économie et environnement sont particulièrement exacerbés en ce qui concerne les domaines skiables. L'artificialisation du site, nécessaire au bon fonctionnement de l'outil économique, est un enjeu majeur du point de vue de la protection de la biodiversité. Quant aux enjeux économiques, il est aisé de supposer que certains domaines skiables risquent de se trouver dans une situation économique délicate en cas de réduction de la période de couverture nivale. Les conséquences socio-économiques locales, en cas de disparition de ces domaines, risquent donc d'être importantes dans certaines hautes vallées où, l'activité du ski représente actuellement le seul moteur de développement économique et de maintien d'une empreinte humaine.

Nous voyons que les domaines skiables concentrent sur leur espace deux enjeux

majeurs, identifiés et traités par le GIEC⁴, dans une hypothèse de changement climatique.

Ils présentent également l'avantage d'être bien déterminés dans l'espace et les acteurs qui les font vivre ou les combattent sont parfaitement bien identifiés. Ce dernier point nous permet de répondre au besoin d'une mise en œuvre dans un espace précis pour conserver une pertinence de fond aux résultats et pas simplement une valeur illustrative.

La suite de ce travail se déroule en trois grandes parties.

- **La première traite du changement climatique, des domaines skiables de Savoie et Haute Savoie et de l'organisation du milieu naturel montagnard.** Il s'agit là de broser les lignes générales qui vont alimenter notre réflexion.
- **La seconde partie développe les idées théoriques, relatives à la mise en œuvre de l'approche heuristique.** Il s'agit de préciser le rôle de la donnée, continue et discrète, dans l'ensemble du système. Nous proposons des voies pour quantifier et traiter le point de vue des acteurs. Nous définissons la place et l'influence de cette donnée dans le système informatique en relation avec les moyens de sa mise en œuvre.
- **La dernière partie représente la mise en action du projet sur les données réelles de notre espace.** Nous

montrons également dans cette partie, la distance entre l'aspect purement théorique de la seconde partie et les aménagements obligatoires pour rendre cette démarche véritablement opérationnelle.

⁴ Chapitre 5 du deuxième rapport d'évaluation du GIEC du groupe de travail II : Incidence de l'évolution du climat sur les régions

1 Le changement climatique : considérations générales

1.1 Contexte général du changement

Il ne fait plus guère de doute que le climat global planétaire est en train de se modifier rapidement. Cette transformation est la conséquence d'une mutation importante de la composition chimique de l'atmosphère liée à l'activité anthropique⁵. Cette dernière est, en effet, responsable d'un rejet considérable et croissant de gaz à effet de serre dont le CO₂ est le plus connu. Cela engendre une altération du bilan radiatif de notre système terrestre qui semble se traduire par une augmentation sensible, et surtout rapide, des températures habituellement mesurées à la surface du globe.

La communauté scientifique s'attache à comprendre les mécanismes de régulation du climat afin de mieux cerner les phénomènes relatifs au changement qui sont véritablement imputables à l'Homme. Elle recherche

également à en identifier les impacts. Dans le contexte de travail qui nous anime, il importe de présenter les principales conclusions relatives au changement climatique afin de les introduire dans notre problématique d'analyse des impacts sur l'économie du ski et le milieu naturel en montagne. C'est le sens des pages qui suivent.

1.1.1 Les grands cycles du climat : explications cosmiques

Le climat est en perpétuelle évolution. Les échelles de temps relatives à son évolution globale sont très importantes et se comptent en milliers d'années. Les variations du climat sur le long terme sont principalement le résultat des fluctuations de l'activité du soleil, du volcanisme, de l'orbite terrestre ainsi que de l'obliquité de la planète par rapport à ses pôles. Le dernier million d'années est ainsi

⁵ Climate change 2001 : The scientific basis /Chap 1.3.1 Human influence on the climate system

caractérisé par la variation cyclique de trois grands facteurs cosmiques [VIGNEAU 2000]⁶ :

- L’obliquité de l’axe des pôles par rapport au plan de l’orbite terrestre varie cycliquement de 3° sur une durée d’environ 40 000 ans. Cette variation engendre, des pôles jusqu’aux latitudes moyennes, des saisons d’autant plus contrastées que l’obliquité est importante.
- L’excentricité de l’orbite terrestre varie périodiquement sur 100 000 ans. Bien entendu, plus cette excentricité est importante, plus la partie d’orbite à parcourir loin du soleil est importante⁷. A ce moment là, l’insolation moyenne annuelle décroît.

Enfin, tous les 13 000 ans, le mouvement de précession des pôles intervertit l’hémisphère que la terre présente au soleil quand celle-ci parcourt la partie de son orbite qui en est la plus proche. Ce facteur influence la répartition régionale et saisonnière de l’insolation.

En pratique, la variation de ces facteurs a engendré les successions de périodes froides et chaudes caractéristiques de l’ère quaternaire.

1.1.2 L’effet de serre : paramètre interne de la machinerie climatique

Les facteurs d’influence sur le climat que nous avons décrits ci-dessus sont des facteurs indépendants de ce dernier. Le climat terrestre ne conditionne pas leur existence. Il en existe d’autres, qui sont, en revanche, une conséquence de l’action climatique. L’effet de serre, qui est un piège à chaleur appartient à cette dernière catégorie. Le processus physique en action, à l’échelle du climat, est le même que celui bien connu des jardiniers quand ils se servent de serres. Les gaz à « effet de serre » jouent le rôle des vitres de la serre du jardinier. C’est à dire qu’ils sont transparents à un rayonnement électromagnétique (la lumière visible) et opaques à un autre (les rayons infrarouges) (figure 1-1). La réponse directe des caractéristiques particulières de ces gaz est l’élévation de la chaleur près du sol. Ce phénomène, loin d’être nocif, est crucial pour l’apparition et le développement de la vie telle que nous la connaissons sur notre planète. S’il ne s’exerçait pas, la température moyenne serait de -18° à la surface du globe.⁸

⁶ Jean-Pierre Vigneau / Géoclimatologie/ Université Géographie /Ellipses /2000 p 15

⁷ Cette caractéristique est décrite par les lois de Kepler

⁸ Le savant Arrhenius est le premier à proposer des exemples de modification de température de surface sur la base d’une évolution de la quantité de CO₂ atmosphérique. Son article « On the influence of Carbonic Acid in the air upon the T° of the ground” / Philosophical Magazine N°41/ 237-276 (1896) marque le début de prise de conscience de l’influence des activités humaines sur l’effet de serre. Arrhenius considérait que ce phénomène ne pouvait qu’apporter des avantages à l’espèce humaine en empêchant le retour d’une période glaciaire.

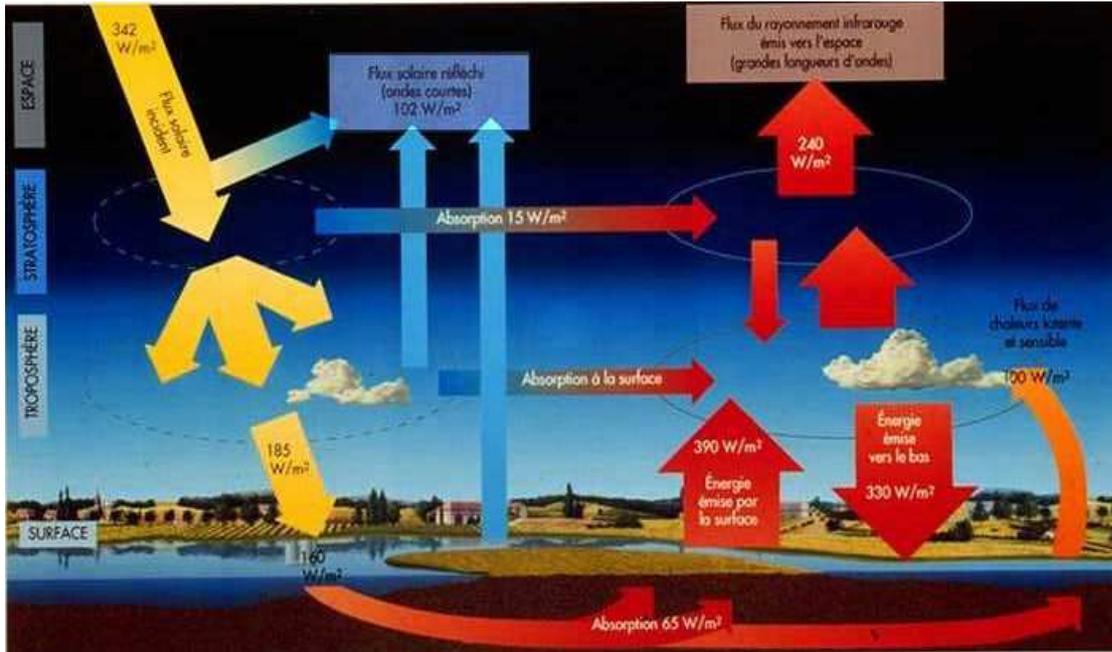


Figure 1-1: Bilan énergétique terrestre

L'entrée énergétique du rayonnement solaire au niveau de la haute atmosphère est de 342 watts par m^2 dans des longueurs d'ondes situées en lumière visible ou proche infrarouge (partie gauche de la figure). L'énergie « passe » donc la barrière de l'atmosphère. En revanche, le flux de rayonnement émis de la Terre vers l'espace se situe dans les grandes longueurs d'ondes (partie droite de la figure). Les gaz à effet de serre, en empêchant cette émission par leur opacité aux rayons infrarouges, contribuent au réchauffement de la planète.

Source CNES : mission scaRaB⁵.

1.1.2.1 Les gaz à effet de serre de l'atmosphère : faibles quantités et actions fortes

Tous les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère sont représentés en très faible quantité. Pourtant, ils gouvernent ce phénomène. L'explication de cette situation est simple : seules les molécules ayant une

structure triatomique sont opaques aux rayonnements infrarouges. Elles sont peu présentes dans l'atmosphère, principalement composée de molécules biatomiques comme l'azote (N_2) et l'oxygène (O_2). Deux catégories de gaz à effet de serre se dégagent ; ceux qui ont un cycle naturel et ceux qui n'existent que par le fait humain.

⁵ Site web: <http://scarab.cnes.fr:8020/home.html>

- **Les gaz à cycle naturel**

La vapeur d'eau (H₂O), qui est le premier des gaz à effet de serre, ne représente que 0,3% de la composition totale de l'atmosphère pour 55% de contribution à l'effet de serre⁶. Le gaz carbonique (CO₂) vient en seconde position. Il représente 0.0036% de la composition de l'atmosphère (360 Parties Par Million en Volume ppmv⁷) et 39% de l'effet de serre. Le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ozone (O₃) se partagent les 6% d'action restant sur l'effet de serre pour des proportions très faibles, respectivement 1.8 ppmv ; 0.3 ppmv et 0.03 ppmv.

- **Les gaz à effets de serre exclusivement liés aux activités de l'Homme**

Il s'agit de gaz appartenant à la famille des halocarbures comme le fluor (F), le chlore (Cl) ou encore l'iode (I). Leur efficacité en matière d'effet de serre est bien plus importante que n'importe lequel des autres gaz à cycle naturel. Ils sont extrêmement opaques aux rayonnements infrarouges, chimiquement stables et peuvent perdurer dans l'atmosphère pendant une très longue période. Pour les Perfluorocarbures (connus sous le sigle PFC) par exemple, cela se compte en dizaines de milliers d'années. Ces gaz, dont font partie les tristement connus chlorofluorocarbures (CFC), sont, ou étaient, d'utilisation courante dans l'industrie. Présents dans les anciens réfrigérateurs ou les bombes aérosols, ils ont été interdits par le protocole de Montréal en 1987, pour leur action corrosive sur l'ozone stratosphérique. Malgré cela, les émissions continuent à cause du temps de latence

nécessaire à leur mise au rebut. Les choix industriels pour remplacer les CFC n'ont cependant pas été guidés par un quelconque souci de préservation climatique mais seulement par l'absence d'action agressive sur l'ozone et de toxicité sur l'Homme. Les PFC qui remplissent ces conditions ont alors été massivement utilisés par l'industrie du froid. Pourtant, il s'agit de très puissants gaz à effet de serre. Leur destruction ne peut intervenir que dans la haute atmosphère par décomposition photochimique au moyen de l'action des ultraviolets. Bien que leur concentration soit extrêmement faible (la mesure se fait en partie par trillion⁸), leur efficacité est si forte que leur participation à l'effet de serre est indiscutable. Leur concentration a été multipliée par des facteurs allant de 5 à 20 sur une durée de 20 ans (figure 1-2).

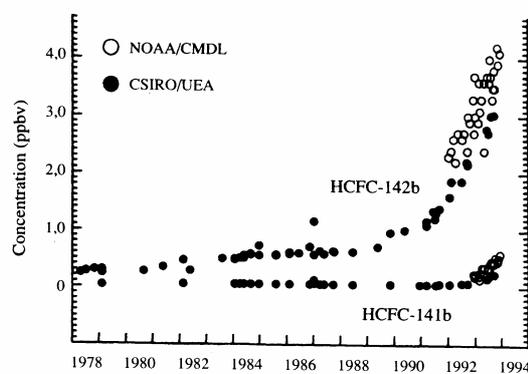


Figure 1-2: Mesure directe atmosphérique de la concentration des HCFC.

Source [JANCOVICI 2002] d'après GIEC 1996

⁶ GIEC 1995 / *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*

⁷ 1 partie par million en volume = 0.0001%

⁸ une ppbv = 0.0000000001%

1.1.3 Elévation de la concentration dans l'atmosphère des principaux gaz : une corrélation avec les activités humaines

L'étude de la concentration du gaz carbonique au fil du temps nous permet de confirmer la responsabilité humaine dans le changement climatique.

1.1.3.1 Les mesures de concentration temporelle du carbone : mesures directes et carottages

Les mesures directes des concentrations de carbone dans l'atmosphère ont commencé dès 1955 à Mauna Loa (figure 1-3) dans l'archipel des îles Hawaii (USA) et dans d'autres sites éloignés des grands émetteurs de gaz carboniques comme les villes ou les zones industrielles. Les mesures effectuées en ces stations ne se contredisent pas et montrent une augmentation annuelle du taux de concentration de CO₂ dans l'atmosphère d'environ 0.4% par an pour se situer aujourd'hui à 360 ppmv. [GIEC 2001]

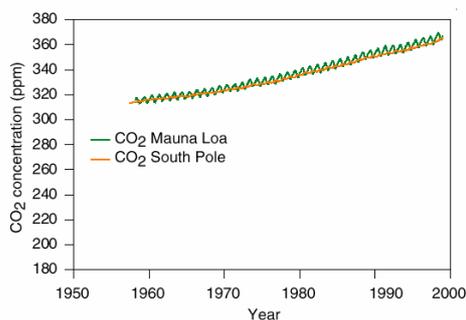


Figure 1-3: Concentration du CO₂ mesuré sur le site de Mauna Loa à partir de 1955.

Les fluctuations de la courbe sont dues à l'alternance de la période végétative été-hiver caractéristique de l'hémisphère nord. Source [GIEC 2001]⁹

⁹ Technical summary / Climate change: the scientific basis [GIEC 2001] p 40

Comme les gaz à effets de serre sont stables chimiquement, il est possible d'établir un graphique de leur concentration très loin dans le temps. Des carottages ont été pratiqués en Antarctique et au Groenland afin de reconstituer le climat sur des périodes passées plus anciennes à partir des bulles d'airs emprisonnées dans la glace (figures 1.4 et 1.5). Les couches les plus profondes situées en Antarctique permettent de remonter 400 000 ans en arrière.

De cette façon, nous voyons que la concentration de gaz carbonique a varié pendant les 400 000 ans qui viennent de s'écouler entre 200 ppmv et 280 ppmv sauf dans les deux derniers siècles où cette concentration augmente fortement.

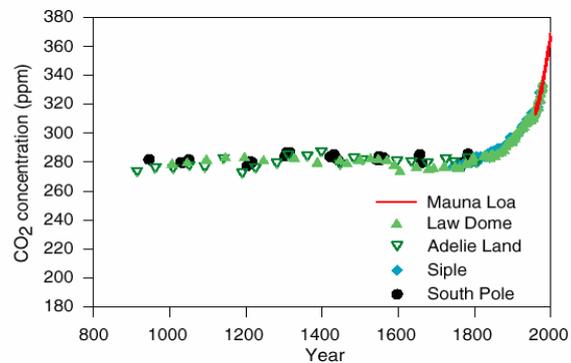


Figure 1-4: Concentration de gaz carbonique atmosphérique depuis l'an 1000

Source [Giec 2001]¹⁰

¹⁰ Idem

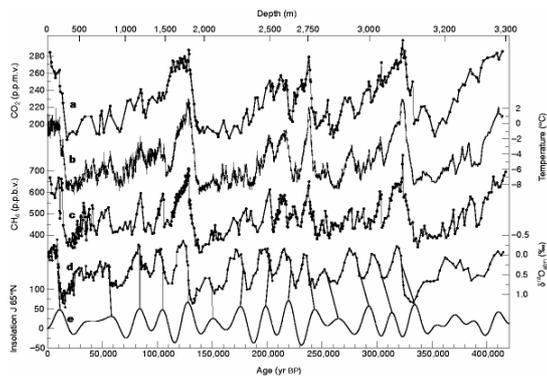


Figure 1-5: Concentration en ppmv de CO_2 et CH_4 sur les 400 000 dernières années d'après l'étude des forages effectués à la station Vostok.

Le graphique se lit de droite à gauche. L'élévation subite des années récentes n'est pas représentée¹¹.

Source GIEC 2001

Les mesures, effectuées à l'aide de carottages, semblent suffisantes pour établir la corrélation entre les activités humaines (l'utilisation de combustibles fossiles) et la modification de la composition chimique de l'atmosphère. Cependant, des quantités extrêmement importantes de carbone sont stockées dans les océans, la végétation et les sols. Elles pourraient se trouver réintroduites dans le cycle par le fait d'un phénomène inconnu de la communauté scientifique. Dans ce cas, la cause de l'augmentation du niveau de carbone atmosphérique ne devrait rien aux activités humaines. L'étude et la mesure des isotopes du carbone biosphérique contredit cette hypothèse.

Le carbone possède trois isotopes¹², deux stables, le carbone 12 (^{12}C ; le plus abondant)

¹¹ Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core, Antarctica / Nature 399 / 1999/ p 429 - 436

¹² Pour un même élément (comme le carbone), des différences existent entre atomes qui possèdent le même nombre de protons mais un nombre de neutron différents

et le carbone 13 (^{13}C ; environ 1.1% de la biosphère) et un, radioactif, bien connu des archéologues, le ^{14}C . Le ^{13}C possède une cinétique différente (il est plus léger donc plus réactif) de celle du ^{12}C . La biomasse continentale, à cause de cette différence de cinétique, est moins riche en ^{13}C (de part l'action de la photosynthèse) que les stocks marins dont la quantité est proche de celle de l'atmosphère. Or les mesures actuelles montrent que le ^{13}C diminue dans l'atmosphère¹³ ce qui signifie que les augmentations actuelles de carbone ne peuvent être que le fait d'émissions terrestres.

L'étude du ^{14}C précise le constat et montre que l'usage de combustibles fossiles représente la cause principale de l'élévation des teneurs en Carbone de l'atmosphère. La demi-vie du ^{14}C est de 5500 ans. Il a donc quasiment disparu des combustibles fossiles. Comme la quantité de ^{14}C de l'atmosphère décroît également, l'augmentation de CO_2 de l'atmosphère ne peut être due qu'à la consommation de combustibles fossiles. C'est à dire en relation avec les principaux moyens de création d'énergie utilisés par l'homme.

Enfin, un simple raisonnement logique enlève les derniers doutes autour de la responsabilité humaine dans l'élévation des concentrations en CO_2 de l'atmosphère. L'accroissement annuel du carbone mesuré dans l'atmosphère n'est pas équivalent à la quantité totale annuelle rejetée par les activités humaines. Il existe donc des mécanismes de stockage du carbone dans la nature : les puits de carbone.

¹³ GIEC 1995 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories

Si le milieu naturel se comporte globalement comme un puits, il ne peut donc pas participer à l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique.

1.2 Hypothèses, surveillances, simulations : les institutions, les instruments d'étude du climat et les conséquences envisagées

Le climat est un sujet constant de préoccupation pour l'espèce humaine à cause de son influence sur les modes de vie. Par exemple, certains préhistoriens défendent une théorie climatique comme vecteur de la survenue de la révolution néolithique. Arrhenius (découvreur de l'effet modificateur des activités humaines sur le climat) considérait qu'une augmentation globale de la température moyenne à la surface du globe exercerait un effet bénéfique pour les hommes, particulièrement grâce à l'augmentation des rendements agricoles. Il voyait là un moyen efficace de voir s'éloigner le spectre de la famine.

1.2.1 Complexité du sujet d'étude : organisation supranationale

On pourrait croire que l'étude du climat correspond à une discipline bien précise. Il n'en est rien car si la définition du climat se réduit à une variation de températures et de précipitations, son étude réclame la participation d'un grand nombre de disciplines différentes. Celles-ci sont aussi éloignées les unes des autres que la chimie l'est de la

géographie ou l'histoire de la thermodynamique. Cependant, ces quatre sciences (et bien d'autres) interfèrent dans l'étude et la modélisation du climat. Le Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat est chargé de synthétiser les connaissances et leur avancée au fil du temps.

1.2.1.1 Le Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat (GIEC)

Le Groupement Intergouvernemental pour l'Etude du Climat (GIEC) représente l'un des plus importants processus d'expertise scientifique au monde. Sa mission est très claire et elle est placée sous la double compétence de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) et du Programme pour l'Environnement des Nations Unis (PNUE). Le GIEC est chargé « d'expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le risque de changement climatique provoqué par l'Homme ». L'emploi du mot expertise dans sa définition caractérise parfaitement le rôle du GIEC. **Cette organisation ne mène pas d'études.** Elle établit des documents de synthèses relatifs à ce qui fait consensus sur la question du changement climatique.

Le GIEC a été créé à la demande du G7 en 1988. Tous les Etats membres de l'ONU en font partie. Il possède son propre budget¹⁴ et est administré par un bureau élu par l'assemblée générale des pays membres. Tous les quatre à cinq ans, une assemblée plénière des pays membres (c'est à dire tous ceux qui siègent à l'ONU) est convoquée pour valider un

rapport d'évaluation et définir les lignes d'éclaircissements réclamées par le débat politique pour les années à venir.

Trois groupes de travail aux missions bien définis se partagent le champ d'investigation :

- Groupe I : Fonctionnement du climat et appréciation du changement climatique ;
- Groupe II : Vulnérabilité de la biosphère et de notre système socio-économique en fonction des évolutions possibles du climat ;
- Groupe III : Evolution des émissions de gaz à effet de serre et variables d'actions pour réduire ces derniers.

1.2.1.2 Méthodes de construction des « rapports d'évaluation »

Le GIEC produit, tous les quatre à cinq ans, des documents de plusieurs centaines de pages qui représentent l'état de l'art en la matière, pour chacun des groupes de travail, en fonction des directions qui ont été décidées lors de l'assemblée plénière de la session précédente. Le travail de recueil, de recoupement et de rédaction pour parvenir au document validé final est considérable. L'étude s'effectue en plusieurs phases. La première concerne l'écriture du sommaire prévisionnel du rapport suivant pendant l'assemblée plénière. Ce document, une fois validé, sert de base au bureau exécutif du GIEC pour mettre en place un réseau d'auteurs à deux niveaux. Les auteurs « principaux », toujours sous la forme d'un petit groupe,

auront la charge de la rédaction d'un chapitre avec l'aide de « contributeurs »¹⁵.

Ces derniers sont généralement des spécialistes chargés d'évaluer ce qui fait consensus sur un sujet précis et en rapport avec les attentes du GIEC dans leurs disciplines. Ce travail donne lieu à la rédaction d'une première version du chapitre qui établit la distinction entre ce qui est admis ou pas dans la/les communauté(s) scientifiques concernées. Ce document est alors diffusé à l'intention des scientifiques du monde entier qui peuvent formuler des objections et des remarques. A la suite de cela, une seconde version est écrite qui prend en compte les objections pertinentes. Cette version est à nouveau diffusée dans la communauté scientifique mais également aux gouvernements des pays membres. Un projet final de rapport d'évaluation est alors élaboré. Celui-ci deviendra effectif lors d'un vote en séance plénière et se verra labellisé « publication du GIEC ». A ce jour, il existe trois rapports d'évaluation du GIEC, respectivement rendu en 1990, 1995 et 2001. Ces documents représentent la référence pour les négociations internationales sur les gaz à effet de serre et plus largement, sur l'état de l'art (admis par tous) en matière de changement climatique. Les choix initiaux qui ont guidés notre expérimentation sont étroitement tributaires des conclusions de ces rapports.

disposition de personnel

¹⁵ Le nombre d'auteurs principaux du chapitre 5 du second rapport d'évaluation du GIEC (groupe de travail II) intitulé : « Incidence de l'évolution du climat sur les régions de montagne » que nous avons utilisé dans notre travail comportait 2 auteurs responsables, 8 auteurs principaux et 25 collaborateurs

¹⁴ essentiellement sous la forme de mise à

1.2.2 Estimation du changement climatique : trois approches

Plusieurs approches sont possibles pour estimer l'effet du changement climatique. Elles peuvent se ranger dans trois catégories, bien que les deux premières soient ressemblantes : l'approche par utilisation d'enregistrements instrumentaux, les analogues paléo climatiques et la modélisation numérique.

1.2.2.1 Approche par la mesure instrumentale

Cette approche consiste à étudier la variabilité naturelle du climat mesurée par des instruments, pour prédire des tendances climatiques pendant des séquences particulières comme les années extrêmement sèches ou humides. Les principales difficultés naissent de la faible durée du temps de mesures. Bien que des techniques d'extension de la base de données par génération stochastique (méthode de Monte-Carlo, algorithme de Turing) soient parfois utilisées, les résultats pour l'évaluation à long terme ne sont pas probants [FAO 1997].

1.2.2.2 Méthode des analogues climatiques

La méthode des analogues climatiques consiste à rechercher dans le passé des situations climatiques équivalentes à celles que l'on envisage. Cette méthode présente de sérieuses similitudes avec l'approche par mesure instrumentale sur un plan catégoriel. Les limites sont cependant différentes. Il paraît difficile de connaître avec une très grande précision les climats du passé sur la seule

analyse des carottages antarctiques même si celle-ci est recoupée par des bases de données paléo botaniques. Seules des tendances longues peuvent être mise en évidence et déjà en 1988 [HEINRICH 1988 ; BOND 1992], il était démontré que les températures globales pouvaient varier sur des périodes courtes comme des décennies ou des siècles.

1.2.2.3 Modélisation du climat et usage des Modèles Généraux de Climat (GCMs)

L'approche par simulation numérique semble être la voie la plus efficace pour comprendre et mesurer le changement climatique. Cette méthode consiste à modéliser la mécanique du climat au sein d'un ordinateur.¹⁶ La puissance de calcul aujourd'hui proposée permet de simuler l'évolution du climat sur la base de scénarios qui servent au calibrage de départ du modèle. Les modèles de simulation numérique qui naissent de cette méthode sont appelés Modèles Généraux du Climat (GCM). Il existe actuellement une quinzaine de Modèles Généraux de Climat au monde. Ils se présentent sous la forme de modules chargés de traiter les différents processus en action dans le système climatique. On trouvera donc des modules chargés de :

- L'échange d'énergie entre les différents compartiments ;
- La circulation de l'air à petite échelle avec les transports d'eau associés ;

¹⁶ A ce moment, la connaissance de l'historique des phénomènes requise pour les deux méthodes précédentes, s'avère précieuse.

- Les mouvements verticaux et horizontaux de l'océan ;
- Les interactions atmosphère/océan (on parlera alors de modèles couplés) ;

- Le cycle du carbone.

Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive et ces modèles de circulation généraux sont en développement permanent comme le montre la figure 1-6.

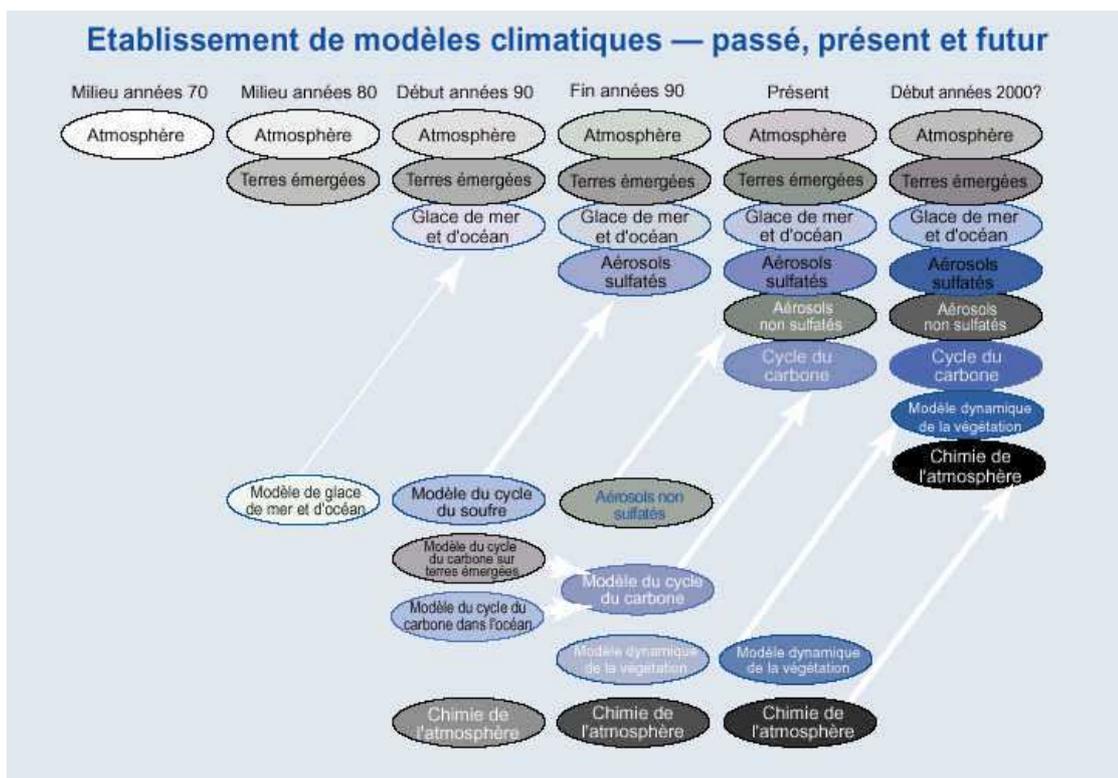


Figure 1-6: Récapitulatif du développement des modèles de circulation climatique

Source GIEC 2001 (e) p 46

La simulation se traduit en pratique par le calcul d'une valeur (température, précipitation...) 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 1-7 ci-dessous montre la structure d'une maille pour le modèle de circulation climatique anglais du Hadley center.

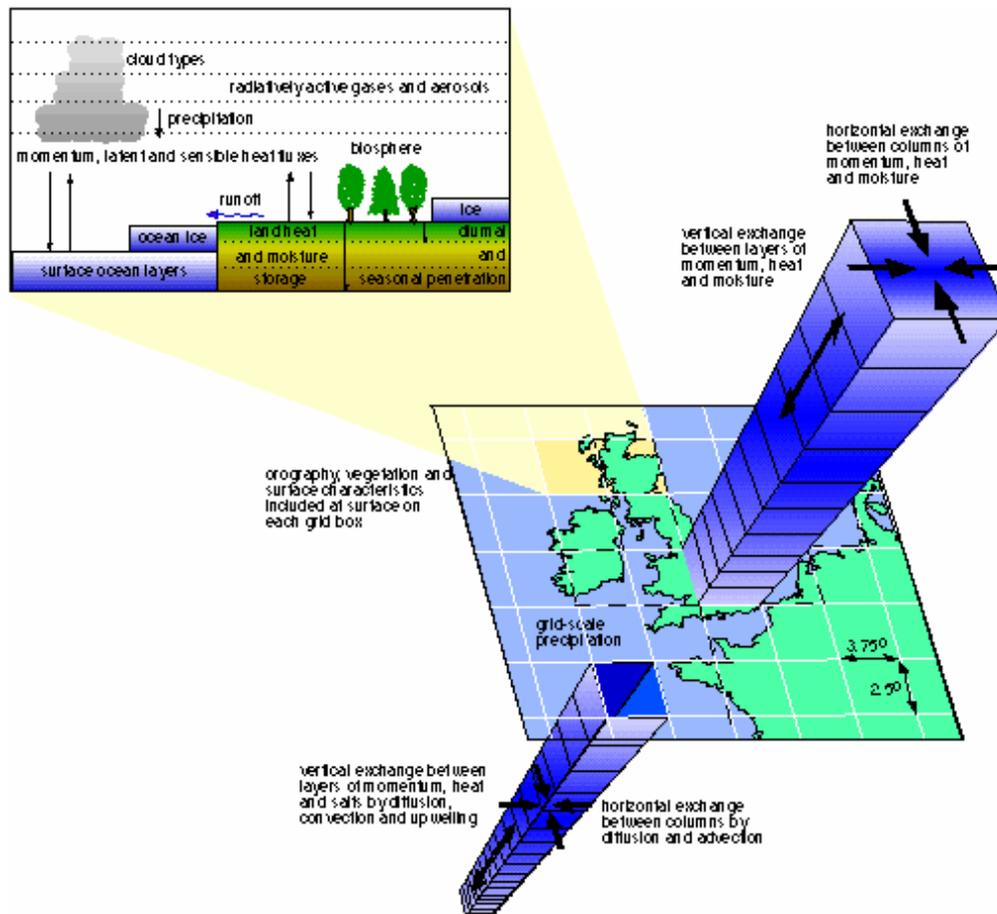


Figure 1-7: Modèle conceptuel du maillage pour le modèle de circulation climatique du Hadley center

Source : JANCOVICI 2002

Bien que cette approche représente la voie la plus sérieuse, il subsiste certaines limites importantes à la modélisation du climat terrestre. La plus importante concerne le caractère chaotique de notre système climatique. Il n'est donc pas, par définition, entièrement prévisible. Nous resterons donc toujours dans le champ des estimations. L'efficacité des résultats n'est cependant pas mise en doute car la modélisation du climat

couplée à la simulation numérique représente la méthode actuellement utilisée par les instituts météorologiques nationaux (seuls le pas de temps et la taille des mailles changent). Malgré les perceptions usuelles du sens commun, les prévisions météorologiques quotidiennes ou à quelques jours sont la plupart du temps remarquables de précision.

Températures à la surface simulées et moyennées annuellement et globalement

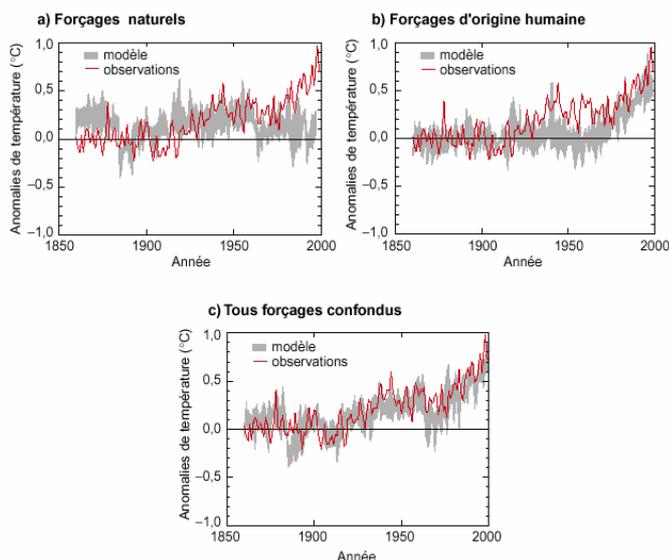


Figure 1-8: Amélioration de la simulation par introduction du forçage naturel et anthropique

Sources : GIEC 2001 (e) p10

La seconde limite concerne la simplification obligatoire du réel pour permettre sa modélisation. C'est l'essence même de tout projet de modélisation. Les résultats auront donc une portée limitée notamment quand on cherchera à rendre ceux-ci plus locaux. L'emploi d'autres techniques devra alors être envisagé (statistiques, modèles emboîtés).

Enfin, l'influence de certains objets du climat est encore assez mal modélisée. C'est le cas par exemple des nuages [GIEC 2001 : The Scientific Basis]¹⁷.

Pourtant, leur introduction dans les modèles est cruciale. Il a été démontré que la prise en compte des nuages dans les modélisations

engendre des écarts de 1° à 2° sur la température moyenne à l'échéance d'un siècle. [JANCOVICI 2002]

Malgré ces imperfections, la pertinence des modèles climatiques devient largement suffisante pour expliquer les changements observés (figure 1-8). Il est remarquable de constater que les Modèles Généraux de Climat aboutissent tous dans des intervalles qualitatifs convergents. Cette observation est encore renforcée par le fait que certains modèles présentent des différences de fonctionnement significatives.

¹⁷ page 45 paragraphe « nuages »

A ce jour, aucune équipe de modélisation du climat n'a présenté de résultats où le climat n'est pas modifié du fait de l'action anthropique. Nous disposons donc, avec ces outils, d'un moyen d'évaluation sérieux des conséquences possibles du changement climatique sur notre environnement. Les extrapolations de températures et précipitations à 15 ans que nous proposons plus bas en entrée de notre travail d'interpolation pour tenter de proposer une mesure locale des effets du changement climatique sont la résultante de la mise en action d'un modèle de circulation climatique proposé par le GRID et dont l'architecture est identique aux modèles de circulation climatiques les plus reconnus comme celui du Hadley Center.

1.2.3 Projection pour l'évolution future du climat terrestre : les scénarios d'émissions

Les modèles de circulation climatiques ne peuvent pas être utilisés sans définir un contexte de départ. Ils sont donc utilisés conjointement avec des scénarios qui définissent l'évolution des agents de forçages¹⁸ (naturels et anthropiques). La construction de ces scénarios est un point crucial pour la simulation. Ils ont donc fait l'objet d'un rapport qui les décrit point par point : le rapport spécial sur les scénarios d'émissions (en anglais Spécial Report on Emission Scénarios SRES).

¹⁸ Les agents de forçages sont des variables qui conditionnent le comportement d'une mesure comme une prédiction de température. Les activités humaines sont des agents de forçages.

En 1996, le GIEC a entrepris l'actualisation des scénarios d'émissions. Cette mise à jour a donné lieu à quatre familles de scénarios différentes (A1 ; A2 ; B1 ; B2) qui déterminent les paramètres de forçages en fonction d'une évolution naturelle et anthropique de notre planète. Chacune de ces familles propose une hypothèse d'évolution des facteurs démographiques, technologiques et économiques qui influenceront les émissions de gaz à effet de serre dans le futur. Bien entendu, chaque scénario possède une probabilité de réalisation égale à tous les autres. Le nouveau SRES a été approuvé en assemblée le 15 mars 2000.

1.2.3.1 La famille de scénario A1

Les scénarios de type A1 proposent un futur où la croissance économique sera très rapide avec des technologies plus 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 type de scénario que nous avons choisi dans notre exemple de simulation présenté en dernière partie.

Logiquement, nous aurions dû construire la simulation avec chacun des scénarios proposés pour assurer la robustesse de nos résultats finaux, mais le temps nous a manqué. Aussi, nous avons fait le choix d'utiliser un scénario de type A1B car, c'est cette famille qui représente le plus les conditions sociales actuelles. A l'échelle de temps que nous proposons, (15 ans) la probabilité de voir se profiler une rupture sociale telle que présentée en A2 ou B2 nous semblait faible. Enfin, sur le plan de la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, le scénario A1B en laissant une part aux énergies fossiles tout en permettant le développement d'autres modes de production d'énergie nous semblait correspondre également à la tendance actuelle.

1.2.3.2 La famille de scénario A2

Les scénarios A2 décrivent un monde très hétérogène. Ils reposent principalement sur l'idée d'une autosuffisance régionale et de la préservation des identités locales. La fécondité entre régions converge très lentement ce qui conduit à une augmentation continue de la population mondiale. Dans cette mosaïque, l'effet puissant du régionalisme fragmente l'évolution technologique et la croissance économique.

1.2.3.3 La famille de scénario B1

Le canevas des scénarios B1 propose une approche équivalente au type A1 en ce qui concerne la population. En revanche, des modifications profondes de structures économiques interviennent et orientent celle-ci vers les services et l'information. L'usage des technologies propres sur le plan environnemental se répand. Les ressources énergétiques sont gérées de façon efficace. Sur le plan économique, social et environnemental, la gouvernance s'oriente vers une viabilité économique respectueuse et équitable à l'échelle mondiale. En revanche, il n'est pas prévu dans cette catégorie de scénarios, d'initiatives supplémentaires pour la gestion du climat.

1.2.3.4 La famille de scénario B2

Les scénarios de type B2 reprennent les idées sous jacentes des types A2 et B1. C'est à dire que nous serions dans un monde « où l'accent serait placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale »¹⁹. Dans ce monde, la population s'accroît de façon continue, bien que plus faiblement que dans le scénario A2. Le développement technologique est moins rapide que dans les familles B1 et A1. Enfin, les choix socioculturels et économiques sont pris à l'échelon régional contrairement au type B1 où ces choix se font au niveau mondial.

¹⁹ GIEC 2001 Bilan 2001 des changements climatiques: Les éléments scientifiques P 17

1.2.4 Les conséquences possibles du changement climatique sur les équilibres anthropiques : un enjeu écologique mais aussi moral

Par le passé, la terre a déjà subi d'importants changements climatiques. Les épisodes les plus spectaculaires pour l'Homme en sont les grandes glaciations quaternaires. Nous avons expliqué plus haut que leur caractère cyclique était principalement lié à des facteurs astronomiques. Lors de la dernière glaciation, Würm, la température estimée en Europe centrale opérait une réduction de 4 degrés par rapport à nos moyennes actuelles²⁰. Plus récemment, la France a connu deux épisodes climatiques suffisamment importants pour être perçus et rapportés par les hommes du passé. Une période chaude s'est déroulée du XI^{ème} au XIII^{ème} siècle suivie d'une période froide appelée « le petit âge glaciaire » au cours du XVIII^{ème} où l'on a vu découper « le vin à la hache en place de grève »²¹.

Pourquoi s'interroger alors sur la question du changement climatique et envisager le pire pour l'Homme ? Notre espèce a déjà vécu des bouleversements majeurs sans disparaître pour autant. Une partie de la réponse se situe dans le fait que ces modifications peuvent engendrer un impact difficile à estimer aujourd'hui sur les équilibres sociaux, économiques et géopolitiques de notre planète [JANCOVICI 2002]. Le phénomène de mondialisation économique ne permet pas de considérer le changement climatique comme une « roulette de casino » où il y aurait des

perdants et des gagnants identifiés par les frontières administratives. Par exemple, aborder l'évolution en quantité, en répartition et en usage des ressources naturelles, particulièrement celles qui sont liées à la gestion de l'eau et aux zones cultivables, sans la replacer dans un contexte économique et social à l'échelle régionale, ne présenterait qu'un intérêt relatif.

Le caractère global du changement climatique ainsi que les échelles de rapidité avec lesquelles il se met en place, posent donc clairement la question de la place de l'Homme dans la biosphère²². Seule espèce capable de maintenir un état de la nature favorable à nos activités²³, nous risquons d'être dépassés à grande vitesse par une évolution majeure et non contrôlée de notre milieu « naturel ». Cette évolution hautement probable, dont nous sommes les artisans, peut modifier considérablement la position de l'Homme au²⁴ Monde.

Au delà d'une réduction drastique du nombre des individus, pour l'heure potentiellement

22 Ces idées sont développées par plusieurs Philosophes dont le plus connu (et controversé) est James Lovelock, auteur de l'hypothèse Gaïa décrite dans son ouvrage : *La terre est un être vivant : l'hypothèse Gaïa/ Flamarion*. La démarche suivie par le GIEC montre que la question du changement climatique à l'échelle des 200 prochaines années ne peut pas être considérée sérieusement sans une vision de l'action possible de l'homme sur son milieu. Le groupe de travail III du GIEC est chargé de publier sous la forme de rapports, ce qui fait consensus sur la question pour l'ensemble de la communauté scientifique. Le rapport spécial sur les scénarii d'émissions publiés en 2000 constitue une mise à jours des travaux entrepris en 1992 sur ce point.

23 Cette assertion doit s'entendre au sens global et dans une perception occidentale de la relation à la nature. C'est à dire selon les concepts de mécanisation et d'industrialisation prônés par les théoriciens de la mondialisation.

²⁰ Changement de climats et production agricole /FAO/Chap 2/1997/ Polytechnica

²¹ Leroy Ladurie/ *Le climat depuis l'an 1000...*

très inégalement répartie, la question se pose surtout sur un plan philosophique et social. La notion de progrès²⁵ qui est établie en dogme depuis la révolution industrielle du 19^{ème} siècle ne peut plus avoir cours sans de sérieux aménagements. Saurons-nous développer cette nouvelle forme de relation sociale, économique et écologique avec notre biosphère où l'espèce humaine se révèle finalement si fragile?

1.2.4.1 Un enjeu global sur les équilibres planétaires

Nous pouvons aborder la question du changement climatique dans l'esprit de la théorie des risques. C'est à dire en terme de définition d'un risque par la superposition d'un aléa et d'une vulnérabilité. La difficulté majeure à laquelle est confrontée la communauté scientifique concerne le caractère flou du phénomène, tant sur le plan des scénarios qu'elle imagine, que sur le plan de la spatialisation qui en découle. Cette complexité se trouve renforcée par la superposition socio-économique, c'est à dire les capacités de réaction des sociétés effectivement confrontées au phénomène.

L'eau par exemple, représente un de ces grands points d'interrogation quand elle est considérée à l'aune du changement climatique. Les océans vont monter inmanquablement. L'une des raisons qui permettent cette affirmation est que l'eau chaude occupe simplement plus de volume

que l'eau froide. Le niveau moyen des océans est envisagé à un mètre de plus par rapport au niveau actuel à l'échéance de 2100, seulement sur cette différence de volume d'occupation de l'espace par l'eau. Or, cinquante % de la population mondiale habite sur les littoraux. Des zones côtières très peuplées comme le Bangladesh, des archipels coralliens comme les Maldives seront confrontés à des problèmes sérieux d'inondation [PASKOFF 2001] bien plus par la récurrence de surcôtes du niveau moyen à la suite de phénomènes exceptionnels, que par un envahissement direct des eaux. Des espaces agricoles risquent de devenir impropres aux cultures par submersion ou salinisation. La montée des océans pose donc un problème crucial surtout si l'on ajoute au phénomène déjà décrit ci-dessus, celui de la fonte des glaces polaires. Cela pourrait faire monter le niveau moyen de cinq à six mètres par rapport à celui d'aujourd'hui. En la matière, la montée des eaux représente l'aléa, les 50% de population inégalement réparties sur les côtes expriment la vulnérabilité. Le risque maximal peut se spatialiser en identifiant dans les espaces à basses altitudes ceux qui sont fortement peuplés et dont les autorités ne jouissent que de peu de moyens techniques. Les Etats industriels semblent se désintéresser de la question pour le moment. Actuellement, seules de grandes organisations internationales tentent de visualiser et d'évaluer ces différents risques potentiels (famines, maladies, sécheresses) en fonction de l'avancée des travaux relatifs au changement climatique.

D'autres questions plus connexes et géopolitiques émergent également. Quelle

²⁴ au sens métaphysique du terme

²⁵ Telle que la présente Claude Lévi Strauss dans : Race et Histoire/...

serait l'attitude de pays habituellement puissants en cas de déstabilisation géopolitique soudaine : une migration massive et spontanée de population vers leur sol par exemple?

1.3 Le climat spatialisé : de la complexité globale aux effets localisés

La première partie de ce travail s'est attachée à aborder les effets possibles du changement climatique sur un plan général. Nous avons posé un regard sur l'espace au travers d'une échelle très petite, adaptée pour poser un raisonnement géopolitique sur les conséquences de cette modification générale. Cependant, les impacts réels pour les hommes s'opèrent dans le quotidien et se déroulent à des échelles beaucoup plus grandes. Les conséquences directes du changement climatique seront par définition locales. C'est leur caractère contigu qui leur donnera alors une dimension régionale. Il s'agit donc pour nous, d'effectuer un changement d'échelle pour nous rapprocher de la réalité des espaces de vie. Cette échelle plus grande correspond à notre réflexion dans ce travail et portera maintenant sur les questions que les impacts locaux du changement climatique posent aux activités humaines. C'est par exemple le cas pour le défi climatique posé aux domaines skiables et à la biodiversité de l'étage subalpin.

1.3.1 Le climat à l'interface des systèmes naturels et anthropiques

Le climat se définit correctement par une relation étroite entre précipitations et températures. Ces dernières sont variables dans l'espace en fonction de la latitude et de l'altitude qui conditionnent les entrées énergétiques du rayonnement solaire. Il en découle une mosaïque paysagère, floristique et faunistique, expression visible dans l'espace, du climat en action sur le secteur géographique local. Même l'espèce humaine n'échappe pas à ce déterminisme climatique. Elle va façonner l'espace dans lequel elle vit, en partie en fonction des conditions climatiques qui rythment son existence. Il s'agissait dans la passé d'en tirer parti au mieux afin d'assurer la subsistance de la communauté. Les paysages ruraux des Cévennes avec leurs terrasses le long des versants des Causses sont, par exemple, caractéristiques de cette relation étroite entre l'Homme et son milieu. La création du Parc National des Cévennes montre d'ailleurs qu'il s'agit bien de reconnaître là un patrimoine commun riche sur le plan de la biodiversité où les habitants et la nature prospèrent de concert dans un contexte climatique bien particulier. Que le climat varie subitement ou évolue fortement en quelques dizaines d'années et c'est tout le système qui s'effondre²⁶. Le cas des Cévennes n'est pas particulier. Les paysages actuels des

²⁶ Des civilisations ont déjà disparu par la mise en place de boucles de rétroactions positives avec leur milieu. C'est le cas des Sumériens, incapables de gérer efficacement leurs ressources en eau / Burel ; Baudry / Ecologie du paysage, Concepts méthodes et applications / P 23

montagnes françaises sont issus de l'histoire rurale des siècles passés. Les activités humaines sont l'un des principaux facteurs d'évolution de ces derniers, soit directement en aménageant l'espace selon les besoins, soit indirectement par une influence sur des facteurs externes au paysage. Le climat est l'un de ces facteurs.

1.3.2 Les effets du changement : entre actions directes et effets secondaires, le cas de la variabilité et de la tendance

En régime habituel, une variation légère d'une des composantes du climat entraîne une variation légère dans la plupart des autres composantes. L'effet de la perturbation est absorbé par l'ensemble du système. Il n'en va pas de même quand cette variation se produit de façon abrupte et forte. Le climat s'en trouve alors modifié sur deux niveaux : variabilité des phénomènes météorologiques au niveau local, ainsi que tendance à long terme liée à l'inertie du système global [FAO 1997].

1.3.2.1 Le cas de la variabilité

- La quantité plus grande de vapeur d'eau injectée par l'évaporation dans l'atmosphère pourrait engendrer des phénomènes météorologiques exceptionnels comme les tempêtes, les cyclones ou pour le cas de la montagne, des avalanches plus importantes qu'à l'accoutumée. Ces phénomènes surviendraient alors avec une fréquence plus rapide simplement en raison de l'augmentation de l'évaporation. **Cette**

instabilité générale du climat peut même réduire considérablement notre capacité de prévision du temps²⁷, nous empêchant de nous préparer à la survenue d'un phénomène météorologique exceptionnel. Il reste toutefois assez difficile de confirmer véritablement l'hypothèse d'une augmentation de phénomènes météorologiques exceptionnels et imprévus à l'aide de l'approche strictement déterminée de la modélisation du climat. Les instruments de modélisation numérique restent encore dans une maille trop lâche pour appréhender correctement ces phénomènes. Une tornade représente un diamètre au sol de quelques centaines de mètres alors que les meilleurs modèles de discrétisation pour la simulation du climat (hors modèles à grilles imbriquées) n'offrent que des mailles de 1° en latitude et longitude pour les plus fines, ce qui représente un carré de 150 kilomètres de côtés environ. Les scientifiques en sont donc réduits à procéder par déduction et extrapolation sur les lois climatiques en action localement lors de phénomènes exceptionnels.

- Loin des phénomènes exceptionnels, la variabilité du climat peut aussi faire

²⁷ La plupart des publications relatives au changement climatique s'accordent sur ce point. Le lecteur pourra consulter l'excellent ouvrage de Jean-Marc JANCOVICI / L'avenir climatique : quel temps ferons nous/ Seuil/ Mars 2002 pour une première approche globale de la question. Le groupe II du GIEC a publié plusieurs rapports sur le sujet dont le Climate change 2001 : Impact, adaptation and vulnerability Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)/2001/IPCC.

émerger des difficultés dans le quotidien des populations. Les canicules comme les inondations sont aussi des phénomènes climatiques. Leur survenue et l'augmentation de leur fréquence peuvent entraîner de graves effets sur les populations locales²⁸. Le Sud de la France a été le théâtre de plusieurs inondations extrêmement importantes pendant l'automne 2002. Des communes ont vu alors la dénonciation des contrats d'assurances couvrant les biens communaux. L'argument avancé par les compagnies d'assurances pour justifier leur désengagement tenait au fait que le risque de retour de ces phénomènes leur semblait trop élevé pour que le marché de l'assurance de biens communaux reste rentable.

Le changement climatique est donc un phénomène qui se déroule sur une période de temps très longue à l'échelle d'une vie humaine mais ses conséquences locales risquent de se faire sentir plus rapidement en matière de météorologie. L'impact sur la vie quotidienne et sur l'économie se produirait alors de façon beaucoup plus rapide et importante que le phénomène général de modification de la température et du régime des précipitations.

Cette conséquence directe du changement climatique est pourtant peu connue du grand public. Peut-être est ce dû au nombre de publications de vulgarisation qui traitent seulement d'une augmentation de

température conjugué à un horizon temporel lointain. Cette idée d'impacts hypothétiques et lointains, est également relayée par les pouvoirs politiques qui considèrent que traiter ce problème serait mauvais pour le marché. Ce dernier représente pour eux des horizons bien plus rapprochés et certains que les hypothèses « hautement probables » du GIEC.

1.3.2.2 Le cas de la tendance

Sur le plan de la tendance, toute la communauté scientifique s'accorde à dire que la température va s'accroître inexorablement au cours des cent prochaines années pour les seules raisons mécaniques que nous avons développé dans la partie 1.1.²⁹ Le rapport du GIEC 2001 propose une fourchette variant entre + 1.5° et + 5.8° sur la base des modélisations numériques et en fonction des différents scénarii retenus. La figure 1-9 récapitule les différentes possibilités d'évolution pour la température moyenne globale (à gauche) et pour l'élévation du niveau moyen des océans (à droite). Les intervalles situés à droite de chaque graphique montrent l'étendue des possibilités par scénario et tous modèles de circulations climatiques confondus. Ces derniers sont, bien entendu, reconnus par le Giec.

²⁸ Les milliers de morts en France pendant les 15 premiers jours d'Août 2003 confirment tristement

ces propos.

²⁹ GIEC 2001 Climate change 2001 : The scientific basis /Chap

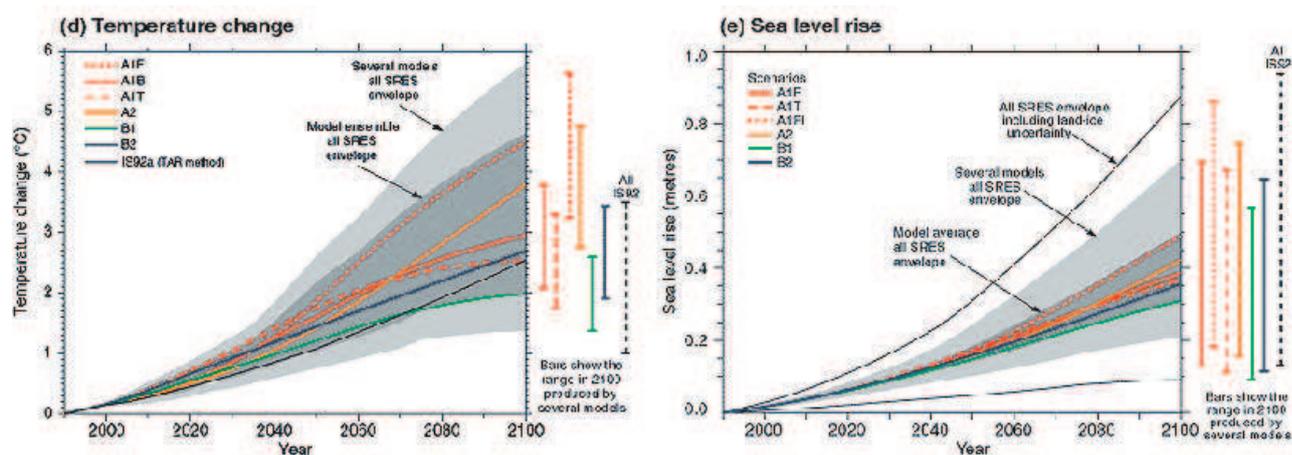


Figure 1-9: Graphique d'évolution des températures et de l'élévation des niveaux des océans entre 2000 et 2100 donnés par les modèles

Les barres à droite donnent les fourchettes données par les modèles selon les scénarii

Source : GIEC 2001

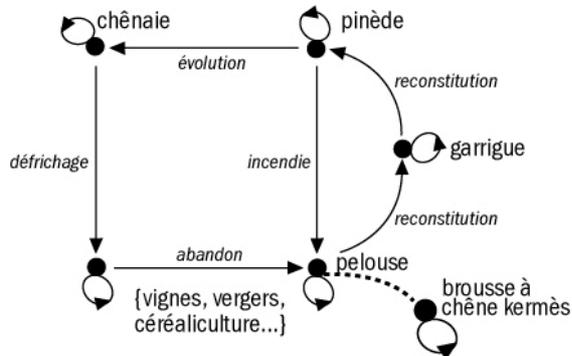
Dans cette hypothèse, plusieurs sortes d'actions sur les équilibres actuels locaux sont alors à envisager.

- L'une d'entre elles est facile à aborder parce qu'intuitive. Elle concerne le pouvoir de destruction immédiat d'un phénomène météorologique en relation avec sa période de retour. La destruction d'un espace par un cyclone, une tempête ou une inondation est très rapide. La reconstruction quand il s'agit d'infrastructures, d'habitations, se déroule dans une échelle de temps encore acceptable pour éviter que l'économie, habituée à fonctionner en temps court, ne soit pas trop déstabilisée. L'industrie japonaise confrontée aux tremblements de terre, aux tsunamis et typhons, nous montre que les activités humaines peuvent s'accommoder de phénomènes catastrophiques récurrents s'ils ne se produisent pas à des intervalles trop rapprochés.

Le parallèle pour le milieu naturel est plus difficile à admettre.

Dans le cas des espaces naturels, le pas de temps de retour à une situation comparable à l'état d'avant le phénomène destructeur est d'environ trente à cinquante ans pour une forêt. C'est à dire que les pas de temps de retour à un équilibre comparable à ce qui était présent avant la catastrophe sont beaucoup plus importants que pour remettre en état des infrastructures économiques. Dans l'hypothèse d'une fréquence plus rapide de ces phénomènes exceptionnels, des écosystèmes entiers peuvent disparaître parce que leur cycle de transition est perturbé. D'autres écosystèmes plus adaptés à ce nouveau type de dynamique prennent alors la place libérée par les premiers. Les espèces changent et la biodiversité peut s'en trouver considérablement affectée. Un exemple de ce mécanisme bien connu des écologues se retrouve au niveau du paysage de garrigues méditerranéennes (figure 1-10).

Le graphe ci-dessous modélise la dynamique du système complet. Les sommets représentent les états possibles des écosystèmes méditerranéens. Les arcs représentent les transitions entre états. Cette transition peut se mesurer d'un point de vue probabiliste au travers d'une matrice de transition élevée à des puissances successive par itération.



La matrice associée à notre graphe est la suivante (les valeurs données sont illustratives. Elles représentent une probabilité de passer d'un état de départ à un état d'arrivée donc leur somme en ligne doit être égale à 1) :

	C	Vig	Pe	Ga	Pi	Ck
C	0.8	0.2	0	0	0	0
Vi	0	0.7	0.3	0	0	0
Pe	0	0	0.4	0.6	0	0
Ga	0	0	0	0.2	0.8	0
Pi	0.1	0	0.25	0	0.65	0
Ck	0	0	0.1	0	0	0.9

Si cette matrice montre un retour aux valeurs initiales après k itérations, elle sera dite périodique. C'est le cas des forêts de Pins d'Alep hautement inflammables qui ont une périodicité de reconstitution d'environ 25 ans. Si la chaîne évolue vers un état absorbant unique après k itérations, elle sera dite récurrente aperiodique. C'est le cas de notre exemple qui après k itérations tend irrémédiablement vers la brousse de chênes Kermès.³⁰

Figure 1-10 : Exemple de modélisation des écosystèmes méditerranéens.

Le paysage actuel n'est pas celui d'origine. Il était très probablement composé de forêts de chênes pubescents. Mis en place pour d'autres raisons que le changement climatique (les incendies répétés conjugués à une activité anthropique très ancienne dont le bois représentait le seul mode de production d'énergie), il illustre assez bien le phénomène

de modification de la dynamique des écosystèmes par l'introduction d'une pression récurrente. Il est envisageable que le changement climatique en montagne génère une perturbation profonde de la dynamique des systèmes telle qu'on la connaît actuellement. L'analyse de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes, notamment en matière de biodiversité constitue un volet important de la convention cadre de l'ONU sur les changements climatiques. De nombreux travaux en écologie sont en cours pour tenter d'évaluer cet impact. L'approche par chaîne de Markov, capable de simuler la transition et la succession des écosystèmes dans un système déterministe, fournit une grande partie de la littérature sur ce point. Cependant, cet outil ne peut pas échapper au système défini au départ. Il possède une mémoire immuable et ne permet que d'établir des probabilités de successions en fonction de certains paramètres introduits au départ. Il ne peut donc pas être employé pour mesurer les phénomènes de translation des écosystèmes car ce dernier n'est pas entièrement déterminé. L'introduction de la dimension spatiale modifie en profondeur les règles de la succession car :

- cet espace supposé conquis par l'écosystème étudié n'était pas vierge de toute autre espèce. Le jeu de la compétition interspécifique intervient alors fortement ;
- les conditions abiotiques peuvent être différentes sur de courtes distances et défavoriser au final l'écosystème en mouvement.

³⁰ Le lecteur intéressé par les chaînes de Markov appliquées à la modélisation écologique pourra consulter : Coquillard P et Hill David R.C / Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets/ Masson / Ecologie /1997/ Chap III d'où nous avons tiré notre exemple.

Dans un autre registre, la tendance au réchauffement réduit et/ou déplace les niches écologiques des espèces vivantes. L'approche autoécologique³¹ nous enseigne que les facteurs biotiques ou abiotiques du milieu conditionnent la présence des espèces. Ces dernières présentent des limites de tolérance à ces facteurs plus ou moins grandes. La capacité d'une espèce à coloniser différents milieux est directement liée à cette idée, appelé valence écologique. Par exemple, la Puce du glacier à une valence écologique faible (elle ne peut vivre que dans un intervalle de température compris entre -15° et $+15^{\circ}$) et le Pin Sylvestre, une valence écologique forte (-45° à $+30^{\circ}$). Bien que tous les facteurs écologiques puissent devenir limitants, certains s'exercent de façon plus prégnante. La température appartient à cette catégorie. Peu d'espèces résistent si la température se révèle trop faible ou trop importante sur une période assez longue. Pour les espèces végétales, l'évolution des facteurs écologiques liés au climat introduit de fait un déplacement latitudinal en plaine et altitudinal en montagne de leur optimum harmonique. Certaines espèces à valence faible ne pourront pas suivre efficacement la migration de leur niche si celle-ci s'opère rapidement. [OZENDA et BOREL 1990 ; HALPIN 1994³²]. De nombreux travaux [COOK et al 1996 ; HUNT et DAVIS 1997 ; HUNT 1998] établissent la relation entre la modification rapide des milieux naturels et le changement climatique.

Pour l'espèce humaine, ces mécanismes risquent de produire des situations complexes parce qu'indirectes. Il ne s'agit pas de difficultés liées à la valence écologique de l'espèce humaine mais plutôt de la conséquence de la faiblesse de valences écologiques relatives à des espèces importantes de notre chaîne alimentaire. Des famines peuvent se déclarer dans certains pays du Sud parce qu'une espèce végétale ou/et animale, base alimentaire de la population, ne trouve plus de conditions satisfaisantes pour croître jusqu'à la maturité.

Des maladies à vecteur (Dengue, Paludisme, West Nil...) peuvent se développer dans des pays du Nord et causer des ravages parce que les vecteurs (moustiques, parasites...) trouvent de nouveaux espaces favorables à leur développement. Des espaces entiers propices à une activité humaine peuvent donc devenir très difficiles à maintenir à cause d'un rapport sans cesse plus élevé entre le coût de traitement et des résultats acceptables pour la vie humaine.

³¹ La science de l'adaptation d'une espèce vivante à son environnement

³² *Latitudinal Variation in the potential response of mountain ecosystems to climate change* in : Mountain environments in changing climates pp 180 - 203

1.3.2.3 Le CO₂ perçu comme un bonifiant du potentiel végétatif

Il convient toutefois de souligner l'existence de deux facteurs relatifs au changement climatique qui viennent pondérer, bien que l'on en distingue mal la portée, les impacts négatifs sur le milieu naturel.

– Sur le plan global, le réchauffement peut rendre exploitable des espaces qui actuellement ne sont pas ou peu utilisés par l'homme ou les espèces naturelles. Des projets d'exploitation de la Taïga sont émergents. Le fait n'est pas nouveau. Les Vikings ont conservé par exemple des comptoirs au Groenland³³ jusqu'au XIV^{ème} siècle.

– Sur le plan local, la question de la fertilisation naturelle du CO₂, ainsi que le fait qu'elle améliore les capacités photosynthétiques du végétal, prend ici une dimension intéressante. Des zones impropres à nombres d'espèces cultivées peuvent changer de statut et offrir des possibilités nouvelles pour l'agriculture. Des espèces peuvent s'adapter à des conditions nouvelles, habituellement moins favorables pour leur développement.

Ces éléments ne peuvent cependant s'envisager que dans un cadre global. C'est à dire dans une hypothèse coût/bénéfice pour l'ensemble des espèces concernées par la question. Cependant, quelle que soit leur situation spatiale, la réalité de notre monde parcellisé est différente. Compte tenu de la

manière dont sont redistribuées les richesses actuellement, l'analyse de ces hypothèses, en leur introduisant un effet spatial, semble plutôt indiquer une voie pour dresser les grandes lignes du futur géopolitiques à moyen terme que définir une stratégie actuelle pour permettre à l'humanité d'envisager sereinement le changement climatique.

La FAO a mené des études dans ces directions.³⁴ La conclusion de ces études montre que la production agricole sera modifiée fortement. Des régions à productivité forte verront une réduction massive de leur rendement (20 à 30%) et d'autres, marginales actuellement, pourraient voir des accroissements de productivité importants. La figure 1-11 offre une évaluation régionale des impacts sur le rendement sur la base des scénarios proposés par le GIEC et dans la perspective d'un doublement de CO₂ atmosphérique. La colonne « Impact sur le rendement » propose une fourchette de ces impacts en pourcentage. L'établissement des bornes minimales et maximales est parfois trop complexe à établir d'après la FAO. Dans ce cas, les auteurs ont indiqués une tendance (en hausse ; en baisse). Des précisions sur l'établissement de la gamme des valeurs des bornes sont rapportées dans la colonne : « Pays étudiés/Commentaires ».

³³ La signification littérale en Danois de « Groenland » est « terre verte ».

³⁴ Changement de climats et production agricole /chap 10 /FAO/1997/ Polytechnica

Région	Culture	Impact sur rendement (%)	Pays étudiés/commentaires
Amérique latine	maïs	-61 à la hausse	Argentine, Brésil, Chili, Mexique. La gamme est donnée pour différents scénarios du GCM, avec et sans effet du CO ₂
	Blé	-50 à -5	Argentine Uruguay, Brésil. La gamme correspond à différents scénarios du GCM, avec et sans effet du CO ₂
	soja	-10 à +40	Brésil. La gamme correspond à différents scénarios du GCM, avec effet du CO ₂
Ex-URSS	blé grain	-19 à +41 -14 à +13	La gamme est donnée pour différents scénarios du GCM et régions, avec l'effet du CO ₂
Europe	maïs	-30 à la hausse	France, Espagne, Europe du Nord. Avec adaptation, effet du CO ₂ Plus longue saison culturale; perte d'efficacité d'irrigation; décalage vers le nord.
	blé	hausse ou baisse	France, Royaume-Uni, Europe du Nord avec adaptation, effet du CO ₂ .
	légumes	hausse	Plus longue saison: décalage vers le nord, plus grands dégâts dus aux ennemis des cultures moins de risque d'échecs dans les cultures
Amérique du Nord	maïs blé	-55 à +62 -100 à +234	Etats-Unis d'Amérique et Canada. La gamme comprend divers scénarios du GCM et sites avec/sans effet du CO ₂
	soja	-96 à +58	Etats-Unis d'Amérique. Impact moins sévère ou augmentation de rendement quand l'effet du CO ₂ et l'adaptation sont considérés
Afrique	maïs	-65 à +6	Egypte, Kenya, Afrique du Sud, Zimbabwe. Avec effet du CO ₂ ; la gamme porte sur différents sites et scénarios de climats.
	millet	-79 à -63	Sénégal. La capacité de charge est tombée à 11-38%.
	biomasse	baisse	Afrique du Sud; décalage des zones agricoles.
Asie du Sud	riz	-22 à +28	Bangladesh, Inde Philippines, Thaïlande, Indonésie
	maïs	-65 à -10	Malaisie, Myanmar. Gamme sur différents scénarios
	blé	-61 à +67	du GCM, et sites; avec effet du CO ₂ ; certaines études prennent en compte l'adaptation.
Chine Continentale et Taiwan	riz	-78 à +28	Inclus le riz pluvial et irrigué. Effets positifs au NE et NW de la Chine, négatif dans la plus grande partie du pays. La variation génétique fournit les possibilités pour l'adaptation
Asie (reste) et la ceinture pacifique	riz	-45 à +30	Japon et Corée du Sud. La gamme comprend les différents scénarios du GCM. Généralement positive au Nord du Japon; négative au Sud.
	pâturage	-1 à +35	Australie et Nouvelle Zélande. Variation régionale.
	blé	-41 à +65	Australie et Japon. Large variation, dépendant du type de cultivar

Figure 1-11: Projections sur le rendement agricole dans un contexte de doublement du CO₂ atmosphérique

Source FAO 1997

L'analyse montre que la simple prise en compte de l'effet bonifiant du CO₂ n'est pas suffisante pour permettre une évaluation fine des impacts sur la production agricole. Celle-ci est en effet grandement tributaire des stratégies et des modes de cultures traditionnelles. La FAO s'interroge même sur :

« ...les modifications dans les pratiques de labour et d'irrigation, les plans de rotation, les cultures, les traitements et les récoltes des cultures qui auront probablement lieu dans les 100 ans à venir à cause de nombreux facteurs refléteront-elles les changements simultanés du climat ou bien les agriculteurs seront-ils incapables de détecter le changement de climat et échoueront donc à adapter ces systèmes, devenant ou restant mal adaptés aux conditions climatiques locales? S'ils s'adaptent aux conditions actuelles (mais ne peuvent pas regarder l'avenir avec confiance) de combien leurs investissements à long terme sera-t-il inadapté après 3, 5, 10 ou 20 ans de changements continus du climat? »³⁵

Quelle que soit l'action correctrice du CO₂, le phénomène de modification climatique se traduira cependant à l'échelle locale par une migration des écosystèmes, mesurable en plaine en centaines de kilomètres et en montagne en centaines de mètres [OZENDA ; BOREL 1991]. Ce déplacement exercera alors une action mortelle sur les espèces à l'échelle locale et sur la vie en général pour les raisons suivantes :

- Dans certaines zones, les espèces confinées comme celles que l'on

rencontre en montagne dans l'étage subalpin pourraient voir leur biotope se réduire comme peau de chagrin, avec pour effet de renforcer la compétition interspécifique. Cette question se retrouve aussi au niveau des zones agricoles qui subissent les mêmes mécanismes. Le coût en SAU et en pratiques culturelles de cette migration peut rapidement s'avérer très important.

- La vitesse de translation climatique pose la question de la capacité du végétal à compenser la migration de son biotope climatique par sa vitesse de reproduction et l'efficacité de sa diffusion spatiale. Les espèces à maturation lente et diffusion spatiale faible comme le chêne sont moins bien armés sur ce plan, particulièrement en plaine.
- Pour finir, la tendance au réchauffement risque très probablement de faire aussi migrer les phénomènes météorologiques vers des zones habituellement préservées, conjuguant sur un même espace les deux facteurs d'action mortelle : phénomènes physiques et translation des écosystèmes.

En zone de montagne, cette question de la variabilité et de la tendance prend une acuité évidente à la fois sur le plan du milieu naturel pour les raisons développées ci-dessus mais aussi au niveau économique. En effet, une grande part de l'économie montagnarde

³⁵ John REILLY / Chap 10

française repose sur le tourisme. La neige persistera-t-elle suffisamment longtemps dans la saison d'hiver pour assurer la rentabilité des domaines skiables ? Les mauvaises saisons peuvent-elles se multiplier ? Le poids de cette économie est-il si fort qu'une disparition, même lente de beaucoup de domaines skiables engendrerait un abandon massif de ces zones ? Quelles dynamiques et quelles forces seront en action sur ces zones particulières ? Mais aussi quelle relation au milieu naturel les acteurs du développement en montagne adopteront-ils ? Peut-on visualiser des espaces de conflits nature/économie ? La montagne telle qu'elle est vécue aujourd'hui en occident serait-elle une reproduction miniature de ce que l'on attend à l'échelon global ? A ce moment, elle pourrait devenir un laboratoire d'expérimentation pour le développement concerté, à condition de disposer d'outils adéquats.

Nous ne pourrions pas, à l'occasion de ce travail, répondre à toutes ces questions. Certaines d'entre elles dépassent largement le champ de la géographie comme la modélisation et la prospective climatique. Le recul scientifique nous manque pour quelques autres. Aussi, nous nous concentrerons sur la visualisation des effets possibles du changement climatique sur les domaines skiables dans la relation économie / environnement. Nous tenterons de mettre en évidence les espaces où la contradiction dans l'usage de l'espace risque d'engendrer des conflits entre les acteurs du territoire. Enfin, nous proposerons une démarche fondée sur la

représentation immédiate et interactive en réalité virtuelle de ces espaces de conflits dans le but de converger vers un compromis opérationnel entre tous les acteurs à travers un modèle de simulation.

Pour cela, nous devons établir dans un premier temps, deux images de la montagne française. La première brosera un état de la structure du tourisme au sein de la société montagnarde. La seconde abordera l'aspect naturel du milieu montagnard dans ses aspects écologiques mais aussi sur un plan social et idéologique.

1.4 L'économie du tourisme en montagne : moteur du développement

Afin de comprendre l'enjeu du changement climatique sur le tourisme en montagne, nous allons, dans les pages qui suivent, broser un panorama de son poids sur le milieu socio économique, à la fois sur le plan global et local ; Nous éclairerons plus particulièrement le cas du tourisme lié aux sports d'hiver car c'est sur cette catégorie du tissu économique que se concentrent les interrogations relatives à l'évolution du climat, ce qui correspond à une grande partie du sujet de cette thèse.

La France est toujours une destination majeure en matière de tourisme mondial, la plupart du temps en première place devant l'Espagne et les Etats-Unis. En 1998, le poids économique du tourisme était de 93.37 Milliards d'Euros pour la consommation touristique intérieure.³⁶

³⁶ La consommation touristique intérieure regroupe les dépenses faites auprès des activités caractéristiques marchandes de l'industrie touristique en incluant en sus, l'hébergement

En 1999, L'Organisation Mondiale du Tourisme (OMT) lui affectait 6.8% des recettes mondiales³⁷. En 2001, la France conserve cette première place mondiale. Les retombées financières de ce poste se comptent en milliards d'Euros³⁸ et font vivre une part de la population active en France. Avec l'évolution du temps de travail, ce poids économique ne pourra que se renforcer. Le tourisme en France sera sans doute un vecteur économique de première importance dans les années à venir, particulièrement dans les espaces où l'agriculture classique est fragilisée par les effets de la mondialisation.

Parmi toutes les destinations possibles en France, les séjours ne se répartissent pas de façon homogène. La campagne occupe la première place en 1998 avec 36.8% des séjours, suivent dans l'ordre les villes (35.9%), la mer (26.4%), la montagne (15.4%) et les lacs (4.1%) selon le SDT.³⁹ Le total de séjours est supérieur à 100% à cause du mode de définition de la notion de séjour⁴⁰ donnée par l'Organisation Mondiale du Tourisme (OMT) qui autorise la fréquentation de plusieurs espaces pendant le temps des vacances.

privatif, l'alimentation, l'achat de biens durables, l'achat de biens préalables aux voyages et la consommation de services touristiques non marchands./ Source : OMT/

³⁷ Mémento du tourisme/OMT

³⁸ 10 milliards d'Euros d'excédents pour la balance des paiements 1998

³⁹ SDT : Suivi des Déplacements Touristiques/ Mode d'enquête de la direction du tourisme et de la sofrés qui permet de suivre l'évolution des comportements touristiques de la clientèle française.

⁴⁰ Un séjour est défini comme le temps passé en un lieu fixe ou au cours d'un circuit comprenant au moins une nuit.

1.4.1 Le tourisme en montagne

Le tourisme en montagne ne se place qu'en avant dernière position en matière de séjours. Pourtant, ce poste est loin d'être négligeable tant sur le plan physique, qu'économique et social. La montagne française couvre 22,8% du territoire français⁴¹. L'INSEE recense sept massifs⁴², sur 46 départements, 6118 communes et 4 341 259 habitants concernés par la montagne.

Le tourisme a joué et joue toujours un rôle important dans le maintien de populations dans les hautes vallées montagnardes. Il faut souligner que ces hautes vallées montagnardes ont été durement marquées par un phénomène d'exode rural vers les grandes vallées en voie d'industrialisation. Les raisons de cette migration sont principalement économiques. D'une façon générale, on considère que le moteur de l'exode concernait la différence de niveau de vie entre villes et campagnes. Conjugué à une perspective d'emploi plus grande du fait de l'industrialisation, ce levier a joué à plein en montagne. Par exemple, la Haute Savoie offrait de l'énergie facile (la fameuse « houille blanche ») et la Savoie profitait depuis toujours de sa position de carrefour des Alpes. Chambéry, capitale historique en a tiré le plus grand bénéfice. Le phénomène d'exode rural en montagne a parfois été très important si rien n'est venu freiner ce mouvement. Il se perçoit encore fortement dans certaines régions. Ce cas se rencontre habituellement

⁴¹ Source : Association Nationale des Elus de la Montagne

⁴² Alpes du nord, Alpes du sud, Pyrénées, Massif central, Jura, Vosges, Corse

dans les Alpes et Préalpes du Sud (Diois, baronnies, arrière pays niçois). « L'invention »⁴³ des domaines skiables a permis le retour ou le maintien dans les hautes vallées de populations habituellement vouées au départ. Dans un premier temps, il s'agissait d'assurer un revenu secondaire aux agriculteurs pendant la saison d'hiver. Avec l'engouement des sports d'hiver, le ski a constitué un débouché économique à part entière. Il suffit de se rendre en Tarentaise pour s'en persuader.

Le Service d'Etude et d'Aménagement du Tourisme en Montagne (SEATM) comptabilisait 5 millions de lits touristiques sur l'ensemble de la zone montagne⁴⁴ en 1998 dont 2 millions pour les communes supports de domaines skiables.

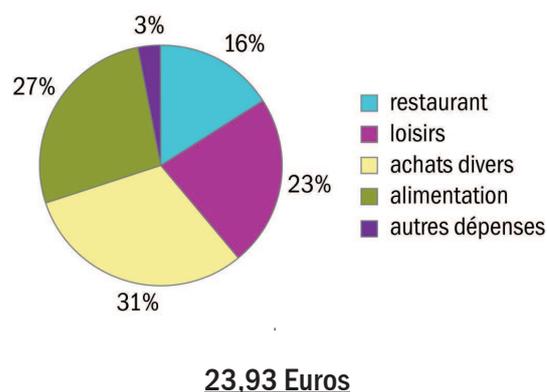
1.4.2 Retombées économiques globales du tourisme en montagne

La Direction du Tourisme, la Sofres et le SEATM ont mené en 1997 une enquête d'évaluation des retombées économiques de l'activité touristique en montagne. Les dépenses sur site (nombre de nuitées et dépenses journalières) ont été de 5 milliards d'Euros pour les français et 1.68 milliards pour les étrangers. La consommation touristique intérieure (l'ensemble des dépenses liées à un

⁴³ Dans le milieu économique lié aux sports d'hivers, Des personnages comme Jeannot Cathlin, l'un des premiers à avoir compris le développement du ski en sport de masse et à l'origine des premiers domaines comme Courchevel sont présentés comme des « inventeurs »

séjour touristique) a été de 9.15 milliards d'Euros dont 4.11 milliards pour le seul tourisme de montagne en hiver.

Dépense journalière moyenne en hébergement non marchand par nuitée et par individus



Dépenses journalière moyenne en hébergement marchand par nuitées et par individus

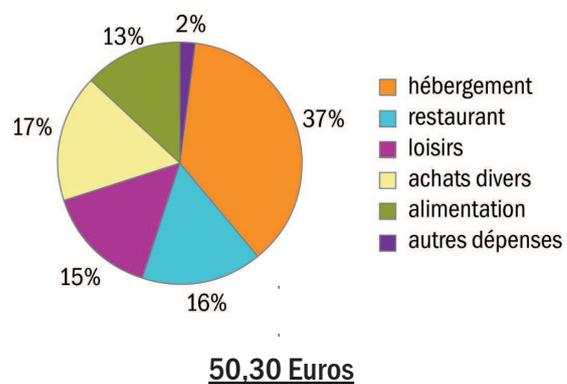
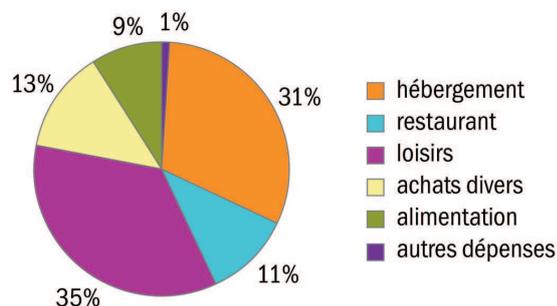


Figure 1-12 : Montagne sans ski (hors saison d'hiver et séjournants hiver non pratiquants) pour les courts et longs séjours.

Source : direction du tourisme – Bureau de la Statistique touristique

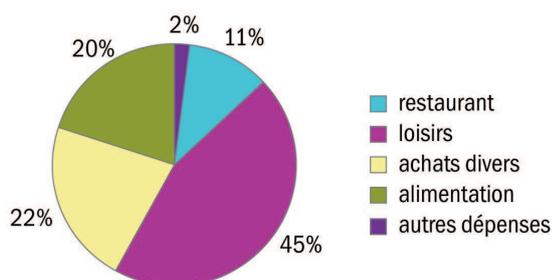
⁴⁴ la définition et la carte des zones de montagne est présenté en annexe

Dépense journalière en hébergement marchand par nuitée et par individu



66,92 Euros

Dépense journalière en hébergement non-marchand par nuitée et par individu



32,31 Euros

Figure 1-13 : Montagne avec ski pour les courts et longs séjours.

Source : direction du tourisme – Bureau de la Statistique touristique

La dépense moyenne journalière d'un français sur site était en 1998 de 50 Euros s'il ne pratiquait pas le ski et de 66 Euros dans le cas d'une activité de ski (forfait, matériel...).

La différence journalière entre la saison d'hiver et la saison estivale est d'un peu plus de 16 Euros par individu dans le cas d'un hébergement marchand et de 10 Euros dans le cas d'un hébergement non marchand. Cette première analyse montre déjà l'effet d'attraction économique exercé par les activités touristiques liées à la neige. La couverture nivale revêt donc une dimension stratégique importante pour le tourisme en montagne car sa survenue conditionne le chiffre d'affaires.

1.4.3 L'emploi lié aux activités touristiques en montagne

Le rapport Vila en octobre 1997 indiquait que « les déclarations annuelles des données sociales recensaient 1 220 000 personnes ayant reçu un salaire en 1992 dans les activités caractéristiques du tourisme. » L'emploi salarié et non salarié dans le tourisme concernerait donc directement et indirectement (compte tenu des emplois induits) environ « 2 millions de personnes dont les deux tiers de façon saisonnière. »

Pour la montagne, une étude du CEMAGREF de 1992, jamais reconduite depuis, évalue à 128 500 le nombre de salariés toutes activités confondues et 120 000 ceux qui se situent dans les communes supportant des domaines skiables. Il n'y aurait donc que 8500 salariés dont l'emploi n'est pas en relation directe avec la présence d'un domaine skiable.

1.4.3.1 Profils professionnels du tourisme en montagne

On peut décomposer les types d'emplois liés directement au tourisme en montagne en trois postes :

- les remontées mécaniques et services des pistes ;
- les brevets d'Etat de moniteur ;⁴⁵
- les emplois traditionnels du tourisme (hébergement et restauration).

Pour le poste n° 1 le Syndicat National des Téléphériques de France (SNTF) a évalué pour la saison 1998/99 un total de 17 839 salariés des remontées mécaniques et des services des pistes. Les permanents sont 3546 et les saisonniers 14293.

Brevets d'Etats	Total des diplômés
Moniteur de ski alpin	15 438
Moniteur de ski de fond	1221
Moniteur d'escalade	587
Accompagnateur en moyenne montagne	6444
Aspirant guide	167
Guide	2084

Figure 1-14: Structure des brevets d'Etats

Source : Conseil supérieur des sports de montagne et SEATM

Pour le poste d'emploi n°2, le tableau ci-dessous montre une très importante sur-représentation des moniteurs de ski avec dans cette sous catégorie, un effectif très important de moniteurs de ski alpin. En fréquence cumulée, les moniteurs de ski représentent 0.64% de la distribution totale des brevetés d'Etats. On réalise sans peine que les

moniteurs exerçant une activité rémunérée en montagne sont essentiellement des professionnels de l'hiver avec 59% de représentation pour l'activité de ski alpin. Ici encore, nous voyons l'impact que l'activité du ski exerce sur le tourisme en montagne. Si l'on considère uniquement les professions où la neige exerce un rôle sur le revenu, cette proportion augmente encore car nous devons rajouter aux moniteurs de ski de fond et alpin, les guides et aspirants guides. Cette proportion passe alors à 70% du nombre total de moniteurs.

Il apparaît clairement que les brevetés d'Etat ont tendance à développer d'abord leur professionnalisation vers les activités d'hiver plutôt que vers celles d'été. La plus faible représentation des brevetés d'Etat liés aux pratiques estivales montre qu'une frange non négligeable de moniteurs de ski n'a pas d'activités pour l'été. Le tourisme estival n'exerce donc pas une attraction suffisante pour la majorité de cette profession dans le but de générer des revenus convaincants à la belle saison.

Certains salariés de cette branche travaillent cependant tout le long de l'année et cumulent plusieurs brevets d'Etat afin de compenser le caractère saisonnier des activités. Il est donc assez difficile d'obtenir une image précise de la structure économique de cette catégorie compte tenu de la multiplicité des profils individuels.

⁴⁵ Ce type de diplôme autorise son possesseur à dispenser des cours ou encadrer des groupes pour une activité physique précise en milieu naturel ou non. Il existe, par conséquent, des brevets d'état

pour la spéléologie, le ski, l'escalade mais aussi pour le judo, le fitness...

Enfin, le tableau donne un décompte total du nombre de diplômés depuis la création du brevet d'Etat concerné. Il faudrait nuancer ce nombre par les départs en retraite afin de connaître la quantité de brevets d'états réellement en activité pour obtenir un profil fiable de la profession. Les chiffres ci-dessus sont donc très probablement surévalués.

Les emplois traditionnels du tourisme (hébergement, restauration) intégrés au poste n°3 sont plus faciles à traiter compte tenu de leur intégration dans la nomenclature de l'INSEE, de la comptabilité du Syndicat National des Résidences de Tourisme (SNRT) et de l'UNEDIC. Le SNRT avance le chiffre de 2800 emplois pour ses résidences de tourisme pour la saison 1998. L'UNEDIC permet un calcul pour les hôtels qui établit le chiffre de 33250 emplois.⁴⁶

Au regard de ce que nous avons distingué ci-dessus, le tourisme de montagne en France reste très fortement lié aux domaines skiables et à la pratique du ski alpin, tant sur le plan de l'emploi que sur le volet économique. Dix Euros en moyenne sépare le prix d'une journée d'un touriste hivernal de celle de l'estivant.

Pour l'emploi, l'étude du CEMAGREF, pourtant ancienne (en 1992), montre que seulement 8500 emplois sur les 128 500 concernés par le tourisme en montagne n'ont pas de relation avec la présence d'un domaine skiable. Il apparaît clairement ici que les domaines

skiables sont des outils économiques majeurs en matière de développement touristique montagnard. L'essentiel de l'activité est assuré en hiver, ce qui implique une obligation de couverture neigeuse. Le changement climatique qui s'annonce risque donc à terme d'engendrer des soubresauts économiques importants dans ce secteur par réduction du manteau neigeux. Les domaines skiables, en orientant leurs capacités autour de la principale (et seule?) activité du ski alpin prennent aujourd'hui un pari risqué alors qu'ils occupent une dimension stratégique très importante en matière de développement local montagnard.

Quel est le poids du ski en France ? Comment l'industrie du ski s'organise t'elle ?

1.5 Le ski alpin en France : présentation du parc

La France est une destination majeure en matière d'activités de sports d'hiver à l'échelon mondial. La politique volontariste de l'état en matière d'aménagement des zones de montagne pour l'exploitation de « l'or blanc » a permis la mise en place d'équipements de ski très largement supérieurs en quantité à tous les autres pays concernés par le tourisme d'hiver.

Lors de la saison 1998/1999, il y avait en France 361 domaines skiables et centres de ski dont 218 avec au minimum cinq remontées mécaniques. Le parc de remontées en exploitation pour le ski alpin s'élevait à 4015 ce qui représente 670 millions de passages. Le SEATM estimait à 17860 le

⁴⁶ Ces chiffres ont été calculés par le SEATM sur la base de l'étude « les résidences de tourisme » : 1 emploi généré pour 32 chambres en résidence de tourisme ou pour 8 chambres en hôtellerie.

nombre d'hectares de pistes de ski et 161 sites étaient équipés de systèmes de production de neige de culture.

Les Alpes du Nord dominent largement ce bilan sur tous les plans. L'enveloppe totale des domaines skiables en Hectares est de 65 900

contre 29 800 pour les Alpes du Sud pourtant en seconde position. Le nombre de kilomètres de remontées mécaniques matérialise également cette disparité de façon assez impressionnante avec 1795 kilomètres pour les Alpes du Nord contre 562 kilomètres pour le suivant immédiat.

<i>Massifs</i>	<i>Zones de montagnes</i> Surface en Ha	Enveloppe Domaines skiables Surface en Ha	Pistes Surfaces en Ha	Longueur développée Des Remontées Mécaniques En KM
Alpes du Nord	1280 800	65 900	10 800	1795
Alpes du Sud	1859 300	29 800	3370	562
Pyrénées	1477000	10 200	2000	334
Massif- central	} 6 787 500	} 12 100	600	101
Jura			610	102
Vosges			480	81
TOTAL	11 404 600	118 000	17 860	2975

Caractéristiques principales des domaines skiables par massif

Figure 1-15 : Structure des massifs

Source : SEATM 2001

Les domaines skiables occupent 5,14% de la surface montagnarde des Alpes du Nord contre seulement 1,6% pour ceux des Alpes du Sud. Comme toute la surface située en zone de montagne n'est pas utilisable et comme le nombre de kilomètres de remontées est déjà très élevé pour les Alpes du Nord, nous pouvons supposer que les possibilités de développer de nouvelles zones skiables pour ce secteur sont faibles. En revanche, les mêmes raisons nous permettent de formuler l'hypothèse que le potentiel de développement de nouveaux espaces à ski n'a pas encore été totalement exploité pour les Alpes du Sud.

1.5.1 Le parc de remontées mécaniques

Ici encore, nous remarquons une très grande différence entre les massifs. (Figure 1-16) Les Alpes du Nord avec 57% du total du parc occupent la plus grande place. Cette différence augmente encore si l'on considère le débit des remontées avec 61% du débit total. Les plus gros appareils sont donc pour la plupart en Isère, Savoie et Haute Savoie. La Drôme, bien qu'étant rattachée au massif des Alpes du Nord, n'est pas concernée. Son parc se compose seulement de quatre petits domaines de ski alpin dont aucun ne possède de remontées mécaniques à grandes capacités.

1.5.1.1 Des installations anciennes en voie de modernisation

Enfin, la composition du parc français se révèle encore très largement dominée par les téléskis qui étaient 2951 en 1999 contre 940 télésièges fixes ou débrayables, 61 téléphériques, 138 télécabines, 12 funiculaires et 7 ascenseurs. La technologie des téléskis est maintenant assez ancienne. Les faibles débits proposés par ces remontées montrent que le nombre global de passages aux remontées peut encore s'améliorer. Le chiffre d'affaires total généré par cette activité peut donc encore progresser pour un taux d'équipements équivalents.

En 2001, l'accent est mis sur une modernisation du parc existant. La phase de conquête de nouveaux espaces marque le pas. Le paysage du ski français semble s'orienter principalement vers l'interconnexion des domaines entre eux. Le grand chantier de liaison entre les Arcs et la Plagne est, par exemple, caractéristique de ce mouvement. Le SEATM souligne d'ailleurs que « les installations nouvelles ne correspondent pas à des extensions mais à des restructurations de domaines skiables »⁴⁷.

La phase de conquête de nouveaux espaces pour l'activité du ski semble maintenant terminée. De ce point de vue, le paysage économique du ski français paraît aujourd'hui bien stabilisé. D'une façon générale, pour l'année 2001, des télésièges 4 et 6 places et un Funitel remplacent des installations anciennes (réalisées entre 1969 et 1985). La capacité de transport des domaines augmente

donc malgré la forte représentation des nouveaux téléskis réalisés. Ces derniers ne sont cependant pas mis en place dans un but de transport de masse. Ils servent plutôt à la desserte de zones dédiées à une activité particulière comme les « snowparcs » ou les accès « free ride ». La plus grande partie des investissements reste le fait de domaines assez grands, voire très grands, qui suivent un processus de modernisation de leur parc. Les domaines de moindre importance se contentent pour la saison 2001, d'organiser des modifications du parc existant pour une exploitation maximale de leur capacité. La disproportion enregistrée entre les massifs risque donc de se creuser encore dans les prochaines années puisque les Alpes du Nord concentrent la plupart des nouveaux investissements. Il est à craindre que la compétitivité des domaines à faibles capacités de transport soit fortement entamée surtout si elle se conjugue avec une réduction de la garantie d'un manteau neigeux suffisant pour pratiquer le ski tout au long de la saison. La plupart des domaines de moyenne montagne se trouvent dans cette catégorie. D'un point de vue systémique, nous identifions ici la mise en place d'une boucle de rétroaction positive dans un modèle imbriqué entre espérances climatiques et capacités financières.

⁴⁷ Bilan des investissements réalisés en 2001 dans les domaines skiables français /page 11

REMONTÉES MÉCANIQUES DES DOMAINES SKIABLES En France - 2001 - 2002

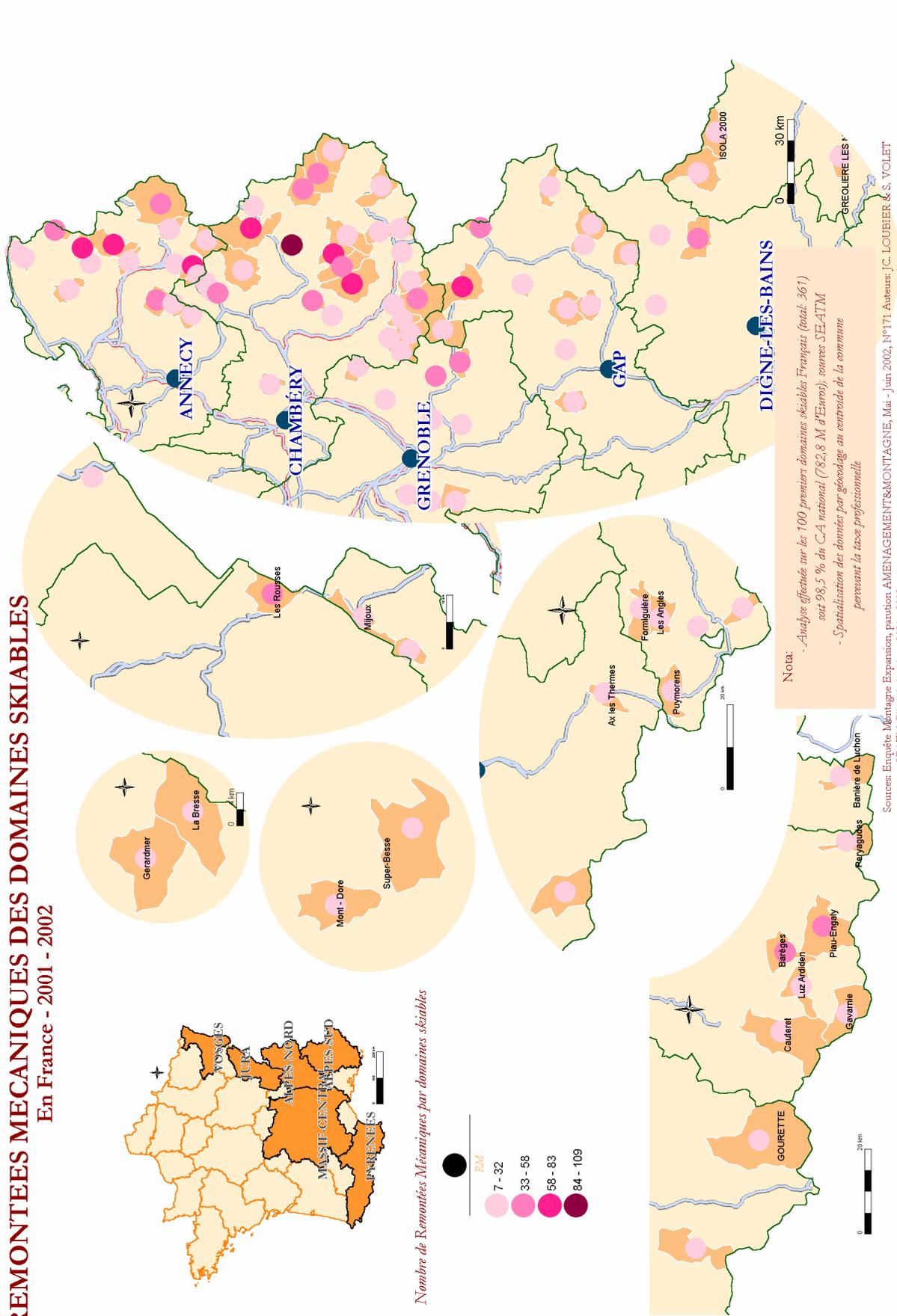


Figure 1-16: Carte des remontées mécaniques

1.5.2 La neige de culture

Compte tenu de la grande disparité économique entre la saison hivernale et la saison estivale, les domaines skiables doivent garantir au maximum une couverture nivale suffisante pour maintenir ce type de tourisme. L'investissement dans un réseau de production de neige de culture permet de garantir un enneigement minimal dans les périodes délicates du début et de la fin de saison. Il permet en outre de maintenir un « capital neige » tout au long de la saison.

C'est véritablement autour de la question de la neige de culture que se développent les conflits entre les gestionnaires d'un domaine skiable et les différentes associations de protection de la nature. Ces dernières reprochent à la technique de production de neige, un coût exorbitant en matière d'impact sur le milieu naturel. Dans le camp opposé, le recours à cette technique permet de consolider le chiffre d'affaires en réduisant les risques climatiques. Malgré les oppositions, on assiste depuis vingt ans, à une progression importante du nombre de domaines équipés et des investissements relatifs à la neige de culture (Figure 1.17).

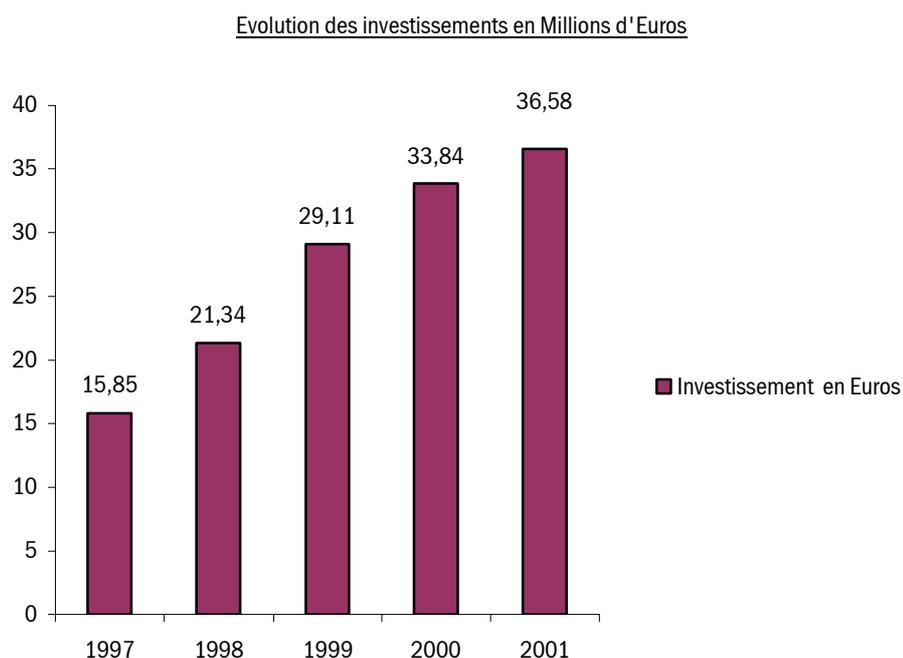


Figure 1-17: Evolution des investissements en neige de culture sur cinq ans

source : SEATM : Bilan des investissements dans les stations françaises de sports d'hiver. Année 2001

En 2001, les Alpes du Nord représentent 48% de l'investissement total. Les Pyrénées se situent en seconde position avec 35% puis les Alpes du Sud (14%) et enfin les trois massifs

restants : Vosges, Massif central et Jura se partagent les 3% restants.

1.5.2.1 La répartition des installations : une progression régulière à l'échelon national

Les exploitants de domaines skiables fournissent chaque année au SEATM des statistiques permettant d'évaluer la progression des installations de neige de culture dans chaque massif. A l'échelle nationale, cette dernière est régulière en nombre de domaines skiables nouvellement équipés (5 par an en moyenne.) Sur le plan des massifs, cette progression est variable, voire négative pour le Massif central. D'une façon générale, l'effort le plus important et le plus régulier concerne les Alpes du Nord avec 3 ou 4 nouveaux domaines équipés chaque année. La progression a connu un pic pour les Pyrénées (de 25 à 27 domaines) et les Alpes du Sud (de 31 à 37 domaines) lors des

saisons 1998/1999 et 1999/2000. Les autres massifs (Jura, Vosges, Massif Central) marquent le pas depuis 5 ans avec aucun nouveau domaine équipé.

En revanche, tous les massifs montrent, pour les systèmes déjà en place, une tendance nette à l'élargissement des surfaces enneigées artificiellement. Le total des espaces enneigés artificiellement est aujourd'hui de 3029 Hectares. A l'échelon des massifs, cela représente 59% du total des surfaces de pistes pour les Alpes du Nord, 20% pour les Alpes du Sud, 13% pour les Pyrénées et 8% répartis sur les trois massifs restants. Le caractère stratégique de la garantie de la neige que nous avons pressenti dans le volet consacré aux retombées économiques du tourisme en montagne est ici mis en évidence.

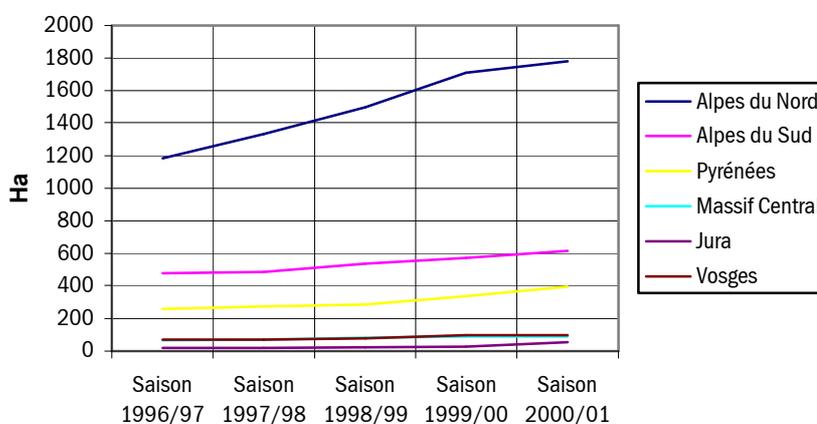


Figure 1-18: Nombre d'Ha enneigés artificiellement entre 1996 et 2001

Sources : SEATM / Bilan des investissements dans les stations françaises de sport d'hiver année 2001

1.5.2.2 Le fonctionnement et le coût des installations de neige de culture

Lors de la saison 2000/2001, les exploitants ont mené une enquête sur les domaines skiables équipés de système d'enneigement

artificiel. L'objectif était de dresser un bilan des modes de fonctionnement et des coûts attachés à ces systèmes. 45 domaines présents sur l'ensemble des massifs ont répondu au questionnaire soit 26% du total des individus pour 28% de la surface totale

soumise à l'enneigement artificiel. Les conclusions de cette enquête doivent donc être considérées avec retenue quant à leur généralisation à l'ensemble des domaines skiables. Cependant, ce travail reste le seul de ce type établi à ce jour et il apporte des indications intéressantes sur les coûts d'usage d'un tel système. Le SEATM a conduit l'analyse des questionnaires.

Sur l'ensemble de la saison, les installations ont fonctionné en moyenne pendant 544 heures. La répartition de fonctionnement sur l'ensemble de la saison est assez inégale et vient contredire (pour cette saison) les idées reçues en matière d'enneigement artificiel (voir annexe).

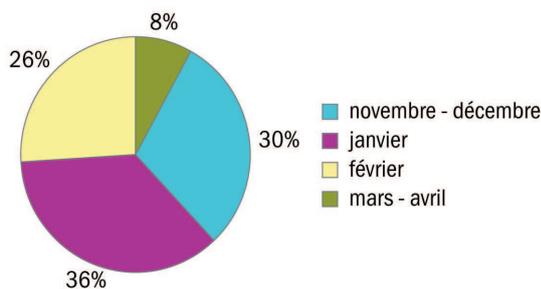


Figure 1-19: Répartition des heures de fonctionnement des systèmes d'enneigement pour la saison 2000/2001

Source : Bilan des investissements dans les domaines skiables français en 2001/ SEATM

62% de la production concerne la période janvier février pour seulement 30% en novembre décembre. La perception de l'usage d'un système de neige de culture se conjugue plus souvent avec un souci de garantir une couverture nivale aux vacances de Noël que comme un soutien du manteau. La raison principale de cette différence est expliquée par les conditions climatiques du début de saison qui n'ont pas permis de produire suffisamment

de neige. Il a donc fallu procéder à un rattrapage plus tard dans la saison et maintenir un niveau de fonctionnement minimal pour garantir la neige jusqu'à la fin.

- **La consommation électrique des installations sur l'hiver**

Les systèmes d'enneigement des 45 domaines étudiés ont consommé 13,8 Millions de kWh d'énergie électrique sur l'ensemble de l'hiver pour un fonctionnement moyen de 544 heures et 856 hectares enneigés »⁴⁸

- **Coût de production et de maintenance d'un couvert nival artificiel**

Il existe deux postes relatifs aux travaux de piste qui ont trait à la neige de culture: la production et le damage. Les domaines skiables ne distinguent pas le coût de chacun de ces postes et raisonnent, au niveau global, en neige « prête à skier ». L'enquête donne un coût au M³ de neige prête à skier, décomposé par poste, pour chaque système d'enneigement (figure 1-20 et 1-21).

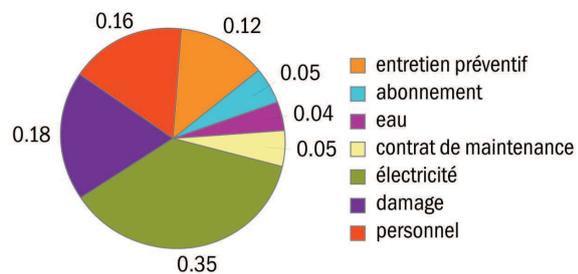


Figure 1-20 : Coût de production en Euros d'un m3 de neige par système bi-fluides

Source : bilan des investissements en 2001 /SEATM

⁴⁸ SEATM/ Bilan des investissements 2001 p32

Le coût total de production pour un M³ de neige prête à skier fournie par un système haute pression est de 0.93 Euros.

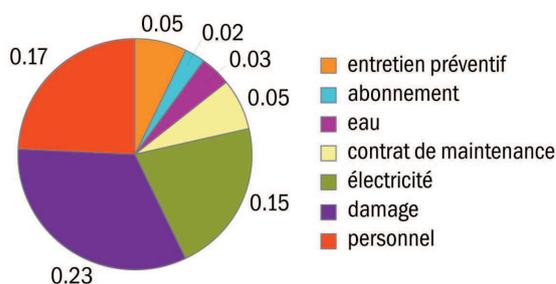


Figure 1-21: Coût de production en Euros d'un m³ de neige par système mono-fluide

Source : bilan des investissements en 2001 /SEATM

Le coût total de production d'un M³ de neige de culture fabriquée par un système mono fluide est de 0.69 Euros et la moyenne du coût de production d'un M³ de neige s'établit à 0.81 Euros. La technologie de l'enneigement par ce dernier système est donc plus économique que par celle du système haute pression.

L'enquête donne encore quelques informations d'ordre descriptif. Au cours de la saison 2000 / 2001 les enneigeurs ont produit 4 870 000 M³ de neige. Dans l'ensemble, une heure de fabrication de neige de culture est de 161 Euros.

Bien que cette enquête n'ait pas porté sur l'ensemble des exploitants disposant d'un système d'enneigement, nous remarquons que le coût de fonctionnement est important. Seuls les domaines skiables aux chiffres d'affaires considérables peuvent compter sur l'emploi systématique d'un réseau d'enneigement artificiel en cas de conditions climatiques défavorables.

1.5.3 Le chiffre d'affaires des domaines skiables

L'étude de la saison 1998/99⁴⁹ des domaines skiables montre une grande inégalité dans la répartition du chiffre d'affaires : 5 domaines réalisent 25% du chiffre d'affaires de l'ensemble des remontées mécaniques de France (Courchevel-Méribel Mottaret, La Plagne, Val Thorens, les Arcs et Val d'Isère), 13 domaines en génèrent 50% et 40 domaines suffisent pour établir 75% du chiffre. Il reste donc 321 domaines pour les 25% de chiffre d'affaires restants. Cela montre un fait souvent masqué par les très grands domaines skiables. La plus grande part des domaines skiables français sont petits ou très petits⁵⁰.

Cette inégale répartition du chiffre d'affaires est aussi visible à l'échelle des massifs comme le montre les figures 1-22 et 1-23.

⁴⁹ Le chiffre d'affaires des domaines skiables n'est pas étudié systématiquement. La saison 98 99 est, à ce jour, la dernière saison de référence au travers du fascicule technique : les chiffres clés du tourisme de montagne en France / 2^{ème} édition / Ministère de l'équipement, des transports et du logement : Secrétariat d'Etat au tourisme. La société Montagne expansion réalise une étude des chiffres d'affaires chaque année mais elle ne porte que sur les 100 premiers domaines

⁵⁰ Le chiffre d'affaires est corrélé aux capacités en remontées mécaniques des domaines

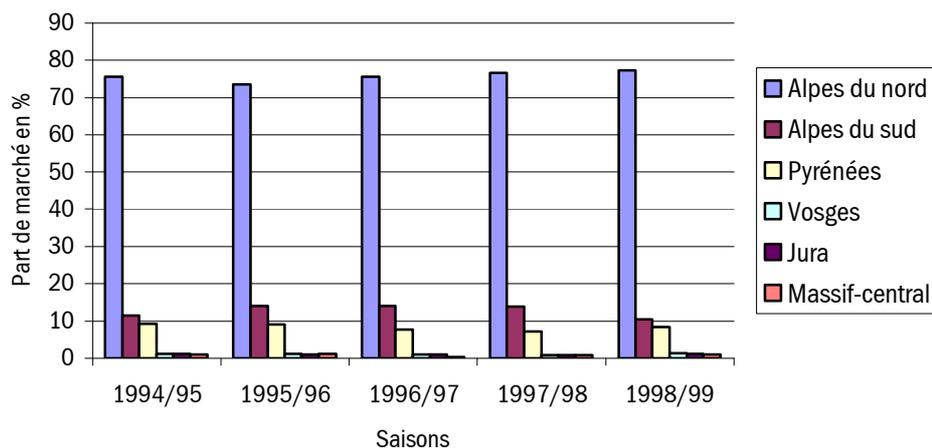


Figure 1-22: Part de marché des massifs en %

Sources : SEATM

Les Alpes du Nord sont extrêmement dominants. Ceci s'explique par deux raisons principalement. Elles ont un niveau d'équipement (en quantité et en débit) très supérieur aux autres massifs et elles concentrent de surcroît les domaines les plus importants comme nous l'avons vu plus haut. Cette influence est donc principalement mécanique, les grandes capacités techniques engendrant des chiffres d'affaires nécessairement élevés. L'étude du bilan des investissements dans les domaines skiables faite chaque année par le SEATM et le Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés pour le compte de la direction des transports terrestres montre que cette disparité ne s'infléchit pas avec 69% du total des investissements faits en 2001 contre seulement 9% pour les Alpes du Sud. Le cas éventuel d'une mauvaise saison pour ce dernier massif qui pourrait expliquer la faiblesse des investissements est à rejeter car les Alpes du Sud ont réalisé la meilleure

saison de tous les massifs en 2001⁵¹. Il faut donc chercher ailleurs les raisons d'un tel différentiel entre les deux grandes zones du ski françaises.

L'hypothèse qui nous semble la plus probable pour expliquer cette disparité concerne la typologie des domaines présents sur les deux massifs. Les plus grands domaines des Alpes du Sud sont finalement très loin d'égaliser les seuls grands domaines de Tarentaise. Leurs capacités financières étant à l'échelle de leur taille, nous retrouvons ici l'effet d'attraction exercé par la disproportion d'équipements entre les massifs.

⁵¹ Bilan des investissements dans les domaines skiables français en 2001/

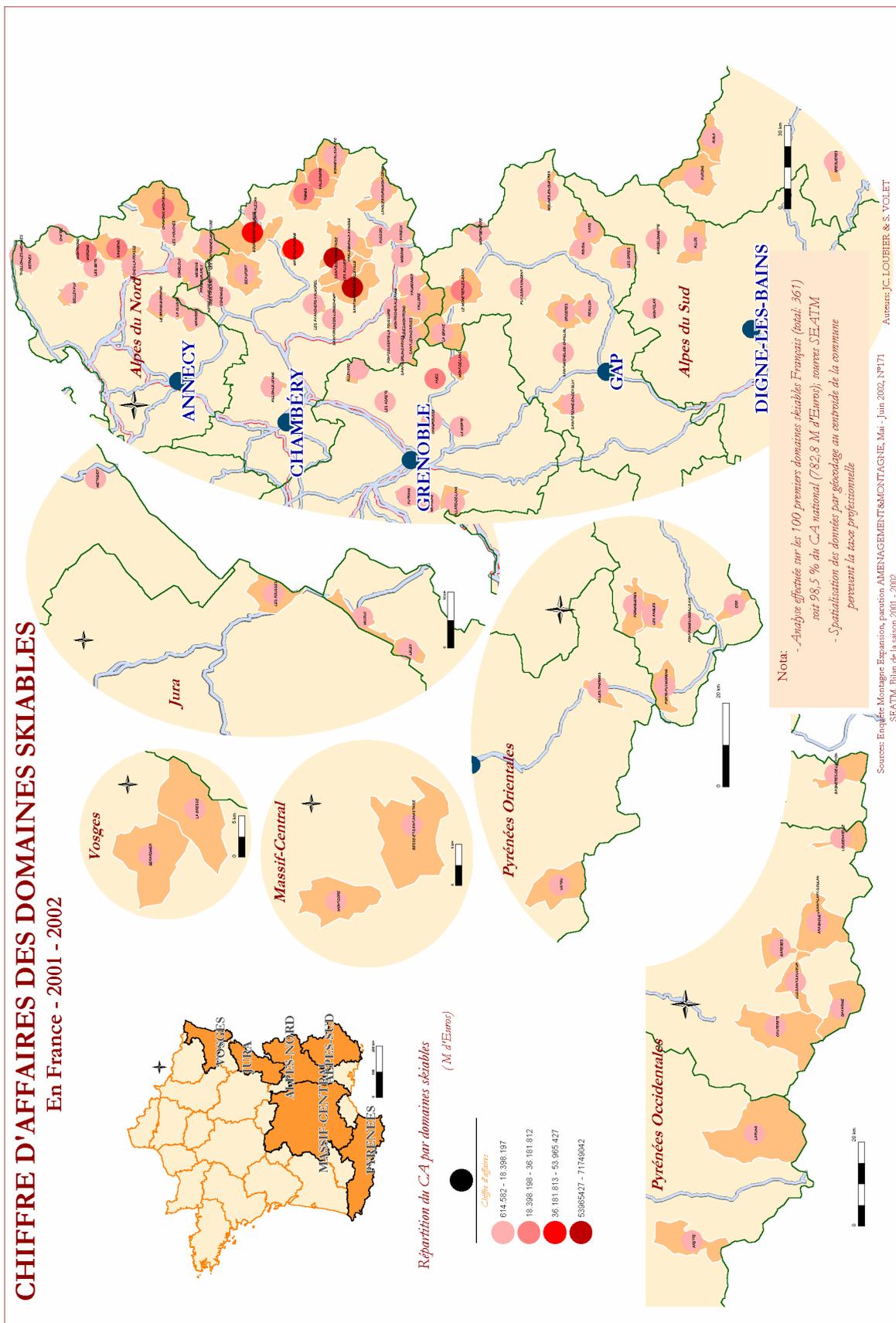


Figure 1-23 : carte du chiffre d'affaires des domaines skiables en France

Le paysage économique des domaines skiables est maintenant défini. Sur un plan global, les Alpes du Nord captent la majorité du marché. Cependant, certains massifs peuvent encore développer leurs capacités alors que la Savoie et la Haute Savoie, principaux départements captant le ski de masse, semblent avoir atteint leurs capacités d'exploitation maximales. Sur le plan local, les domaines constituent toujours un avantage économique dans des espaces généralement faiblement compétitifs. Le chiffre d'affaires s'établit principalement avec les activités touristiques d'hiver. L'été n'y intervient finalement que de façon marginale. Sur le plan de l'aménagement, les grands domaines ont engagé un mouvement de modernisation de leurs parcs et un renforcement de leurs capacités de transport. La neige de culture se développe de façon importante mais elle ne concerne que les domaines avec des capacités financières considérables.

Il existe donc **une activité économique du ski à deux vitesses** : celle des grands domaines avec une croissance en aménagement et en valeur importante et celle des petits domaines faiblement rentables qui ne peuvent suivre l'évolution technologique réclamée par la pratique du ski moderne. Pour ces derniers, il serait intéressant de situer ceux dont la présence conditionne le maintien d'un tissu socioprofessionnel local.

Nous nous sommes intéressés jusqu'à présent aux domaines skiables sur un plan strictement économique. L'un des problèmes majeurs de la mauvaise image environnementale des domaines skiables concerne leur impact sur le milieu naturel. Ces impacts concernent les

concentrations de populations avec les problèmes qui leur sont liés (gestion de l'eau, évacuation des déchets). Le recours à la neige de culture de façon massive représente aujourd'hui un autre de ces impacts. Les associations écologiques s'engagent fortement sur ce point. Cependant, elles semblent uniquement considérer que la pollution est liée à la production de neige de culture. L'impact réel sur le milieu est pourtant plus important pour les travaux de pistes (nécessaires à la mise en œuvre d'un système de production de neige de culture), particulièrement dans les opérations de reverdissement. Nous touchons ici au cœur de notre problématique. Il convient donc de présenter les différentes phases relatives à l'entretien des pistes d'un domaine skiable. Ce chapitre assurera le lien vers la seconde partie de la première phase de notre thèse. Il s'agira alors de présenter le milieu naturel montagnard.

1.6 Entretien des domaines : le travail des pistes

Les domaines skiables engagent chaque été des travaux considérables. Ces derniers sont liés principalement au renouvellement des remontées mécaniques et aux stratégies de conservation de la neige. L'objectif poursuivi est l'optimisation la skiabilité⁵² pour un nombre de skieurs en croissance. En effet, le domaine skiable est un outil en interaction. L'augmentation des flux montants (par

l'augmentation du débit des remontées mécaniques) implique une mise à niveau des pistes pour l'évacuation d'un nombre de skieurs en augmentation. Le résultat pratique consiste en un travail de reprise des pistes pour les élargir, en corriger les profils, voire en créer de nouvelles.

Dans un autre registre, la fabrication de la neige est une opération coûteuse en eau et en énergie. Une piste végétalisée permet de réduire la durée de production en autorisant le damage dès que quelques centimètres de neige seront produits. Or, c'est précisément sur la question du travail des pistes que se développe le problème de l'impact des domaines skiables sur le milieu naturel. Les associations écologiques mettent en avant l'artificialisation très importante du site et les risques de pollution que cela engendre. Ce chapitre représente donc la pierre d'achoppement entre les deux visions du territoire (économie / environnement). Nous avons donc cherché à montrer les enjeux relatifs à l'entretien des pistes.

1.6.1 Les interventions sur le milieu : un impact important

L'un des principaux objets de conflit entre les domaines skiables et les associations écologiques concerne les interventions sur les pistes. D'un point de vue paysager, les pistes non végétalisées déchirent le paysage, particulièrement sur substrat siliceux.

D'un point de vue écologique, ces travaux s'exercent sur des écosystèmes fragiles dans un milieu agressif et peu soumis à l'action anthropique. Les impacts sont donc forts en matière d'érosion, de paysage et de durée de retour à la végétation d'origine. [DINGER 1997]

Dès 1978, des recherches ont été engagées pour réduire ces impacts et proposer des méthodes de travail adaptées aux contraintes du milieu. Ces contraintes sont bi-modales : celles qui concernent le milieu naturel et celles qui sont relatives au chantier proprement dit.



Figure 1-24: Exemple de pistes non végétalisées sources

[DINGER 1997]

⁵² garantie de pratique dans un contexte confortable et sécurisé

1.6.1.1 Les contraintes du milieu naturel

Le sol représente le premier facteur de contrainte. En montagne, ce sol est fragile, souvent squelettique et peu évolué. Il a une genèse très longue et reste sensible à une perturbation. Si la végétation (qui exerce un rôle fixateur) est détruite, un processus de dégradation par érosion se met en place. A la fin des travaux, ce processus a généralement décapé le sol jusqu'à la roche mère. Il convient donc de recueillir soigneusement les premières couches⁵³ (horizon A) au début de l'intervention en vue d'une revégétalisation.

Le second facteur de contrainte concerne les conditions bioclimatiques. Ces conditions sont connues et répondent aux caractéristiques de la zone 8 des 9 zones bioclimatiques qui partagent la France. Cependant, les conditions climatiques et la topographie locales seront déterminantes dans la stratégie de reverdissement. La stratégie d'intervention doit par exemple se faire impérativement hors de la période estivale pour réduire les pertes en eau des végétaux consécutives au rayonnement solaire.

Enfin, il convient de bien connaître le couvert végétal en place. C'est à dire l'écologie des espèces, des séries et de leur dynamique. La stratégie de reverdissement n'est pas de reconstituer immédiatement le couvert végétal tel qu'il se présentait avant les travaux mais de parvenir à ce résultat en plusieurs années (qui peuvent se compter en dizaines parfois). Cela réclame donc un travail d'entretien régulier avec des apports en engrais.

⁵³ Cette couche du substrat est appelée terre végétale. C'est à dire la couche superficielle du sol, enrichie en matière organique.

1.6.1.2 Les contraintes techniques

Ces contraintes concernent l'environnement physique du chantier. Il s'agit de travaux de terrassement effectués sur des terrains en altitude et au relief accidenté qui réclament des compétences particulières. Le coût des travaux est donc considérablement augmenté par rapport à ceux qui sont accomplis en plaine. Les opérations préalables aux interventions sont également des travaux en soi comme la réalisation d'une piste d'accès au secteur, le drainage profond du site et la construction de pièges à pierre.

1.6.2 Les travaux effectués sur les pistes en vue d'un reverdissement

L'objectif principal sera de préserver au maximum le sol naturel car son réemploi réduit le recours à des apports extérieurs. Les travaux commencent donc par un décapage et un stockage de la terre végétale. Cette opération doit se conduire avec le plus grand soin. Une terre mal stockée se détériore, principalement par manque d'oxygène. Ces travaux ont un coût assez important de l'ordre de 0.55 Euros hors taxes le m². Généralement les travaux sur les pistes couvrent des surfaces assez considérables et il n'est pas rare de décapier des surfaces de 30 000 m². Pour une telle surface, ce premier poste s'élèverait à 16 500 Euros hors taxes par rapport au prix au m² donné ci-dessus.

Les opérations de terrassement peuvent alors commencer. Des volumes de 40 000 m³ sont manipulés assez fréquemment. Les entreprises qui réalisent ces travaux sont

généralement payées au m³ déplacé. C'est la raison d'un prix donné au m³. Pour un terrassement en montagne, le prix d'un m³ varie autour d'une valeur médiane de 4,60 Euros hors taxes. Pour un volume de 40 000 m³ le prix se stabilise à 184000 Euros hors taxes.

Les opérations suivantes concernent la lutte contre le ruissellement superficiel. Des revers d'eau sont donc construits en travers de la piste pour évacuer les eaux de précipitation. Des distances de l'ordre de 1800 m linéaire (pour l'ensemble) sont couramment réalisées pour un prix médian de 5.40 Euros hors taxe.

Le travail de terrassement et les opérations de drainage réalisés, on peut démarrer les démarches de reverdissement. Le semis interviendra après la reconstitution du substrat. Le sol montagnard après les travaux n'a plus les caractéristiques nécessaires pour permettre aux espèces végétales de perdurer. La fraction vivante du sol a disparu et il faut également la reconstituer. L'intérêt de préserver la terre végétale prend ici tout son sens. Cependant, des amendements organiques sont toujours requis. Les deux raisons principales de ces amendements sont : la contribution à la formation du complexe argilo-humique qui stabilise la structure du sol et la reconstitution d'une faune. C'est ici, qu'à notre sens se développe l'un des principaux conflits entre les acteurs de la protection du milieu montagnard et les aménageurs de domaines skiables. Parmi ces amendements, la filière de la valorisation des déchets issus des stations d'épuration des eaux usées, est régulièrement employée dans la reconstitution du sol. Cette méthode a été

fortement développée lors de l'organisation des jeux olympiques d'hiver d'Albertville en 1992. Il existe des risques à l'usage de ces boues. Trois types de polluants sont présents : les éléments-traces métalliques, les germes pathogènes et les polluants organiques.

- Les élément-traces⁵⁴ sont des toxiques majeurs des écosystèmes. On retrouve dans les boues du cadmium, du cuivre, du zinc, du nickel, du mercure, du chrome, du plomb et du sélénium.[DINGER 1997] La norme AFNOR NFU 44-041 définit les teneurs maximales admissibles.
- Les germes pathogènes présents dans les boues sont des bactéries (coliformes et streptocoques fécaux, salmonelles), des virus, des champignons et des oeufs de parasites. (nématodes, cestodes et trématodes). Les boues peuvent subir des traitements de désinfection qui éliminent en partie les germes pathogènes mais la désinfection reste facultative car on considère que les chances de prolifération sont faibles après épandage.
- La question des polluants organiques reste faiblement documentée et les travaux concernant ce type de pollution n'ont pas encore été évoqués pour les boues épandues en altitude.

Quand le sol est préparé, on peut passer aux opérations de semis. La période la plus

⁵⁴ La notion d'élément-trace définit des toxiques qui agissent à faible dose de façon cumulative

favorable est l'automne. On constitue le mélange en fonction des caractéristiques de vitesse d'installation, d'agressivité des espèces dans la compétition interspécifique, de couverture du sol et de pérennité dans des conditions climatiques particulières.

Les espèces végétales utilisées pour la végétalisation des pistes de ski seront

uniquement des herbacées dont la présence favorisera la rétention du sol et de la neige. Elles doivent aussi favoriser le retour de la population initiale. Dinger [DINGER 1997] remarque que seulement 6 espèces différentes constituent le mélange utilisé à 97% pour la revégétalisation.

Ray Grass anglais	Fétuques rouges	Fétuque élevée	Paturin des prés	Fétuque ovine	Agrostide commune
37,20%	45%	9,40%	2,30%	2%	<1%
82,20%					
	93,90%				
		96,60%			

Figure 1-25: Type d'espèces utilisées pour l'engazonnement des pistes de ski

Sources DINGER 97

En 2001, le nombre d'espèces introduites lors des semis reste le plus souvent inférieur à 10. La diversité sera donc faible. Dinger [DINGER 2001] souligne l'importance, voire la nécessité de « trouver les moyens de favoriser le retour des espèces autochtones, qui sont les seules à garantir la richesse des milieux réhabilités, et donc leur stabilité. »

s'accompagne d'un matériau protecteur de type géotextile. Le gain en efficacité de prise pour le semi est indéniable [DINGER 2001] avec une production moyenne de matière sèche pour un m², de 10.80g hors géotextile contre 15.62g pour l'appareil racinaire et 32.81g hors géotextile contre 46.20g sous géotextile pour l'appareil aérien.

L'ensemencement actuel est réalisé la plupart du temps de façon mécanique à l'aide de la technique de l'hydroseeding⁵⁵. Dans les cas où la pente est importante (talus), le semis

1.6.3 Les résultats sur le terrain

On dispose maintenant d'un recul de 20 ans par rapport aux premiers sites aménagés. Sur le plan technique, la méthode de fertilisation s'est améliorée en ciblant mieux le type d'espèces à utiliser et le suivi dans le temps (entretien, engrais, ouverture au pâturage).

D'un point de vue qualitatif, il apparaît une dynamique régulière [DINGER 2001] en trois phases. Les graminées forment l'essentiel

⁵⁵ L'hydroseeding est un mode d'ensemencement par projection (un engin motorisé équipé d'une cuve et surmonté d'une lance). La cuve est équipée d'un système d'agitation pour assurer l'homogénéité du mélange. Ce dernier se compose d'eau (1 litre par m²), des graines (150 à 200 Kg par Hectares), un amendement organique (800Kg à 1 tonne par Hectares), un engrais (60 à 80 unités d'azote par Hectares) et un fixateur (cellulose 500 à 800 Kg par Hectares)

tapis de base sur le sol nu pendant les premières années. Le second temps concerne les espèces de légumineuses et natives qui étaient présentes dans le semis qui s'installent. Enfin, la phase de reconquête spontanée et progressive des espèces sauvages se met en place. On assiste alors la plupart du temps au développement d'une dynamique de végétalisation en cohabitation espèces semées / espèces sauvages.

Cependant, les résultats restent succincts à petites échelles. Pour que la dynamique de reconquête des espèces sauvages se mette véritablement en place, il faudrait que le milieu ne soit pas trop soumis à des agressions répétées. Or, chaque année, le travail de reprise des pistes implique une circulation,

des piétinements, voire des ouvertures de chemins d'accès sur l'ensemble du domaine. De surcroît, faute d'archivage cartographique efficace, il est difficile de retrouver les précédents lieux de reverdissement d'une année sur l'autre. Enfin, la technique du reverdissement utilise massivement des amendements comme des engrais et des boues de stations d'épuration, ce qui pose une question environnementale très forte, que les acteurs de la protection de l'environnement ne manquent pas de poser. A l'avenir, on peut supposer que le recours à la neige de culture sera massif. Le conflit entre partisans de la protection du milieu naturel et acteurs économiques du tourisme risque de se stigmatiser autour de cette technique car elle concentre tous les enjeux.

2 Le milieu naturel : quel intérêt pour les hommes ?

Nous venons de traiter le premier volet, relatif à la partie socio-économique du tourisme de montagne en relation avec le changement climatique. Nous allons aborder ici l'autre volet, qui concerne la question environnementale que ce changement pose en montagne. Nous éclairerons particulièrement le cas des montagnes ouest européennes.

La littérature relative au milieu naturel en montagne se révèle très importante. Les points de vue et les clefs d'entrées pour son analyse sont multifformes. Nous avons choisi de traiter ce volet en trois points. Le premier se borne à rappeler les composantes et la dynamique du milieu naturel en général et montagnard en particulier. Le lecteur déjà au fait de ces connaissances ne découvrira pas dans ce volet d'informations révolutionnaires. Cependant, nous introduisons ici la

plupart des concepts écologiques sur lesquels nous nous appuierons dans la partie finale de mise en œuvre opérationnelle. Le second point se veut plus original. Nous essaierons d'aborder le milieu naturel non pas comme un espace en soi mais plutôt à travers le regard de l'Homme. Nous chercherons à mettre en évidence les différences de perception du milieu, entre protection et conservation. Enfin, le dernier point brossera un état des impacts potentiels du changement climatique sur les milieux montagnards au sens large.

2.1 Structure, dynamique et typologie du milieu naturel

L'objectif de ce chapitre consiste à définir les contours scientifiques de caractérisation du milieu naturel sur lesquels nous nous appuyons pour construire notre analyse du milieu naturel en fonction du changement climatique.

Plusieurs points de vue scientifiques se développent sur l'étude des entités qui composent le milieu naturel montagnard ou

non. D'une façon générale, l'écologie abordera l'étude du fonctionnement interne des entités (taxons, écosystèmes, biomes..) et la biogéographie s'intéressera plus particulièrement aux raisons de la spatialisation de ces entités. En revanche, les outils mis en œuvre pour ces études sont souvent les mêmes dans les deux disciplines. Aussi n'établirons nous pas particulièrement de distinction de discipline dans les pages qui suivent. En effet, notre problématique se rapproche de la biogéographie par sa recherche des zones de répartition des micro écosystèmes mais les hypothèses de base que nous implémentons pour les déterminer relèvent de l'écologie. Par convention, nous conserverons ce dernier vocable pour désigner les différents volets de ces deux disciplines mis en œuvre dans notre démarche.

2.1.1 Approche écosystémique de l'étude des milieux naturels

On désigne par écosystème un ensemble d'espèces végétales qui partagent les mêmes conditions de vie et qui exercent une relation d'interdépendance. **L'écosystème est donc un système fonctionnel qui inclut un ensemble d'organismes vivants et leur environnement.** L'étude d'un écosystème passe donc par la prise en compte des biocénoses⁵⁶ et des facteurs abiotiques présents sur le site. L'écosystème est donc un outil de discrétisation destiné à appréhender plus facilement la complexité du milieu naturel.

⁵⁶ La biocénose est une communauté spatiale d'espèces qui présentent « des affinités pour un même milieu » : Ozenda / Végétation du continent européen P 4

C'est cette approche qui a été choisie par la convention de RIO pour l'étude et les travaux relatifs à la préservation de la biodiversité. Il s'agit donc d'en établir les contours de la façon la plus précise.

D'un point de vue spatial, on peut distinguer des écosystèmes à toutes les échelles, de la plus fine (une souche d'arbre) à la plus importante (la biosphère). On peut donc le considérer comme un instrument gigogne, ce qui renforce son intérêt dans l'étude du changement climatique sur le milieu à l'échelon local.

2.1.2 Fonctionnement et dynamique des écosystèmes

L'écosystème est un système ouvert. Pour maintenir son organisation et conformément aux trois principes de la thermodynamique, il doit consommer de l'énergie. L'usage de cette énergie permet la production de matière et assure sa stabilité dans le temps et dans l'espace. Cependant, un écosystème n'est jamais figé. Il possède une dynamique interne qui voit se succéder sur un même espace des groupements végétaux différents⁵⁷. Si un facteur externe ne vient pas perturber cette évolution⁵⁸, l'écosystème évolue vers un état culminant, stable à l'échelle d'une vie humaine, appelé climax. L'homme, par son

⁵⁷ Waguensberg souligne même dans l'Ame de la méduse : essai sur la complexité du monde que le signe dominant essentiel de la nature réside dans son caractère transitoire.

⁵⁸ Il est parfois difficile de définir véritablement une distinction entre facteur exogènes propres à la dynamique de l'écosystème comme l'incendie et facteur exogène indépendant de cette dynamique comme l'action anthropique, les deux étant parfois étroitement liés

action sur le milieu peut modifier cette dynamique soit par dégradation mécanique, soit par substitution de biocénoses. On parlera alors, pour les stades culminants de ces nouvelles dynamiques, de subclimax si l'état est proche du climax initial ou, de paraclimax dans le cas d'une déviation vers un état culminant différent. Une illustration de ces concepts est donnée au travers de la figure 1-10. Enfin, un dernier type de climax apparaît lorsqu'on étudie le milieu naturel à des pas de temps importants. Il s'agit du méta climax. Blondel [BLONDEL 1995] reprend les travaux de Loucks pour en proposer une représentation.

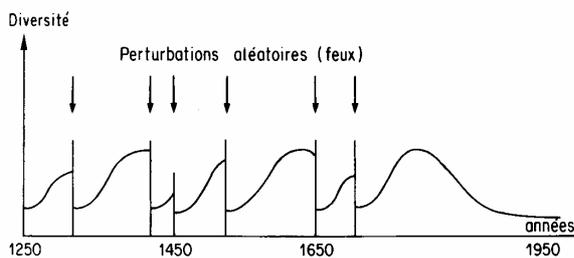


Figure 2-1: Méta-climax

Sources : Blondel 1995

Ce dernier type de climax pose directement la question de la conservation ou de la préservation. Il débouche sur une question idéologique que nous développerons dans le volet relatif au regard des hommes sur la nature et sur la notion de biodiversité.

La dynamique des écosystèmes est contrôlée par deux facteurs à l'échelle communautaire : la diversité des espèces et la quantité de biomasse produite par les espèces dominantes. Les espèces dominantes jouent

un rôle majeur dans la dynamique d'un écosystème car elles contrôlent le flux d'énergie. Les espèces rares conditionnent la diversité du peuplement. D'une façon générale, plus la diversité est grande, plus les liens entre les différents constituants d'une biocénose sont complexes. En effet, avec cette complexification des chaînes alimentaires, on observe un accroissement des cas de parasitisme, mutualisme, symbiose. Finalement, plus grande sera la diversité spécifique, plus nombreuses seront les possibilités de réaction entre les populations composant les peuplements, ce qui accroît la stabilité de l'écosystème concerné.

2.1.3 Typologie des formations végétales

Dans le cadre de l'approche écosystémique, on cherche à établir une classification sur des bases fonctionnelles et relationnelles. Les critères retenus sont :

- Les conditions prédominantes du milieu. C'est à dire si l'écosystème est aérien, terrestre ou aquatique,
- La quantité de biomasse et la production primaire,
- Les facteurs limitant cette biomasse,
- L'accroissement ou la réduction de matière, principalement sur la base de la sédimentation de la matière organique,
- Le rôle relatif des producteurs secondaires (comme les décomposeurs) et des

consommateurs primaires et secondaires,

- Enfin, l'action de l'homme sera également prise en compte.

L'usage de ces critères permet de classer les écosystèmes en grandes catégories, méga-écosystèmes (marin, terrestre...), macro-écosystèmes (par exemple, la forêt), méso-écosystèmes (par exemple, la forêt tempérée), micro-écosystème (par exemple, la forêt tempéré de l'étage montagnard) et nano-écosystème (par exemple, une mégaforbis de la forêt tempérée de l'étage montagnard). L'échelle écosystémique qui sera le support de notre travail en dernière partie, se situe au niveau du micro-écosystème.

Cette classification devrait normalement être utilisée pour les travaux relatifs aux impacts du changement climatique sur le milieu naturel puisqu'elle se rapporte aux écosystèmes. Cependant, et sur la base d'une classification internationale des formations végétales [GAUSSEN 1973], la plupart des informations relatives au milieu naturel se sont fondées sur des cartes « d'occupation du sol »⁵⁹. Cette typologie, plus adaptée au traitement par télédétection a permis la cartographie de zones immenses pour un coût acceptable. Certains amalgames se sont développés alors entre l'acquisition de l'information et l'écologie prise dans son assertion la plus scientifique. Il est évident que le fonctionnement et la dynamique des espèces ne peuvent

⁵⁹ CORINE LAND COVER est un exemple de ces cartes d'occupation du sol.

s'appréhender seulement à l'aide des informations spectrales de scènes proposées par les satellites.

Dans un contexte de modélisation des impacts du changement climatique au sein d'un environnement informatique, la communauté présente dans l'unité doit obligatoirement être prise en compte pour une évaluation correcte de la diversité. En effet, l'écosystème est contrôlé par sa diversité relative et sa production de biomasse. Une forêt ne peut pas se réduire à un espace où l'on rencontrera un grand nombre d'espèces ligneuses⁶⁰. Elle contient également une flore et une faune spécifiques de ce milieu qui participent à la dynamique de l'écosystème forêt. L'écosystème ne peut alors perdurer dans le temps et l'espace que si sa richesse spécifique se maintient dans des valeurs acceptables. Les facteurs écologiques agissent directement sur la variation de ces valeurs et conditionnent donc la dynamique globale de l'écosystème. Une grande partie de notre stratégie de mise en évidence des espaces de conflits potentiels entre écologie et économie repose sur ce concept de facteur et plus particulièrement sur celui de facteur limitant.

2.1.3.1 Les facteurs écologiques

Un facteur écologique est un élément du milieu qui influence une espèce ou une communauté. La température et les précipitations sont par exemple des facteurs écologiques majeurs. En pratique, un facteur

⁶⁰ La signature spectrale est celle du type de végétaux ou, dans les cas les plus précis, celle de l'espèce produisant la plus grande quantité de biomasse

écologique ne peut agir isolément sur un être vivant. Ce dernier est constamment confronté à une somme considérable et diverse de facteurs écologiques. En écologie, il existe une distinction entre les facteurs d'ordre abiotiques comme le climat et ceux d'ordre biotique comme le parasitisme ou la compétition entre individus de la même espèce. Chaque espèce, communauté, écosystème présente des limites de tolérance pour chacun des facteurs écologiques. On peut donc modéliser sur un intervalle précis les

optimums (les valeurs du facteur entres lesquelles l'espèce peut se reproduire), les tolérances et les valeurs létales. La capacité de conquête d'une espèce est directement liée à la grandeur de l'optimum harmonique des facteurs écologiques. Cette grandeur est appelée valence écologique. Nous en avons déjà expliqué les principes plus haut. Les espèces à valence écologique faible seront limitées dans leur expansion. Celles à valence écologique forte auront l'opportunité de coloniser de vastes espaces. (Figure 2-2). Il en va de même pour les écosystèmes.

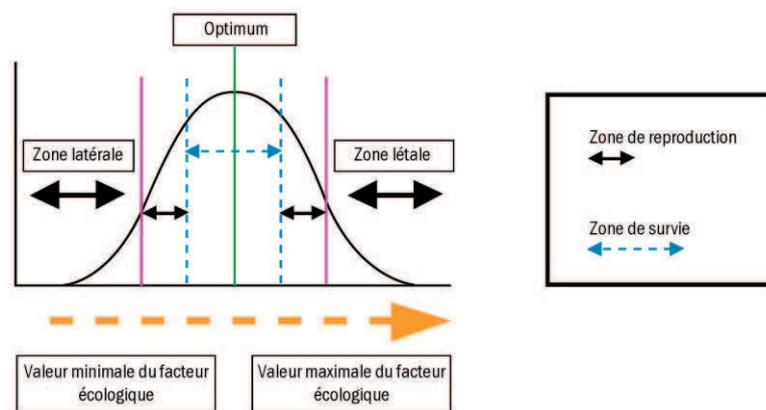


Figure 2-2 : Modèle de facteur écologique

• Le facteur écologique limitant

Un facteur écologique devient limitant pour une espèce ou un écosystème, quand sa valeur critique (minimum ou maximum) est dépassée. A ce moment, l'espèce ne peut plus survivre même si tous les autres facteurs sont favorables. L'importance du facteur limitant l'emporte donc sur tous les autres. Fondamentalement, l'identification du ou des facteurs limitant est déterminante pour traduire le phénomène de conquête de territoire d'une espèce. Non qu'il s'agisse

d'identifier les espaces où l'espèce ne peut pas vivre mais plutôt de mettre en évidence ceux où elle pourra se reproduire et pérenniser son implantation.

On comprend immédiatement la portée géographique de la notion de facteur écologique. Les températures et les précipitations sont des facteurs écologiques déterminants que l'on peut cartographier en SIG Raster. D'un point de vue spatial, ces facteurs peuvent se modéliser à travers une

fonction de type sigmoïde caractéristique de l'approche par ensembles flous par exemple. Il devient donc possible d'identifier, pour les écosystèmes, des zones d'optimum et de rejets sur la base de la théorie des facteurs écologiques.

Le volet d'identification des espaces potentiels de conflits économie / environnement que nous cherchons à mettre en évidence repose pour partie sur cette idée. En écologie, cette approche à connu un essor important avec l'essor de la théorie de la niche écologique. Cette notion a été développée sur le plan mathématique par Hutchinson en 1957. (Figure 2-3).

Il convient cependant de préciser un certain nombre de points concernant l'usage du modèle dans notre approche. La théorie de la niche écologique présente des limites importantes quand il s'agit de comparer les résultats du modèle avec l'observation du monde réel. Blondel [BLONDEL 1995] formule cinq critiques majeures relatives à cette théorie :

- L'aspect multidimensionnel de la niche est impossible à explorer simplement avec la seule théorie d'Hutchinson,
- Le caractère orthonormé des facteurs exprime une indépendance qui n'est pas représentative du réel,
- La niche est déterminée et invariante dans l'espace et dans sa population, ce qui est inexact d'un point de vue biologique,
- La théorie se place dans un environnement figé à un instant T perçu

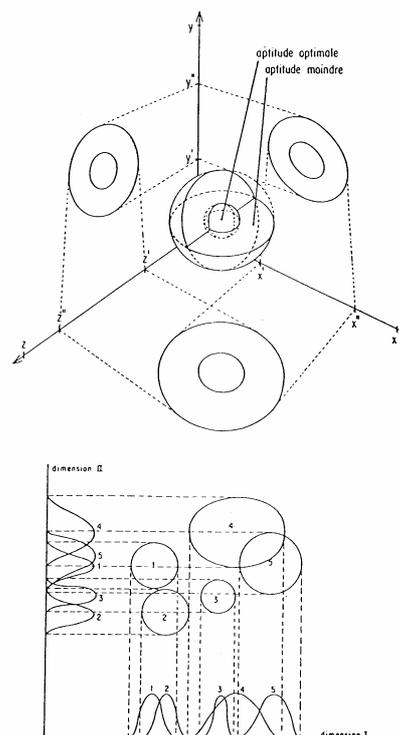


Figure 2-3: Modèle de niche écologique

Haut : Modèle d'hypervolume projeté dans un espace à 3 dimensions.

La sphère représente la niche écologique d'une espèce sur la base de trois facteurs écologiques

- Bas : Visualisation simultanée de la niche écologique de 5 espèces dans un espace 2D dimensionnel

Source : Blondel 1995 d'après Pianka 1974

comme indépendant, or l'histoire du peuplement est déterminante,

- Elle ne tient pas compte de la notion de niche vacante. C'est à dire qu'un peuplement puisse contenir davantage d'espèces que celles qui ont été observées.

Devant de telles critiques, nous devons préciser les conditions d'usage de cette notion à l'intérieur du cadre de notre projet.

Il ne s'agit en aucune manière de proposer une typologie des peuplements qui pourraient se

trouver sur notre champ en fonction du changement climatique mais bien de rechercher des espaces où les deux facteurs écologiques Température et Précipitation peuvent devenir limitant à tel ou tel type de micro écosystème (une forêt de feuillus de l'étage collinéen par exemple). **Il s'agit finalement d'un projet d'affinement du modèle des étages de végétation sur la base de l'occupation du sol habituellement rencontrée aujourd'hui dans des conditions identiques en température et précipitations.**

Préciser le contenu de ces zones mises en évidence, ne relèverait que de la pure spéculation car la présence ou l'absence d'une espèce ne se réduit pas simplement aux deux facteurs écologiques que nous avons choisis de traiter dans notre analyse⁶¹. Toutefois, ces facteurs restent déterminants pour la présence des types d'occupation du sol habituellement présents dans ces zones. Les espaces aux conditions climatiques différentes au moment T+N augmentent donc leur probabilité de se trouver colonisés par un autre type de végétation.

Si l'on considère que ce type de végétation correspond à un stade de l'évolution de l'écosystème, et si l'on connaît la succession de ces différents stades, il devient possible de reconstituer une chaîne de Markov à rebours pour « remplir » l'espace et le temps entre les deux bornes de notre simulation. Bien entendu, cela nous obligerait à considérer toutes choses égales par ailleurs, or, la littérature relative aux conséquences du changement climatique sur les écosystèmes

ne semble pas confirmer cette symétrie. [GIEC 1995 ; DIDIER et BRUN 1998]

Pour l'exercice, nous limiterons nos ambitions à l'utilisation du concept de niche pour l'identification d'espaces de conflits potentiels entre les besoins économiques et les soucis d'accompagnement des écosystèmes dans le contexte du changement. L'objectif de préservation de la biodiversité se place bien souvent dans un contexte de conservation des espaces importants du paysage, un alpage par exemple. Si cet espace est identifié en un lieu donné, comme fortement sujet à une modification (un conquête de la forêt sur l'alpage) ; Si, dans le même temps, celui-ci intéresse un domaine skiable pour des raisons tactiques relevant, elles aussi, du changement climatique ; alors, il devient automatiquement un espace de conflit en devenir.

Pour que notre projet prenne corps, il convient de définir un niveau étalon, une sorte de description formelle du milieu qui servira de référence. Le modèle des étages de végétations proposé par Ozenda s'y prête parfaitement.

2.1.4 Les écosystèmes de montagne : organisation spatiale et structure

Le modèle le plus souvent admis aujourd'hui pour donner une typologie des milieux montagnards est celui bien connu (Figure 2-4) des étages de végétation [OZENDA 1985 ; 1994] [RAMEAU et al 1993]. Ces derniers sont la représentation physique de l'influence du gradient de températures et de

⁶¹ Nous avons déjà discuté ce point d'achoppement en section 2.4.1.1

précipitations introduites par l'action du climat sur le site. Ce modèle connu sous le nom de modèle alpin propose cinq étages (collinéen, montagnard, subalpin, alpin et nival) dont le contenu biocénotique est aujourd'hui bien cerné.

Ce modèle général est « dégradé » par les conditions locales du climat, du sol et de la topographie. Cependant, la notion d'étage de végétation reste toujours fondée sur la répétition spatiale de trois critères :

- Les successions végétales des espèces forestières présentes au sein de ces étages sont caractéristiques et similaires d'une chaîne à l'autre.
- Les groupements végétaux sont propres au milieu et/ou vicariants⁶².
- La superposition des étages est principalement liée au gradient de température qui exerce ici le rôle de facteur limitant. On peut donc retrouver les mêmes étages de végétation à des altitudes différentes en fonction de leur exposition (adret / ubac) et/ou en fonction de leur latitude.

Ozenda propose la nomenclature de la Figure 2-4. Conjugée aux informations données par la carte d'occupation du sol CORINE LAND COVER et le Modèle Numérique de Terrain, il

devient possible de proposer des espaces favorables (ou plutôt des espaces où les facteurs écologiques Température et Précipitation sont favorables) à des « groupements végétaux réunis par une affinité écologique dans une même tranche d'altitude »⁶³. Ces cartes exprimeraient un premier niveau de sélection spatiale. En pratiquant des opérations simples d'algèbre à partir de cartes booléennes (qui introduisent des facteurs limitants spatiaux comme la structure du sol) ou non, on peut identifier les espaces les plus à même, dans un contexte de probabilité conditionnelle bayésienne, de favoriser ces groupements végétaux. Les cartes qui seront créées sur ces bases proposeront alors une image de l'enjeu global sur le milieu. Elles pourront donc servir, dans un contexte d'aide à l'information, à la mise en place de stratégies d'observation de ce qui se déroule effectivement sur le terrain, notamment en matière d'évolution de la biodiversité. Leur superposition à des infrastructures particulières comme l'enveloppe d'un domaine skiable mettra en évidence des espaces potentiels de conflits d'intérêts.

⁶² La vicariance correspond au remplacement d'un taxon par un ou plusieurs autres qui lui sont voisins. Il existe deux sortes de vicariance : chorologique ou écologique. La première correspondrait à la ségrégation des descendants d'un même taxon ancestral qui ont évolué de façon distincte dans le même type de milieu, la seconde exprime

l'adaptation de deux groupes de descendants à des milieux différents.

⁶³ OZENDA in : [OZENDA 1985] P 67

SCHRÖTER	NOMENCLATURE PROPOSEE ICI	
Alpes suisses du Nord	Suisse du Nord	Dauphiné
NIVAL	NIVAL	2 900
2 700 Subnival	Supérieur et subnival	
2 500 supérieur (prairies)	ALPIN	
ALPIN	Inférieur	2 200
Inférieur (landes)	Supérieur (landes extrasylvatiques)	2 000
1 800	Moyen (Mélèze et Cembro)	
SUBALPIN	SUBALPIN	
	Inférieur (Epicéa subalpin)	1 500
1 200	Hêtraies-Sapinières à Erable et Epicéa	
MONTAGNARD	MONTAGNARD	
	Hêtraies-Sapinières	
	Hêtraies submontagnardes	800
550 COLLINEEN	COLLINEEN	
	600	

Figure 2-4 : Modèle des étages de végétation

Sources: OZENDA 85.

2.2 La question de la biodiversité

Le terme de biodiversité a connu un essor considérable depuis 1992. Il occupe aujourd'hui une position générique dans un espace qui dépasse largement celui de la science. On lui donne souvent un aspect pratique, voire un peu fourre-tout au sein d'autres concepts, par exemple le développement durable. Par conséquent, la notion de biodiversité nécessite des précisions dès que l'on cherche à la mettre en pratique dans un contexte précis, par exemple écosystémique, en fonction d'un enjeu également bien cerné, la dimension économique de l'espace montagnard alpin. Il

s'agit maintenant pour nous de mettre en évidence ces contours.

2.2.1 Pourquoi protéger la biodiversité ?

Indépendamment de la responsabilité directe de l'Homme sur la disparition des espèces, la formidable augmentation de la connaissance pose des questions éthiques importantes. A aucun autre moment de l'Histoire, l'Homme n'a possédé un tel pouvoir de contrôle sur la nature. Le projet faussement attribué à Descartes « nous devons nous rendre maîtres

et possesseurs de la nature ⁶⁴» est maintenant réalisé car nous sommes en mesure de rejouer une partition génétique si celle-ci ne sert pas nos intérêts du moment. Or, peut-on détruire irrémédiablement un patrimoine génétique sur l'hypothèse qu'il n'est pas adapté aux objectifs actuels ? Ce faisant, nous engageons l'ensemble de l'humanité présente et à venir dans une perception statique de l'évolution, voire dans la substitution de l'évolution naturelle par une évolution voulue et uniquement pensée par l'Homme.

Le problème se situe ici. L'Homme, comme instrument majeur de modification de la vie peut-il se substituer à l'évolution naturelle ? En exerçant son pouvoir arbitraire, il impose sa hiérarchie du vivant en fonction de ses seuls buts. A-t-il le droit de se placer ainsi au-dessus de la nature ? Peut-on décemment déclarer des espèces comme insignifiantes sans prendre le risque d'une réaction en chaîne incontrôlable qui aboutirait à la disparition pure et simple de la vie telle que nous la connaissons actuellement ? Surtout, ce risque qui engage l'ensemble de l'humanité peut-il être décidé par une minorité d'hommes ? Seule une poignée d'entre eux semble réellement en mesure de mettre en œuvre les technologies nécessaires pour cette maîtrise. La biodiversité appartient en revanche à tous les hommes. Ce patrimoine commun et

mondial peut-il être modifié par quelques-uns ?

Enfin, l'inégalité, actuellement relevée entre les peuples, ne va-t-elle pas se renforcer ? Actuellement, la valeur « économique » de la biodiversité se calcule sur la base d'idées éthiques, sociales et culturelles. Chaque Etat reste souverain dans la manière de gérer cette biodiversité. Le prix de celle-ci est donc calculé « localement » en fonction de son utilité. Mais les moyens et les usages de ces Etats sont très différents selon qu'ils sont situés économiquement au Nord ou au Sud. Les marchés de la biotechnologie sont actuellement en pleine expansion. L'exploitation directe des ressources naturelles génère des profits considérables.⁶⁵ La valeur d'un produit est directement proportionnelle à la gestion de son accès. Par exemple, tout le monde respire mais il n'existe pas de moyen de s'approprier l'air donc ce dernier ne peut pas avoir de prix. Il n'en va de même avec les espèces dont on peut désormais contrôler la diffusion et même la qualité ou le potentiel de germination⁶⁶. Concrètement, cela pose la question de la privatisation de la nature.

En attendant des réponses claires à ces questions, entre valeur intrinsèque (nécessaire à l'ensemble de l'humanité et donc en dehors du champ marchand) et valeur économique de la nature, il convient de maintenir ce patrimoine à son niveau le plus élevé possible

⁶⁴ Discours de la méthode / Philosophiquement, il convient de préciser que Descartes ne prônait pas une conquête de la nature en vue de son asservissement car l'Homme ne peut se substituer à Dieu. En effet, la question de la finalité de la Création dépasse la nature humaine. Il dit en fait que nous pourrions nous rendre « COMME maître et possesseurs de la nature » ce qui conduit à l'idée de responsabilité face à celle de son appropriation qui reste hors de portée de l'humanité.

⁶⁵ En 1990, les exportations annuelles de bois ont générés un marché de 97 milliards de dollars US : J P Revéret et A Webster in [PARISEAU M.H 97] pp 48

⁶⁶ La semence « Terminator » proposée par Monsanto qui produisait des plants de blés aux graines infertiles obligeait l'agriculteur à racheter sa semence d'une année sur l'autre. Il s'agit d'un exemple concret de contrôle absolu

car il en va de l'intérêt de l'Homme quel que soit son positionnement idéologique. C'est le principe de précaution. Il se pose avec acuité pour l'arc alpin.

2.2.2 Le concept de biodiversité sur le plan biologique

La biodiversité d'un point de vue biologique, désigne une quantification. Il s'agit du dénombrement des formes et des fonctions du vivant. Trois niveaux de biodiversité sont identifiés : le niveau génétique, celui des espèces et, enfin, celui des écosystèmes. Parvenir à quantifier cette diversité du vivant en différents lieux (quels que soient les niveaux) revient à mettre en évidence les zones de richesses biologiques. C'est à dire que nous pouvons choisir de les traiter comme des ressources⁶⁷, éventuelles sources de profits ou richesses à préserver pour elles-mêmes dans l'intérêt de l'humanité.

2.2.2.1 Des ambiguïtés techniques et conceptuelles

Il semble simple de produire une mesure de la diversité des espèces. Cependant, chacun de ces niveaux pose des problèmes qui ne permettent pas à cette mesure de dépasser le cadre de l'estimation. Les valeurs proposées ne peuvent donc pas être considérées comme des informations absolues et cela, quelle que soit la méthode d'évaluation. Les raisons de cette limite sont très diverses et particulières

⁶⁷ Le fait que ces ressources soient en quantités limitées pose le problème du développement durable.

aux niveaux sur lesquels nous établissons la mesure de la biodiversité.

La mesure de la variabilité génétique d'une espèce se construit par division de la variabilité génétique d'une population par celle qui est rencontrée entre les populations de l'espèce en question. D'un point de vue statistique, il s'agit simplement de faire une analyse de variance entre les populations pour en estimer les variations inter populations et intra populations⁶⁸. Trois approches sont possibles, l'approche par assimilation de la variation phénotypique et la variation génétique, celle par analyse de la variabilité enzymatique et enfin, celle par séquençage de l'ADN. Ces trois méthodes, bien qu'efficaces, ne proposent que des estimations de la variabilité d'une espèce. Le travail à fournir pour déterminer la variabilité génétique absolue restera toujours hors d'atteinte⁶⁹. Il faut donc poser la question de la fiabilité générale des résultats puisque ceux ci sont des estimations sur des échantillons.

En ce qui concerne les espèces, la biodiversité prend le nom de diversité spécifique, c'est à dire la quantification du nombre d'espèces différentes présentes en un lieu. Cette quantification s'exprime par la création d'une

⁶⁸ Cette méthode n'est habituellement employée que pour une recherche de la variabilité génétique fondée sur une variation phénotypique (l'apparence physique des espèces). Si cette recherche était basée sur le matériel génétique lui-même, les généticiens représenteraient cette variabilité par trois mesures numériques : le pourcentage de gènes étudiés qui sont variables dans la population, le nombre moyen d'allèles différents recensés pour chaque gène et la fraction de gènes d'un individu typique dont les deux allèles sont différents./ Gilles Seutin : La diversité en biologie in La biodiversité : [PARISEAU1997] pp 16

⁶⁹ Il faudrait étudier l'ensemble du génome de chaque individu de l'espèce

liste de relevé d'espèces⁷⁰. A première vue, cela paraît limpide, encore qu'il faille expliciter le concept d'espèce. Contrairement à une idée reçue, le concept d'espèce est toujours discuté dans les milieux biologiques. Actuellement, il existe deux positions qui s'opposent : le concept biologique⁷¹ et le concept phylogénétique⁷². Le choix de l'une ou l'autre de ces définitions modifie considérablement le nombre d'espèces possibles et exerce donc un effet considérable sur le calcul de la diversité spécifique. Seutin [in : PARISEAU 1997] cite une étude qui montre qu'aux 9000 espèces d'oiseaux reconnues comme telles par l'acception biologique correspondent 20000 espèces selon le principe phylogénétique. Enfin, d'un point de vue pratique, il est extrêmement complexe de conduire un comptage exhaustif des espèces présentes sur un territoire, même réduit. Une fois encore, le calcul de la diversité spécifique ne peut donc proposer qu'une estimation.

La question de la biodiversité des écosystèmes rajoute une dimension au problème en introduisant la question des limites spatiales. Bien que l'approche écosystémique ait été choisie par la convention sur la diversité biologique, la définition de l'écosystème laisse en suspens un certain nombre de définitions. L'article 2 de la convention pose le contour théorique de

l'écosystème comme « un complexe dynamique formé de communautés de plantes, d'animaux et de micro organismes et de leur environnement non vivant qui, par leur interaction, forme une unité fonctionnelle. » Cette définition ne précise pas ce qu'elle entend par « communauté ». Or le terme « communauté » en écologie, s'emploie pour des associations d'espèces qui interagissent, également sur le plan taxinomique et sur le plan trophique. Il est également complexe de déterminer la limite spatiale de certains écosystèmes. S'il est relativement simple de faire une distinction spatiale entre un écosystème « lac » et « prairie » qui le borde, les choses se compliquent dans le cas où ces structures spatiales ne seraient par particulièrement évidentes. Cela peut résulter du caractère ténu de cette transition mais aussi de la valeur heuristique accordée au terme qui nomme l'un ou l'autre des écosystèmes. Par exemple, le terme « forêt » regroupe indistinctement une « forêt tropicale humide », la « Taïga » ou une « Forêt mélangée alpine ». Pourtant, chacune de ces « forêts » est totalement différente des autres par rapport au type d'espèces qui la composent, à leur nombre, aux conditions abiotiques nécessaires à leur existence. L'objectivité en matière de perception des écosystèmes de la zone étudiée prend alors une allure des plus complexes à cause de la relativité des points de vue.

Les écologues ont cependant conçu des indices standardisés de diversité afin de dépasser ces difficultés, les diversités alpha, bêta, gamma et delta. Les deux premiers indices expriment la variabilité intra habitat

⁷⁰ En fait, la plupart du temps, deux listes d'espèces sont établies. La première concerne les espèces qui ont été rencontrées sur le lieu en question et la seconde comprend les espèces endémiques qui ne se rencontrent que sur le territoire étudié

⁷¹ ce qui fait l'espèce est que ses individus ne peuvent se reproduire en dehors de leur espèce.

⁷² L'espèce est déterminée comme « le plus petit groupe irréductible d'organismes différenciables de tout autre groupe de même nature et dont les membres partagent les mêmes liens de filiation. »

(alpha) et inter habitat (bêta)⁷³. La diversité gamma est une combinaison des deux diversités précitées. Elle s'utilise pour calculer la diversité à l'échelle d'un paysage. Enfin, la diversité delta concerne les grands ensembles, par exemple continentaux. Cependant, ces mesures sont également tributaires des relevés de terrain qui réclament des moyens humains considérables. Rien ne garantit de surcroît l'exhaustivité des relevés. Il faut donc nous résoudre à admettre encore une fois que la biodiversité mesurée à l'échelle de l'écosystème reste une approximation.

Malgré cela, la répétition du nombre de publications traitant d'un phénomène de réduction du nombre d'espèces total dans la plupart des zones étudiées (quelle que soit la méthode de comptabilité) devrait inciter à la prudence face à l'idée couramment admise que « cela n'est pas bon pour le marché ». Blondel [BLONDEL 1995] écrivait même que l'extinction de masse qui est actuellement détectée serait de même ampleur que celles qui ont sévi à la fin du Permien et du Crétacé. Le retour à une diversité importante après un cataclysme de ce type ne peut pas intervenir en moins de 20 ou 30 millions d'années. En conséquence, l'Homme ne pourra jamais espérer récupérer des niveaux de diversité équivalents à ceux d'avant la révolution industrielle. Il devient donc urgent de développer des relations nouvelles avec le milieu naturel sous peine d'une perte irréversible (à l'échelle de l'espèce humaine)

⁷³ On remarque immédiatement l'intérêt de la mesure bêta. Si la valeur donnée par l'indice est élevée sur la zone étudiée, cela indique la présence de deux écosystèmes. A l'inverse, une faible valeur montre qu'un seul écosystème se développe sur la zone à l'échelle d'étude

de la biodiversité. Le développement d'outils d'aide à l'information pourrait ici produire des résultats intéressants en matière de prise de conscience des effets des activités humaines d'un point de vue global et local.

2.2.3 Protéger ou conserver : une position idéologique, des conséquences de terrains

Nous comprenons bien l'enjeu de maintenir la biodiversité à un niveau le plus élevé possible. D'une façon intuitive, l'idée de réduire les actions anthropiques au moyen de parcs paraît remplir cet objectif. Empêcher la disparition des habitats (l'objectif d'un parc naturel), c'est finalement réduire fortement la disparition des espèces. En pratique, deux actions de préservation sont possibles : la protection et la conservation. Toutes deux ne procèdent pas de la même perception de la nature et n'impliquent pas les mêmes incidences sur le milieu « naturel » traité.

2.2.3.1 La protection : une approche utilitaire

Cette approche se concentre sur l'aspect utilitaire de ce que l'on voudra préserver. Par exemple, les chênes du Bourbonnais protégés par décret de Colbert revêtaient une dimension stratégique. Il s'agissait de bois nécessaires à l'entretien de la flotte de guerre du royaume de France. Dans un registre équivalent, l'émergence des grands parcs africains doit beaucoup aux chasseurs anglais qui souhaitaient étoffer leur tableau avec quelques grands fauves ou éléphants. Le tourisme a remplacé la chasse mais les

mécanismes de valorisation actuellement en œuvre dans la plupart de ces parcs restent les mêmes. Cette perception utilitaire est constitutive du concept européen de parc où la « valeur » de la nature ne prend de sens qu'à travers les usages que l'homme peut en faire. Elle permet donc une intervention active dans la gestion de ces ressources.

2.2.3.2 La conservation : une approche romantique

La notion de conservation est apparue aux Etats Unis vers la fin du XIX siècle pour répondre au désir romantique de préserver des sites où la nature resterait telle qu'elle était avant l'arrivée des premiers colons blancs. L'approche du milieu s'oppose donc à la vision utilitaire pour rechercher principalement l'aspect esthétique du site. De cette façon, la primauté du divin devait s'imposer à l'Homme par la seule force de la beauté du paysage. Ce concept se fondait sur la théorie du climax définitif qui défendait l'idée que les communautés d'espèces tendaient vers un point d'équilibre, sorte d'organisation idéale du milieu, et pouvaient donc maintenir indéfiniment le paysage résultant. Depuis, l'écologie sait qu'il n'en est rien et que la stabilité du milieu réside justement dans son caractère transitoire comme le propose Waguensberg. [WAGUENBERG 1992]

2.2.3.3 Finalités différentes et existence par opposition

L'approche utilitariste introduit une hiérarchie des espèces fondée sur l'intérêt de protéger une espèce plutôt qu'une autre en fonction de

relations qui historiquement, ne doivent rien à l'écologie. C'est la valeur marchande du Lion comme pièce de choix dans un tableau de chasse qui lui donnait une importance au XIX^{ème} et non pas sa place dans la chaîne alimentaire comme super prédateur destiné à maintenir les populations d'herbivores à des niveaux acceptables pour le milieu. Dès lors que cette espèce clé⁷⁴ est identifiée, tout sera fait pour en assurer la survie. C'est à dire que le parc et les espèces qui le composent sera géré de manière à ce que celui-là reste favorable a celle-ci. L'Homme intervient dans ce processus par des actions directes sur le milieu comme la capture, le déplacement, voire la chasse concertée, par exemple. L'une des conséquences de ce mode de gestion sera que ce qui porte une limite au développement de ces espèces devra être combattu. Bien entendu, toutes les activités humaines présentes et pouvant réduire cette démarche subiront des attaques visant à les faire disparaître ou à réduire considérablement leur activité. A l'inverse, celles qui servent l'objectif (actuellement, il s'agit de maximiser la biodiversité) seront favorisées⁷⁵. Cette idée de cristallisation autour de quelques espèces clés (comme le loup) qui servent d'arcs-boutants à l'ensemble de l'édifice de protection est actuellement en œuvre sur le milieu montagnard Ouest européen dans la plupart des organisations intéressées à sa préservation.

⁷⁴ La notion d'espèce clé (keystone-species) est aujourd'hui une démarche de recherche en écologie qui vise à identifier les espèces qui, dans la multitude, exercent un rôle déterminant dans le fonctionnement des écosystèmes.

⁷⁵ C'est le cas par exemple des subventions proposées à l'agriculture de montagne qui, au-delà,

La démarche de conservation pose en revanche comme condition, l'exclusion de tout ce qui peut modifier le milieu tel qu'il apparaît aujourd'hui. Sur le plan de l'écologie, cette approche ne peut pas donner de résultats pertinents car les écosystèmes s'inscrivent dans une dynamique plus générale en temps long où parfois, des perturbations de type catastrophique comme le feu, exercent une action importante. Le méta climax, proposé plus haut est, par exemple, consubstantiel des incendies qui parcourent parfois les forêts Nord américaines. Empêcher ces feux a conduit au développement en certains endroits de climax de substitution. Aujourd'hui, les gestionnaires des parcs américains intègrent cette dimension. C'est pourquoi, nous voyons régulièrement apparaître dans les médias, des articles traitant d'incendies gigantesques dévorant les parcs sans que personne ne fasse rien. Celui de 1988 a détruit 560 000 Hectares dans le parc de Yellowstone. D'un point de vue écologique, cette politique marque le passage vers une approche plus marquée dans le sens de la protection que celui de la conservation, même si cette dernière diffère du modèle européen par son caractère plus global. Mais le positionnement idéologique de conservation perdure encore et isole ces espaces au milieu des terres.

Quelle que soit la perception et les méthodes mises en œuvre, les exemples où la population locale se pose en interlocuteur de la politique de préservation restent rares. On assiste au contraire à une radicalisation des positions de chacun. Tout se passe comme si l'écologiste

de l'intérêt strictement économique, transforme

ne pouvait pas considérer sérieusement la question sociale et l'aménageur celle de la préservation sans se discréditer. La préservation n'existe donc pour l'instant que par opposition à l'humain dans sa dimension sociale. La question du retour du loup sous nos latitudes est par exemple symptomatique de ce mode de fonctionnement. Il semble impossible de concilier les vues du pastoralisme et celles des écologistes. De la même façon, les espaces des domaines skiables sont fortement combattus par les associations écologistes. Pourtant, la nécessité de préserver la biodiversité ne peut pas se conduire au détriment des populations qui vivent sur place. Le « passage en force » ne peut que déboucher sur des extrémismes préjudiciables à toutes les parties. Ce constat n'est pas nouveau puisqu'il a clairement été spécifié dans le rapport du IV^{ème} congrès mondial de l'UICN en 1993. Cependant, l'objectif de développer une écologie concertée reste pour l'heure loin des réalités de terrain. Des recherches sont cependant en cours et nombres de laboratoires s'engagent dans la voie du développement d'outils d'aide à la concertation.

2.3 Les impacts du changement climatique sur le milieu naturel en montagne

On peut classer les impacts sur le milieu naturel montagnard en deux grandes catégories : ceux qui affectent l'environnement physique (la cryosphère, l'hydrologie, les manifestations météorologiques extrêmes et

l'exploitant en jardinier du paysage.

les processus géomorphologiques) et ceux qui concernent le vivant. (écophysiologie, migration, compétition interspécifique).

2.3.1 Les impacts sur le milieu physique

Ces impacts sont de plusieurs natures et peuvent produire des effets sur des zones très éloignées des montagnes comme les modifications des régimes des cours d'eaux.

2.3.1.1 Les impacts sur la cryosphère

Le chapitre 5 ⁷⁶ du second rapport d'évaluation du GIEC (groupe de travail II) [GIEC 1995] indique que les « répercussions de l'évolution des températures et des précipitations sur les glaciers sont complexes et varient selon les endroits ». Pour les glaciers alpins, les travaux d'Haerberli [HAEBERLI 1994] montrent que ces derniers et le pergélisol sont influencés par une augmentation de la température. La tendance est donc au réchauffement. Pour la neige, les hypothèses [FÖHN 1991] présumaient une réduction de la durée moyenne d'enneigement du massif alpin sur le plan global. Eric Martin [MARTIN 2000] a conduit des expériences de modélisation numérique par modèles emboîtés et montre que le couvert neigeux serait diminué de 30 jours par an (soit 20 à 25%) pour les Alpes du Nord par rapport aux mesures habituelles⁷⁷. Les Alpes du Sud voient leur période d'enneigement se réduire

de 30% et le Mercantour subit un très fort impact avec une réduction de 40 %. Dans le cas d'une augmentation uniforme de la températures telle que proposée par le modèle, les zones situées à faible altitude seraient les plus touchées. En revanche, les zones de hautes altitudes semblent plus faiblement touchées par le phénomène. Des travaux récents de Beniston montrent qu'en Suisse, cette situation se confirme sur les mesures de précipitations enregistrées sur le réseau de stations météorologiques suisses.

2.3.1.2 Les impacts sur le régime hydrologique

Les montagnes, par leur effet de barrière, interceptent les flux d'humidité et reçoivent donc des précipitations importantes. D'une façon générale, les versants exposés au vent reçoivent les précipitations les plus fortes tandis que ceux qui sont sous le vent et ou à l'intérieur du massif le long de vallées profondes accusent un déficit. Parfois, ce déficit peut engendrer des déserts d'altitude comme celui d'Atacama au Chili considéré comme l'un des plus arides de la planète. Toutefois, les caractéristiques hydrologiques ne sont pas identiques partout. Elles dépendent fortement de l'orientation générale du massif et de sa structure orographique. L'évolution du climat va donc modifier fortement le régime des précipitations sur ces zones. Les fleuves qui naissent pour la plupart dans les massifs montagneux verront donc leur régime changer. On imagine les enjeux pour les populations qui vivent au bord du Gange ou du Yang Tsé Kiang.

⁷⁶ Incidence de l'évolution du climat sur les régions de montagne

⁷⁷ Le scénario retenu proposait une augmentation de la température de 1.8° C

Pour les Alpes, des simulations à l'aide d'un modèle haute résolution à grille imbriquée [BENISTON et al 1995] montre que dans un scénario de doublement du CO₂ atmosphérique, les précipitations hivernales augmenteraient de 15 % dans l'ouest des Alpes alors que celles mesurées en été se réduiraient partout.

2.3.1.3 Les impacts sur les processus géomorphologiques

Compte tenu de la modification du régime des précipitations et de leur intensité conjuguées à la modification des conditions de la cryosphère, les phénomènes d'érosion risquent de connaître un accroissement important. Le rapport d'évaluation du GIEC souligne que les glissements de terrains, les coulées de boues, les éboulements vont se développer par déstabilisation des pentes. Les mouvements de gel et dégel ont également une grande importance. Sur le terrain, on constate depuis quelques années des phénomènes d'éboulement considérables en haute altitude. C'est le cas par exemple de celui qui a balayé le Cervin au début de l'été 2003 causant l'évacuation de plus de 80 personnes et l'interdiction de son ascension. L'augmentation des phénomènes d'érosion engendrera nécessairement une élévation du volume de sédiments transportés par l'eau de surface. On peut donc s'attendre à des effets sur le profil des cours d'eau qui prennent leur source en montagne et à des phénomènes de comblement rapide des retenues. Beaucoup de barrages hydroélectriques situés en montagne seront concernés par ce phénomène. Ils devront être dragués plus

souvent et les turbines devront être changées également plus souvent. Cela engendrera un coût de maintenance plus important.

2.3.2 Les impacts sur le vivant

Il devient évident que les espèces végétales rencontrées habituellement en montagne et dont l'existence correspond à une corrélation à des tranches d'altitudes, vont subir de nouvelles contraintes écologiques. Le sens commun indique que les étages de végétation (qui sont liés à un intervalle de température) vont subir une translation vers le haut. On imagine alors une migration des espèces. D'un point de vue écologique, cela entraîne un renforcement de la compétition interspécifique par réduction physique des niches écologiques. Les espèces qui possèdent une capacité de conquête faible (transport des graines peu efficace et maturité sexuelle lente) seraient alors desservies. Mais la seule modification de la température ne serait pas suffisante pour offrir des évaluations correctes car chaque espèce réagira de façon spécifique en fonction de processus écophysologiques qui lui sont propres. Cela montre que l'approche par facteur écologique est une voie intéressante pour l'évaluation des impacts. La question de la prise en compte des « bons » facteurs devient déterminante. Pour les écosystèmes alpins, la durée d'enneigement et l'épaisseur de la couche de neige sont des éléments majeurs de la persistance des écosystèmes alpins. Les plantes qui vivent dans les combes à neige seront donc menacées par un dessèchement estival [OZENDA 1985 ; OZENDA et BOREL 1990]

puisque les prédictions montrent une réduction de la couverture nivale [MARTIN 2000].

2.3.2.1 La migration des écosystèmes

L'une des migrations probable des écosystèmes concerne leur translation vers le haut [OZENDA et BOREL 1990 ;JANCOVICI 2001]. La menace sur les espèces prend la forme de la réduction des espaces viables et du morcellement des habitats. Pour les Alpes, les impacts les plus importants concernent les étages alpin et nival. Les espèces rares de ces étages seraient directement concernées. Ozenda et Borel estiment que ces étages regroupent 15% de la diversité spécifique floristique des Alpes. La perte en matière de biodiversité serait donc très importante.

Il existe un autre phénomène de migration qui se développe sur le plan latitudinal. On prévoit une remontée vers le nord d'écosystèmes méditerranéens avec la mise en place de phénomènes de steppisation. Néanmoins, cette remontée ne serait pas identique selon les versants. Elle serait plus importante du côté oriental que du côté occidental.

2.4 Réflexions et hypothèses autour du changement climatique

Nous avons vu toute l'importance que prenait, en France, le tourisme en montagne en tant que vecteur de développement, principalement en hiver et surtout pour les Alpes. Pourtant, tout repose sur un pari climatique renouvelé chaque année : la venue

et la persistance de la neige. Le Changement climatique qui s'annonce risque de modifier fortement la couverture neigeuse. Quels seraient alors les impacts sur l'espace montagnard alpin ?

2.4.1 Quel impact en cas de changement ?

Il est à craindre que cela se traduise, pour nombre de domaines skiables, par une impossibilité de garantir chaque année l'activité ski avec, en réaction, la précarisation des emplois liés à cette activité.

D'autre part, l'étude du parc montre que beaucoup de domaines n'ont pas les moyens directs d'investir dans un équipement de neige de culture et de moderniser un parc de remontées vieillissant. Ces domaines se situent pour la plupart en moyenne montagne et sont donc concernés au premier chef par une hypothèse de changement climatique. Le Chapitre 5 du second rapport d'évaluation du GIEC [GIEC 1995] souligne que l'aspect touristique de certaines zones de montagnes « apparaît comme une source de revenu non négligeable ». Ces montagnes historiquement peuplées connaissent un déclin des activités traditionnelles. Il serait illusoire de croire à une réhabilitation de ces dernières. Face à une agriculture de moins en moins compétitive, l'économie du ski a bien souvent permis le maintien au pays des habitants tout en leur assurant des revenus décents.

On peut donc penser que l'activité ski suscitera dans les prochaines années des investissements massifs en matière de garantie de couverture neigeuse des

domaines. La persistance économique passe par ce chemin. Cela constituera alors un marché particulièrement lucratif pour toutes les activités qui ont trait à la production, la conservation et le bon usage du manteau neigeux. Il est probable, en outre, que les domaines vont parallèlement redéployer leur espace skiable selon des paramètres de conservation de la neige. Cela pourra se présenter de différentes façons en fonction de la position du domaine en altitude, du potentiel intrinsèque d'usage de l'espace, de la politique menée par le département, et surtout de sa puissance financière.

- Sur le plan purement opérationnel, des exemples d'installation de systèmes de neige de culture en haute altitude sont déjà observés sur quelques grands domaines. Des sociétés de « neige tout temps » se développent et proposent des moyens de production de neige de culture quelle que soit la température. La question de l'accès à l'espace et du retour au pied de la station fait déjà l'objet de toutes les attentions des aménageurs et des constructeurs de télécabines. De très gros porteurs rapides sont à l'étude et certains sont en activité ou en construction (funitel). Des solutions techniques existent donc pour remédier au manque de neige. Elles restent cependant assez onéreuses ce qui les rend pour l'heure hors de portée des domaines skiables de petite taille pourtant concernés au premier chef par le changement climatique car situés en moyenne montagne.

- Sur le plan de l'aménagement global, nous pouvons craindre que nombre de

domaines skiables n'aient pas la capacité de résister à quelques mauvaises saisons. Cela peut engendrer une modification profonde de toute l'économie du ski avec des répercussions en ricochets sur les activités annexes de services et de commerces. On peut même supposer à terme, une nouvelle paupérisation de communes, particulièrement celles dont l'attractivité est fondée en partie sur cette activité et qui sont fortement enclavées.

Les domaines skiables considérés comme « finis » pour l'activité du ski pourront éventuellement survivre dans un marché touristique familial hivernal s'il existe une possibilité de raccord à un domaine plus grand et garantissant la neige. Mais il est actuellement très difficile d'envisager ces possibilités sans engager de lourds moyens en matière d'études. Enfin, sur ce point précis, la dimension politique introduit un niveau de complexité supplémentaire. Elle s'exerce à tous les niveaux, de la commune au département. Sur la somme de ces intérêts divers, les regards, les analyses et les objectifs peuvent être divergents, voire contradictoires. Comment concilier, sur ces espaces, des points de vue aussi éloignés que ceux de directeurs de service des pistes, d'associations de protection de la nature et d'élus locaux ?

2.4.2 Rééquilibrage économie / environnement sur un espace réduit

Nous avons bien identifié que les domaines skiables sont des objets économiques importants. Outre le tourisme, ils créent ou

maintiennent tout un tissu économique dans des espaces autrefois sinistrés par l'exode rural et la déprise agricole. En substituant le modèle économique de l'or blanc au modèle ancestral du pastoralisme d'été, les « inventeurs » des domaines skiables ont indéniablement redonné à la montagne française une valeur économique importante, particulièrement dans les espaces alpins.

La foi dans ce modèle à été ébranlée fortement pour la première fois lors des hivers sans neige du début des années 90. La réaction à l'échelle des aménagements des domaines à été de s'équiper en moyen de production de neige artificielle. Dans le même temps la pression environnementale s'est fait plus forte. Les questions relatives à la préservation du patrimoine naturel ont trouvé un large écho au sein de la société. Les domaines skiables, principalement ceux de première génération, ont alors souffert d'une image environnementale déplorable.

Aujourd'hui, les domaines sont dans une situation d'incertitude quant à leur devenir à long terme. Le changement climatique qui s'annonce les oblige à s'interroger sur la pérennité de leur activité principale qui est conditionnée à un enneigement minimum réparti sur plusieurs mois d'hivers.

Ils posent aussi une autre question environnementale importante, en relation également avec le changement climatique. Les espaces montagnards sont particulièrement concernés par ce changement sur le plan de la biodiversité à cause de la mécanique de la translation verticale des écosystèmes.

La montagne regroupe les derniers espaces « naturels » d'Europe Occidentale. Ces derniers concentrent la majorité des espèces animales et végétales que l'on rencontre sous nos latitudes. Du fait du caractère vertical de la translation des étages de végétation, la zone située entre le subalpin et l'alpin fera l'objet de toutes les attentions, simplement à cause de la réduction physique de l'espace utilisable par les espèces naturelles qui vivent là⁷⁸.

Or, ces espaces seront aussi convoités par les domaines skiables pour la persistance de la couverture neigeuse plus tardivement dans la saison. Comme ces espaces sont pour la plupart faiblement adaptés au produit ski (pentes fortes, risques objectifs), il faudra engager des travaux importants de génie civil, avec un impact important sur les écosystèmes. Il y a là une première forte opposition entre les besoins de rentabilité économique auxquels sont confrontés les domaines skiables et les soucis de préservation des espaces encore susceptibles d'être préservés.

La question de la gestion des ressources en eau se pose aussi. Les domaines skiables, pour être en mesure de produire de la neige de culture, doivent stocker cette eau dans des réservoirs ou des réserves collinaires. Cette eau n'est donc disponible, ni pour les espèces présentes sur le site, ni pour intégrer le circuit d'alimentation d'eau potable qui dessert les habitations. La répartition des ressources risque d'être difficile en période de basses eaux, ce qui est toujours le cas en hiver, au

⁷⁸ Convention sur la diversité biologique / Sommet de Rio / 1992/ Annexe

moment où la population touristique est la plus importante.

Enfin, et c'est à notre sens l'un des problèmes qui se développera le plus dans l'avenir, l'eau issue de la fonte de la neige de culture et des premiers orages d'été est particulièrement riche en éléments nutritifs liés aux caractéristiques intrinsèques de la neige de culture (le problème de la densité de cette neige diminue les échanges gazeux avec l'atmosphère) et surtout des engrais utilisés pour le reverdissement des pistes. Ces eaux, en réintégrant le circuit d'écoulement naturel peuvent engendrer une eutrophisation des cours d'eaux avec les conséquences que l'on sait sur les écosystèmes aquatiques. Elle devra, en outre, être traitée si l'on souhaite l'utiliser en eau potable, engendrant ainsi un surcoût pour le consommateur.

Il faut toutefois souligner un point important. Cette eau n'est pas sortie du cycle hydrologique. Elle est simplement ralentie dans son transit vers la mer. Ce point pourrait intéresser fortement les agriculteurs qui auront un besoin d'irrigation de plus en plus important. La fonte tardive des neiges de culture pourrait devenir un bon moyen de soutien de l'étiage des cours d'eaux. Ainsi, les domaines skiables se retrouveraient dans une situation paradoxale selon le profil agricole : frein éventuel pour le pastoralisme⁷⁹, avantage pour l'agriculture irriguée.

On le voit bien, les domaines skiables seront dans un avenir proche, des espaces de

combats idéologiques, économiques, sociaux et écologiques.

2.4.3 Temps court - Temps long : les mécanismes de la compétition

L'inégale perception et action du temps est un facteur majeur de la venue de ces espaces de conflits. La compétition réside autant dans l'opposition de l'emploi de la zone (protection contre économie) que dans la réactivité des stratégies d'adaptation.

Il faut reconnaître que les domaines skiables jouissent d'un avantage non négligeable face aux écosystèmes présents sur le site. L'industrie de l'hiver est habituellement très réactive. Le développement foudroyant des installations en neige de culture en est un exemple particulièrement frappant.

Jusqu'au début des années 90, très peu de domaines s'équipaient de ce type d'installation. Il a suffi de deux hivers sans neige pour que la plupart des domaines investissent massivement dans ces infrastructures. Aujourd'hui, la tendance ne faiblit pas. On voit même les domaines procéder à l'implantation de canons en altitude de façon à garantir une couverture neigeuse minimale partout sur l'enveloppe du domaine. Les techniques de préservation de la neige ont progressé de façon spectaculaire en seulement 5 ans (damage de nuit, suivi GPS pour l'optimisation, développement de treuils sur les machines pour un damage sur les fortes pentes, formation à la conduite d'engins de damage dispensée par des organismes professionnels).

⁷⁹ Cette allégation n'est à ce jour, toujours pas prouvée

Les moyens matériels mis à la disposition des domaines skiables pour suivre l'évolution des activités de glisse sont considérables et apparaissent souvent en deux ou trois saisons. Ils permettent de remodeler des parties entières d'un domaine en fonction des pratiques.

Le développement du « snowboard » a permis les « snow-parcs », les « half pipes », et autres zones « free-ride », expriment parfaitement cette réactivité professionnelle. Les domaines se sont adaptés au marché de cette pratique en quelques saisons. Le tissu industriel leur en a donné les moyens. Il fallait sécuriser et travailler la neige d'une façon totalement nouvelle : les constructeurs d'engins ont inventé très rapidement les outils adaptés au développement de ces nouvelles pratiques.

Aujourd'hui, un domaine skiable ne peut pas être considéré comme un espace à évolution lente. L'adaptation de l'outil « domaine skiable » devient particulièrement réactif aux conditions du marché. L'espace de loisirs sportifs peut se décliner en objet systémique complexe et en adaptation permanente.

Nous pouvons donc raisonnablement penser que le changement climatique verra rapidement la mise en place de stratégies d'adaptation pour les domaines qui le peuvent. Cette réactivité de l'aménagement d'un domaine skiable ne réside cependant pas dans une volonté de prendre en compte le changement climatique à l'avance mais plutôt comme une réaction en temps court afin de maîtriser la variabilité des phénomènes de précipitation et de couverture nivale tout au long de la saison de ski.

Les méthodes sont les mêmes quand il s'agit de développer une nouvelle pratique qui s'avère porteuse en matière de retombées touristiques. Comme les lois du marché sont aussi valables pour le tourisme hivernal, l'aménageur s'oblige à gérer son domaine en « échéances courtes ». La plupart du temps, un domaine fonctionne d'une saison à l'autre sauf quand un projet de refonte globale (remplacement de télécabine, modification du flux...) nécessite une réflexion. Même dans ce cas, les décideurs s'engagent rarement au-delà de quelques années et jamais sur l'ensemble de l'enveloppe du domaine. Dans cette approche, le facteur climat ne peut être perçu que comme un élément de plus à prendre en compte dans la gestion du domaine skiable, instrument de travail.

Le point de vue est exactement inverse dans le cas du milieu naturel. Pour que la plupart des espèces gardent une chance de suivre et de supporter l'évolution climatique, il faudra impérativement que le changement se fasse en « temps long ». C'est à dire que le milieu qui sera susceptible de porter les « nouveaux » écosystèmes ne devra pas être soumis trop fréquemment à des perturbations.

Or, face à la débauche de moyens et l'extrême rapidité de réaction des aménageurs de domaines skiables, les perspectives de survie des espèces végétales et animales, simplement par la voie naturelle, risquent d'être faibles, particulièrement si la translation⁸⁰ intervient sur une période de

⁸⁰ Il est acquis maintenant par la communauté scientifique que le changement climatique en montagne se traduira par une élévation des étages de végétation (Ozenda 1990) avec pour conséquence une réduction du nombre d'espèces (Romme et Turner 1991)

temps relativement courte. Il est évident qu'une espèce ne pourra suivre la migration de son habitat que si elle parvient au stade de la reproduction à mesure que son habitat se déplace. On imagine sans peine l'effet d'une fonte tardive de la couverture neigeuse suivie d'un travail de reprise de pistes à l'aide d'engins de terrassements sur la maturation d'une espèce desservie par la compétition interspécifique. Conjugée à l'inévitable réduction de l'espace favorable à mesure que l'on gagne en altitude, à l'augmentation de la compétition avec les autres espèces sur cet espace réduit, on voit bien que, sans une intervention humaine précise, la plupart des espèces desservies par la compétition interspécifique disparaîtront purement et simplement. Cela nous autorise à former l'hypothèse que l'arsenal juridique et le pouvoir de pressions des partisans d'une protection forte de l'environnement seront de plus en plus importants au fur et mesure que le changement climatique se fera sentir.

Finalement, c'est encore dans l'opposition : réaction à la variabilité du phénomène/conséquence sur le long terme, que se déploie le conflit entre économie et environnement. Bien entendu, ce conflit ne prend corps que dans des espaces soumis à des usages contradictoires. C'est le cas des domaines skiables. Or, les acteurs de l'aménagement et de la gestion du territoire sont multifformes et souvent spécialisés dans un domaine bien particulier. De surcroît, la

compréhension des hypothèses relatives au changement climatique afin de les rapporter à un champ spécifique réclame un bagage technique assez important. Les décideurs sont donc confrontés à des difficultés de visualisation spatiale et scientifique. Cet argument du défaut de bagage technique suffisant est régulièrement avancé pour battre en brèche les projets des uns ou des autres. Les conflits sont renforcés par le fait que la plupart des personnes associées sur le projet de territoire ne s'accordent pas sur une perception commune des effets du changement climatique en montagne, ni même sur l'acceptation que « l'opposant idéologique » puisse détenir un avis pertinent sur cet espace partagé. Tout l'intérêt du développement d'une approche heuristique se situe à l'interface de ces deux constats. Si nous parvenons à traduire un phénomène spatial complexe en une image proche du quotidien visuel des acteurs du territoire, ceux-ci parviendront à saisir plus facilement les enjeux pour leur propre activité et celle de leur homologue contradicteur.

Nous présenterons dans les pages qui suivent, les mécanismes de la perception d'un fait spatial. L'objectif que nous poursuivons ici sera de poser les bases d'une démarche heuristique opérationnelle. Nous proposerons par la suite une application, sur le cas de la Savoie et de la Haute Savoie, développée avec un modèle de simulation.

3 Voir, décider, aménager : complexité du territoire vécu et aménagé

La première partie de notre travail a tenté de mettre en évidence l'immense complexité de la machinerie climatique. Il s'agissait surtout de montrer toute la difficulté d'une perception claire des enjeux du changement climatique pour accéder à des échelles et des considérations plus pratiques. Cette question est lancinante : comment comprendre le fonctionnement à grande échelle d'un ensemble déjà tellement complexe à appréhender à petite échelle sur le plan technique et de surcroît, relatif sur le plan de la perception⁸¹?

Dans le cas qui nous intéresse, le gestionnaire de domaine skiable devra par exemple effectuer une opération difficile d'analyse de documents qui ne lui sont pas particulièrement adressés.⁸² Il devra les comprendre suffisamment profondément pour en mesurer les conséquences dans son champ personnel d'implication. C'est-à-dire, opérer un changement d'échelle pour distinguer,

dans un contexte opérationnel, les conséquences probables du changement climatique à l'échelle de son domaine skiable. L'une de celles-ci peut être d'envisager, sans l'exagérer ni la sous-estimer, la remontée de l'isotherme zéro moyen mensuel par rapport au front de neige du domaine. Il pourra par la suite planifier sa stratégie d'adaptation dans le temps en fonction de ses moyens techniques et financiers.

Ce faisant, il prend le risque de commettre des erreurs dans l'évaluation de l'impact possible sur le domaine skiable. Ces erreurs peuvent provenir principalement de deux directions : mal comprendre la production scientifique (relative au changement climatique) sur le plan théorique et mal percevoir les conséquences spatiales du changement climatique par rapport à sa problématique locale. Le changement d'échelle est toujours une opération risquée. Les méthodes de l'analyse spatiale conjuguées à des outils comme les Systèmes d'Informations

⁸¹ Les conséquences du changement climatique ne se perçoivent pas de la même façon selon que l'on est un écologiste ou un aménageur de domaine skiable

⁸² Les rapports d'évaluation du GIEC sont toutefois condensés en « résumés pour décideurs » de quelques dizaines de pages.

Géographiques (SIG) peuvent réduire considérablement ces erreurs potentielles.

La science géographique prend alors un sens appliqué considérable à condition d'observer simultanément les moyens théoriques et techniques mis en œuvre, avec la finalité matérialisée par la production d'une carte, vecteur d'aide à la compréhension des enjeux du phénomène étudié.

Dans cette perspective, l'image construite (la carte) ne doit pas être considérée comme un produit dont l'intérêt scientifique ne vaut que par la méthode qui a servi à sa création. Elle recèle sa propre finalité : aider la capacité de compréhension du gestionnaire.

Pourtant, alors même que la théorie graphique de Bertin [BERTIN 1967] se prêtait parfaitement à une intégration informatique, la discipline cartographique n'a pas profité des évolutions majeures apportées par la géomatique. En privilégiant le développement de traitements et de recoupements de données numériques de façon massive plutôt que l'efficacité de leurs représentations dans les Systèmes d'Information Géographique, la carte est devenue une conséquence sans épaisseur de ces derniers. [FERLAND 1997] C'est à dire un simple canal d'information dont l'objectif sera la visualisation rapide d'une information de la base de données. D'ailleurs, les outils mis à disposition pour la représentation cartographique des données apparaissent désespérément similaires pour l'ensemble des outils SIG du marché. Cela en dit long sur l'intérêt porté par les éditeurs de ces logiciels aux méthodes de représentations de l'information. Pourtant, il est rare que le

décideur final d'un projet suive l'ensemble du processus d'analyse des données qui a conduit au résultat. Sa seule référence reste finalement la carte produite au terme du processus. Celle-ci joue ainsi un rôle stratégique indéniable dans l'orientation des choix ultimes.

L'approche heuristique dont nous proposerons de faire l'expérimentation plus loin essaie de redonner à la cartographie une place plus importante dans le champ de la géomatique en autorisant le décideur à construire lui-même un paysage réaliste de son projet. La carte, à ce moment, devient dynamique et interactive. Pour parvenir à ce résultat, nous devons, dans un premier temps, nous attacher à exposer les points théoriques sur lesquels nous nous appuierons pour tenter d'atteindre cet objectif.

Nous chercherons donc à clarifier notre point de vue sur ce qui permet à l'Homme de remplir l'espace de sens et les moyens techniques utilisés habituellement pour y parvenir. Cette partie de notre travail n'est assurément pas secondaire. L'approche heuristique repose sur la découverte d'une solution par la construction interactive d'un paysage commun et réaliste. Nous devons alors réfléchir à la signification de l'Espace Perçu d'un point de vue général avant tout développement. Nous chercherons également à évaluer les moyens techniques à disposition dans l'hypothèse d'un déploiement de l'approche heuristique sur un plan informatique (stockage, échange et visualisation des données.) SIMUL-IMAGE, instrument d'aide à la concertation par la simulation interactive sera l'expression pratique de ce développement.

Le second volet de cette partie s'attachera à décrire comment ces données sont traitées et organisées dans l'environnement de simulation et comment ce traitement implique des conséquences opérationnelles.

Enfin, le dernier temps s'intéressera plus précisément à la question de l'interpolation de phénomènes climatiques. Ces derniers jouent un rôle particulier dans notre démarche.

Nous tenterons de montrer les avantages et les faiblesses des méthodes géométriques, probabilistes et statistiques explicatives. Pour terminer, nous proposerons un moyen d'amélioration de l'interpolation des phénomènes de températures par création de stations virtuelles, tout cela dans le but d'améliorer le réalisme de la simulation.

3.1 Traduire un point de vue en phénomène spatial : le problème de la conscience du fait spatial

Dès que l'on cherche à aménager un territoire, le fait spatial émerge et chacun des acteurs de ce territoire attend de manière plus ou moins explicite une panoplie de cartes destinées à présenter un futur prévu pour le territoire en projet. Les cartes prennent ici un pouvoir de vérité et d'autorité quasiment indiscutable et sont l'expression du réel attendu. On compte alors sur leur universalité et leur simplicité d'accès comme si ce mode de représentation pouvait s'affranchir des disparités de points de vues liées aux perceptions des acteurs.

Pourtant, déjà, leur production peut correspondre à deux approches différentes du même territoire : [CHARDONNEL et al 2003]

- Celle de l'expert technicien qui recherchera des données géoréférencées pour produire une analyse et une cartographie afin de fournir un résultat pratique comme, par exemple, la construction d'une piste de ski. Cette carte sera validée ou non en fonction du niveau d'exigence relatif à la qualité des données et de la démarche scientifique qui a servi à sa réalisation.

- Celle de l'expert communicant, à l'approche plus globale et qui cherchera à faire comprendre aux acteurs de ce territoire tout l'intérêt que ce dernier représente. L'aspect crucial ici, ne sera pas la qualité du positionnement mais plutôt l'efficacité sémiologique au service du message.

Ces deux approches, toutes deux cartographiques se distinguent à la fois dans leurs méthodes de réalisation et dans leurs perceptions par les différents acteurs du territoire. Généralement, le recours à ces deux types de cartes est inséparable du projet de territoire⁸³ puisque chacune apporte une information particulière au projet global. On ne peut donc pas introduire ici une quelconque idée de hiérarchie, de légitimité ou de pertinence.

En revanche, la question de la perception des messages prend ici une intensité particulière. On devine que l'unicité du support et du langage cartographique ne transcende pas plus une carte, que les trente six phonèmes comptabilisés pour la langue française ne le

font pour un texte littéraire. Il convient donc de préciser un peu cette idée de perception du message spatial puisqu'il représente un des points importants de notre projet heuristique. Ce message est de deux ordres. Il se voit dans le réel, et il se conçoit dans l'esprit de celui qui regarde.

3.2 Aspect cognitif du canal visuel : vers des systèmes générateurs de faits de conscience

L'usage de la graphique en géographie représente un moyen particulièrement puissant pour le traitement et la communication de l'information. Cependant, la carte ne peut pas être perçue comme objective et sans opinion. Elle exprime invariablement une intention⁸⁴ qui sera celle de son concepteur. Cette intention doit être indiscutable sur le plan théorique, il en va de l'honnêteté scientifique. Toutefois l'objectif sera de conduire le lecteur vers un message spatial efficace, lisible et mémorable en utilisant des méthodes systématiques.

3.2.1 La perception visuelle du fait spatial

La question de la représentation spatiale a fait l'objet de beaucoup de travaux depuis l'essor de la théorie de Bertin au début des années

60⁸⁵ [BERTIN 1967]; [BEGUIN et PUMAIN 1994]; [BORD et BLIN 1995]. On admet aujourd'hui un langage graphique qui s'exprime à l'aide de la notion de variables visuelles. Celles-ci exploitent les propriétés naturelles de l'image.

Il est possible d'exprimer trois dimensions indépendantes dans le plan. Celles qui sont relatives au X et au Y (Figure 3-1 n° 1 et 2) donnent les deux premières dimensions. Elles sont séparées par leur caractère orthogonal. La dernière dimension Z est construite à partir d'une variation d'énergie lumineuse (Figure 3-1 n°3). Celle-ci prend corps dans la variation de taille ou de valeur des taches sur le plan. Ces propriétés forment les variables visuelles dans la théorie de Bertin. Cette dernière poursuit deux objectifs : traiter les données pour découvrir l'information et la communiquer de façon efficace.

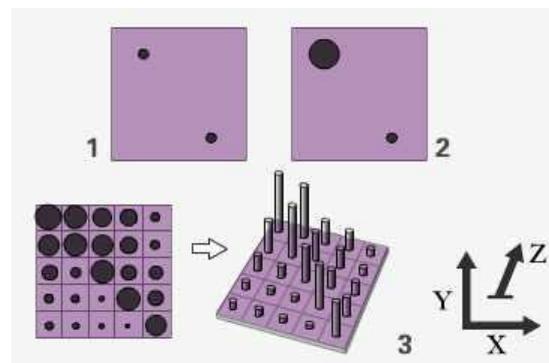


Figure 3-1: Propriétés naturelles de l'image instantanée

Source : la graphique de Jacques Bertin : Atelier de cartographie de science-politique Paris 2002

⁸³ Les procédures UTN (Unités Touristiques Nouvelles) par exemple, usent et abusent des deux types de cartes

⁸⁴ Qui spécifie donc que le concepteur de la carte a déjà une conscience précise du phénomène spatial qu'il veut représenter.

⁸⁵ L'ouvrage de Bertin est paru quatre ans après sa communication où il présente, aux rencontres internationales « gens d'Images » tenues à Porquerolles en 1963, toutes les variables qu'il définit comme codes intelligibles pour la perception visuelle.

Elle propose un cadre et des outils regroupés au sein de la théorie matricielle de la Graphique. C'est à travers cette théorie que Bertin affirme le caractère signifiant monosémique de la cartographie⁸⁶. Cette caractéristique se développe sur l'idée d'une exploitation matricielle des propriétés du plan XY pour l'analyse des données et dans la définition rigoureuse de l'utilisation des variables visuelles. La figure 3-2 propose une représentation de l'approche de Bertin pour l'analyse préalable des données. Il s'agit simplement de conserver une signification en X et en Y sur le plan dans le but d'aider la réflexion pour cartographier les informations réellement signifiantes.

La théorie matricielle de la Graphique suppose qu'à tout type de graphique correspond un tableau de données à double entrée. Ce dernier est un instrument pour atteindre une compréhension d'ensemble des données par des permutations de lignes et de colonnes. Quand on parvient à ordonner ce tableau, l'objectif est atteint et tous les niveaux d'informations, du plus élémentaire au plus global, sont renseignés. Il ne reste plus qu'à choisir le bon mode de représentation

Cette approche est fondamentale dans la théorie de Bertin et repose sur le principe de proximité-similitude. Elle se révélait extrêmement puissante tout en respectant la structure élémentaire des données en statistiques où chaque individu d'une

population est indépendant de sa position dans une liste de N. Le caractère orthogonal des axes du plan exprime cette indépendance.

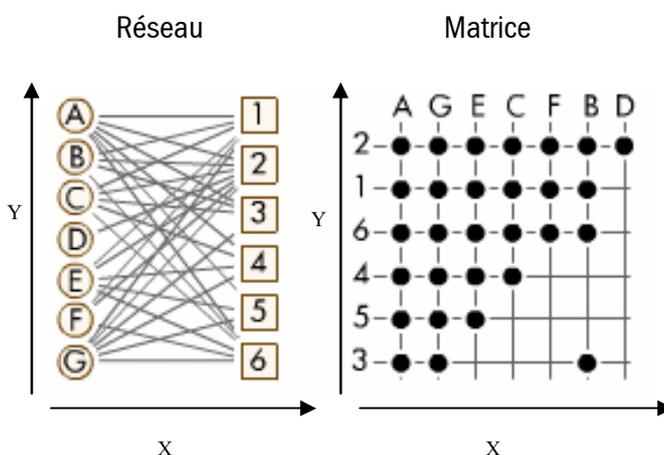


Figure 3-2: Réseau et matrice ordonnable

Aujourd'hui, les instruments statistiques se sont généralisés et la théorie matricielle de Bertin peut avantageusement être remplacée par des outils plus puissants comme ceux de la classification proposée par la Statistiques en Analyse de données.

3.2.1.1 Les variables visuelles

Bertin a montré que, pour les propriétés naturelles du plan, il existait six variables visuelles possibles pour représenter plusieurs caractères sur le même plan. Ces variables sont la taille, la valeur, le grain, la couleur, l'orientation et la forme. Leurs formes d'implantation sont au nombre de trois : ponctuelle, linéaire et zonale. (Figure 3-3) Il s'agit ici de permettre la superposition des informations sans que celles-ci s'annulent

⁸⁶ C'est cette affirmation qui a lancé l'idée répandue de la carte langage universel et sans ambiguïté.

visuellement comme le feraient des superpositions de photos.

- **Les variables de dissociation**

La taille et la valeur sont considérées comme des variables ayant un effet de dissociation sur le plan. Elles imposent leur ordre aux autres variables en jouant sur la modification de l'intensité lumineuse qu'elles exercent. L'effet visuel n'est donc pas constant et permet une hiérarchie (ceci est N fois cela).

- **Les autres variables : un effet de séparation**

Les autres variables exercent un effet visuel constant sur le plan. Elles sont utilisées pour séparer les entités primitives de l'image et sont dites associatives. On peut donc superposer ces variables sur un même plan et représenter plusieurs informations (ceci est différent de cela).

Chacun de ces types de variables peut exploiter les trois types d'implantations possibles du plan (Figure 3-3). On remarquera l'absence, de la variable volume et mouvement proposé par Bord [BORD 1999]. Avec l'avènement des ordinateurs, il devient envisageable d'exploiter l'ensemble du potentiel des variables proposées par Bertin. Dans cette perspective, le volume peut se percevoir alors comme une simple déclinaison de la variable taille. Le problème de la variable mouvement se traite encore plus simplement car elle n'a pas d'existence visuelle en tant que telle. On ne peut pas conceptualiser véritablement une variable visuelle du

mouvement. Le problème se résout le plus souvent par la production d'un dessin animé cartographique, au sein duquel, le mouvement est restitué par une variation de taille ou de valeur. L'autre voie concerne les choremmes mais on sort alors du champ de la cartographie classique. Ces deux variables ne sont donc pas de nouvelles variables visuelles de l'image au sens où nous l'entendons dans ce travail.

En revanche, on peut s'interroger sur l'apparition d'une nouvelle catégorie de variables fondées sur la puissance informatique que l'on pourrait qualifier de variable d'exploitation de l'image. Le mouvement en fait alors partie comme un certain nombre d'autres possibilités proposées par Ferland [FERLAND 1997]. Cette question sera abordée lors du développement des principes de la 3D dans notre section consacrée à la réalité virtuelle dans les SIG.

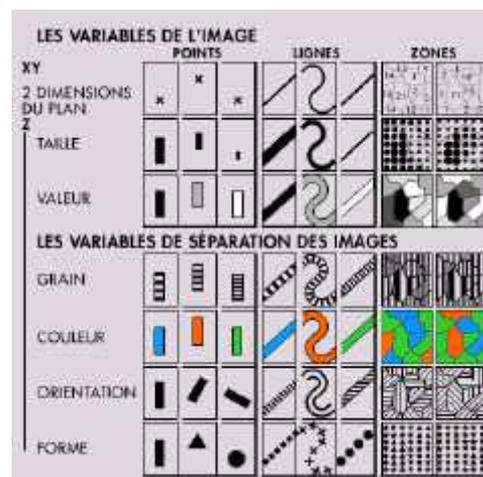


Figure 3-3: Les variables visuelles

Source : Bertin 2002

La théorie de la Graphique de Bertin montre qu'il est possible de construire une

représentation graphique du réel en respectant un formalisme scientifique de base à la fois dans l'analyse des données et dans leurs transcriptions visuelles. Cependant, les outils informatiques de mise en œuvre restent encore à inventer pour que cette théorie exprime sa pleine puissance. Dans un autre registre, cette méthode a introduit l'idée que la carte induisait également une perception univoque du réel. Ce n'est pas le cas, et Bertin lui-même [Bertin 2000] souligne la distance qui existe entre les méthodes pour la construction d'une carte et la perception que le lecteur en a. L'une s'établit dans un champ rigoureux et formel, l'autre reste dans l'univers culturel d'une perception multiforme. Est-il possible de circonscrire cette perception à quelques règles qui réduiraient l'aspect mouvant de l'entendement du fait spatial ? La réponse ne peut pas être nuancée sur ce point. Elle doit être affirmative car sans cela, il n'est point de science possible. Les pages qui suivent développent donc les idées relatives à cette conscience du fait spatial auquel nous adhérons. Elles constituent l'un des points les plus importants de notre démarche globale car elles expliquent les fondements théoriques de notre projet d'aide à la concertation par approche heuristique.

3.2.2 La conscience du fait spatial

Bertin a exposé les possibilités de construction de représentations visuelles de façon rigoureuse et objective. Ce faisant, il a transcendé un mode de représentation qui restait jusqu'alors faussé par la sensibilité

personnelle et le talent du constructeur du support visuel. A la fin des années soixante, la cartographie thématique gagnait le statut de science telle que Bachelard [BACHELARD 1970] la concevait dans : « La formation de l'esprit scientifique. » C'est à dire une démarche scientifique parce que «...ses assertions sont justifiées par le traitement rigoureux d'un tableau de données explicites ».[BERTIN 2000] Dans le même temps, il montre également les limites d'une telle démarche en précisant que ce traitement de données ne peut « ... exister que dans le cadre d'un ensemble fini : le tableau de données ». Or « il existe une infinité d'ensembles finis. » La carte ne peut donc pas, par ses propriétés mêmes devenir cette science de synthèse au sein de laquelle chaque discipline scientifique pourrait s'inscrire pour dialoguer et, surtout, coopérer avec toutes les autres. Pourtant, beaucoup considèrent encore que la carte représente le langage universel alors que seules, les méthodes employées pour sa construction le sont. Il convient donc de différencier ces dernières qui seront bien entendu objectives et reproductibles, nous venons de le voir, avec le point de vue sur l'espace des acteurs du territoire qui reste particulier à leurs domaines. Pourrait-on caractériser et quantifier cette perception ? Si la réponse est affirmative, il devient possible de construire de toutes pièces, des systèmes capables de produire une pensée [CARDON 1999]. Sans aller aussi loin, nous pouvons réfléchir, dans notre projet, à une organisation des données au sein d'un ensemble informatique qui pourraient permettre de dépasser le cadre univoque

proposé par le seul cartographe pour aborder une construction interactive et collective. On s'engage alors dans une direction d'aide à la résolution de problèmes spatiaux par une démarche heuristique⁸⁷. Cette voie se révèle possible en abordant les données du territoire du point de vue de leur signification par rapport au sens qu'elles ont pour un acteur du territoire plutôt que par leur existence en soi.

Leur introduction dans un modèle heuristique d'aide à l'information serait alors conditionnée par leur réalité perçue plutôt que par leur réalité vraie.

3.2.2.1 L'espace construit par le sens : le sens construit par la conscience

Pour développer toute discussion sur la perception de l'espace, il convient de postuler que le monde physique⁸⁸ sur lequel il se déploie est appréhendable. C'est à dire comme l'affirme Heidegger [HEIDEGGER 1986] « là devant disponible. » On peut alors le décrire par l'observation et l'analyse. Ce faisant, l'observateur suivant la démarche scientifique expérimentale, lui donne du sens en établissant une relation biunivoque entre la permanence des choses qui composent le monde et la représentation symbolique qu'il s'en fait à l'aide d'un certain langage, les mathématiques par exemple. Si l'on suit ce raisonnement, l'Homme se révèle doté d'une capacité de connaissance a priori qui

l'autorise à penser le monde et l'espace qui l'entoure.

Celui qui se met alors à penser prend conscience des choses et cette conscience pose la question centrale du sens donné à ces choses. Nous ne développerons pas ici les différentes définitions de la conscience car nous nous éloignerions trop de notre propos. Nous prendrons donc pour acquis que la conscience de quelque chose est produite par la pensée. Cette dernière sera, d'après Heidegger, « ce qui donne le plus à penser » et ce qui donne le plus à penser est ce qui aura le plus de sens pour celui qui pense.

Cette dernière assertion pourrait être exploitée par le géographe pour construire un modèle de données perçues dans un environnement qui deviendrait alors générateur de conscience non prévue au départ. Cependant, il faudra savoir quoi mettre dans ce modèle pour permettre la prise de conscience. C'est à dire résoudre un autre problème complexe quoique indépendant du modèle lui-même qui sera celui de l'intentionnalité. Comme ce qui donne le plus à penser est également ce qui prend le plus de sens, il suffirait d'identifier ce qui fait le plus penser sur un sujet⁸⁹ donné (comme l'aménagement d'un domaine skiable) et d'en extraire les constructions spatiales primitives⁹⁰ pour reconnaître les « bonnes » données.

⁸⁷ C'est à dire une méthode selon laquelle la solution est trouvée par le dialogue entre les différents acteurs du problème

⁸⁸ C'est à dire l'ensemble des choses objectives en dehors de soi

⁸⁹ Bien entendu, ce sujet doit être délimité dans le temps et dans l'espace

⁹⁰ au sens de la plus petite entité spatiale indivisible de ce qui fait sens pour l'acteur du territoire

• **Structure des données : le principe des récifs de consensus et de non-consensus**

Les « bonnes » données perçues ne peuvent l'être qu'en fonction d'un objectif précis, sur un terrain donné. Elles sont, de surcroît, inséparables de l'acteur qui leur donne du sens. Quand leur signification résiste au temps et à la multiplicité des individus, elles forment des récifs⁹¹ dans le champ mouvant de la perception. Cependant, l'emboîtement d'échelles requis pour une mise en œuvre heuristique d'aide à la résolution de problèmes, implique une évaluation de leur degré d'acceptation par les autres acteurs du territoire. Deux cas de figures extrêmes sont possibles :

- Tous les acteurs s'accordent sur la signification de l'objet spatial. Il couvre donc l'ensemble des dimensions signifiantes (N acteurs). C'est le cas par exemple du Modèle numérique de terrain. Ce sera un récif de consensus
- Un seul acteur considère un objet comme ayant une valeur d'explication forte alors que tous les autres lui accordent une valeur faible. Cet objet ne couvre qu'une seule dimension signifiante du champ (1/N acteurs). Ce sera un récif de non-consensus. Ce type d'objet peut être, dans notre cas,

un canon à neige, au contour signifiant différent selon que l'on sera un aménageur de domaine skiable ou un écologue.

Entre ces deux cas extrêmes, toutes les situations de perception des objets du plan sont possibles.

Nous pouvons modéliser ces relations qui sont par essence qualitatives et leur donner une dimension quantitative. Bien entendu, cette dimension quantitative ne vaut que dans l'intervalle spatial et temporel du problème que nous voudrions traiter. La figure 3-4 décrit cette relation et met en évidence les récifs de consensus et de non-consensus. Nous verrons en dernière partie que cette approche nous permet de donner à l'image construite, une mesure de sa valeur d'efficacité consensuelle.

⁹¹ Le vocabulaire récif est emprunté aux sciences cognitives quand elles décrivent un phénomène de

persistance comme une erreur de grammaire malgré le rappel de la règle.

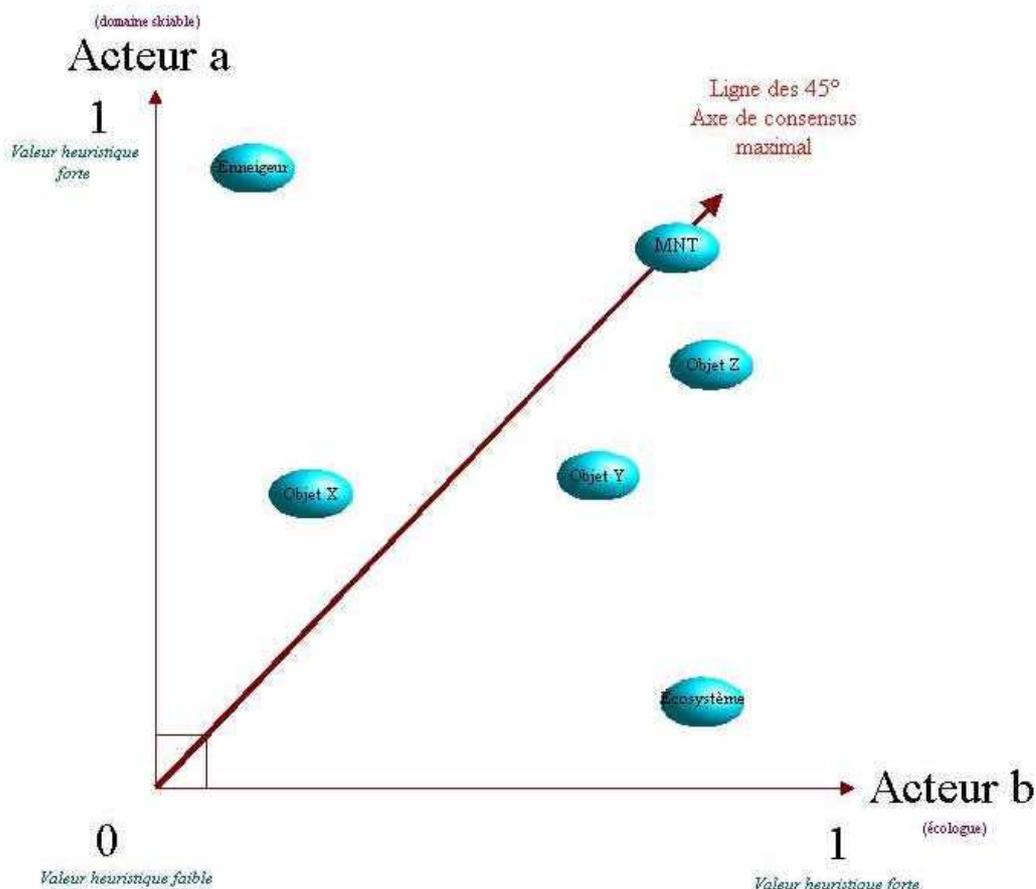


Figure 3-4: Graphe de modélisation de la valeur heuristique des objets spatiaux minimum

Si tous les objets spatiaux primitifs sont perçus de façon égale par tous les acteurs, ils seront positionnés le long de l'axe des 45° car cette droite est de la forme $Y=X$. Le caractère orthonormé exprime l'indépendance de perception de chacun des acteurs sur le territoire concerné. Les variations des situations sont traduites par la valeur affectée aux objets dans un intervalle compris entre 0 et 1. On peut éventuellement discrétiser cet intervalle de façon à réduire les possibilités de positionnement des objets. En répétant l'opération, on parvient à construire un indicateur du poids du consensus possible assigné à chaque objet spatial primitif quand il

est considéré simultanément par tous les acteurs du territoire.

L'exemple ci-dessus ne prend en compte que deux dimensions. Son intérêt est principalement ici d'ordre pédagogique. Il existe des instruments statistiques, puissants et aujourd'hui faciles d'accès, comme l'analyse factorielle qui développent cette idée dans un espace multidimensionnel.

- **Des outils de simulation interactive pour valoriser cette donnée**

Pour valoriser cette donnée ainsi structurée, il convient de développer des outils informatiques spécifiques. Ils doivent permettre la simulation en temps réel. C'est-à-dire que l'acteur du territoire doit pouvoir voir et agir immédiatement sur l'objet dans un environnement réaliste (visuellement et physiquement).

Avec ces outils techniques adéquats qui autoriseraient une **construction interactive d'une scène réaliste**, à l'aide de ces objets spatiaux minimaux, comme on peut le faire avec un jeu de construction, on parviendrait à dépasser le caractère figé de la représentation spatiale. Des méthodes nouvelles de résolutions de problèmes conflictuels pourraient alors voir le jour. Les acteurs du territoire pourraient expérimenter directement les solutions possibles et converger ensemble vers une solution commune car ils seraient contraints (par leurs sens) de comprendre les enjeux de leur contradicteur. C'est l'idée heuristique où l'acteur découvre par lui-même une solution au problème qu'il s'était posé.

L'idée heuristique renverse l'approche habituelle pour l'aide à la résolution de problèmes. En SIG, et en aide à la décision, on cherche, d'ordinaire, à modéliser les règles en s'entendant sur un espace commun et fixe, considéré comme réaliste (la base de données). L'approche heuristique propose de modéliser un espace spatial perçu comme tel par les acteurs du territoire. Les règles du jeu de la décision sur cet espace perçu sont finalement contenues dans le fait que l'objet

défini par les acteurs peut apparaître ou non dans l'environnement dès qu'il est stocké dans la base de données. Elles ne sont donc pas modélisées en tant que telles. Le passage d'un modèle du réel en soi à un modèle perçu et quantifié par le biais du graphe de la figure 3-4, n'est pas innocent. Cette action, construite par la conscience des acteurs, induit qu'une partie de la décision pour résoudre le problème est prise à ce moment. Nous voyons ici revenir le problème de l'intentionnalité dont nous avons parlé plus haut. Ce problème est généralement résolu par l'expert chargé de construire la base de données dans les systèmes actuels. On peut cependant s'interroger sur la pertinence de cette idée qui voudrait que la solution (et donc la décision) soit un simple problème d'agencement de données résolu par le modèle proposé par l'outil utilisé.

Les outils utilisés aujourd'hui pour aider la décision sont essentiellement organisés autour du modèle relationnel pour les Systèmes de Gestion de Base de Données (SGBDR), Géo-Relationnels pour les SIG, à base de règles de décision pour les systèmes experts (Systèmes à Base de Connaissance) et environnements d'analyse multicritères. Nous devons donc comprendre leurs fonctionnements dans une démarche d'aide à la décision pour formuler une réponse à la question que nous avons posée ci-dessus.

3.3 Les outils informatiques pour l'aide à la décision

L'introduction de la dimension spatiale dans la manière de gérer un territoire a conduit à développer des instruments d'acquisition d'informations spatiales extraordinaires. A tel point que le problème aujourd'hui n'est plus de se procurer l'information mais plutôt d'identifier dans la multitude, celle qui intéresse. Les Systèmes d'Informations Géographiques sont apparus pour partie à la suite de ces constats.

Les décisions des aménageurs peuvent facilement se prendre maintenant dans un cadre multicritère⁹² où le gestionnaire, à l'aide d'un système à référence spatial, pourra conjuguer des informations spatiales par nature (le bâti, le cadastre...) et/ou par destination (le nom du propriétaire, le n° de parcelle...). En conséquence, il n'existe pas de systèmes décisionnels mais des systèmes d'aides à la décision au sens que définit Bernard Roy [ROY 85]⁹³. La décision du gestionnaire se fondera alors sur la production de cartes (qui seraient ici les modèles donnés par la définition de Roy) successives ou non, destinées à alimenter sa réflexion et son expertise. Le fait de pouvoir conjuguer, dans

un instrument informatique, différents critères relatifs à un problème spatial facilite forcément le règlement de ce dernier. Le décideur pourra tenir compte simultanément de facteurs socio-économiques, politiques, environnementaux contradictoires. Tendre vers un compromis et/ou une optimisation spatiale du territoire devient envisageable plus rapidement grâce à la faculté de spatialisation rapide proposée par les outils.

Jusqu'à présent, la démarche décisionnelle ne semblait pas réussir à s'affranchir de la définition proposée par Roy. L'essentiel de la recherche s'est donc concentré sur l'intégration dans les Systèmes d'Informations Géographiques de modules d'aide à la modélisation des règles de décisions, ou le développement d'outils fondés sur les règles et les critères de décisions. Cette voie a conduit à une distinction assez importante entre le support (l'espace traité, les données spatialisées) et le raisonnement que l'on porte dessus (les règles de décision, de fonctionnement.)

3.3.1 Modéliser les décisions pour permettre des aménagements concertés

Le territoire aménagé ne se réalise que dans un espace fini, borné. En revanche, les perceptions et les usages de ce dernier sont multifformes et dépassent largement le cadre de l'espace physique. Les conflits relatifs à l'aménagement du territoire émergent de cette

⁹² Pour beaucoup, le multicritère concerne uniquement le fait spatial (la pente, l'orientation, les espaces administratifs), il convient de rajouter à ces facteurs, les critères de perception du phénomène en fonction des préoccupations de l'utilisateur du territoire

⁹³ « L'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de

décision[...] / Roy B / Méthodologies multicritères d'aides à la décision / Economica / Paris / 1985

ambivalence. Comment conjuguer sur un même territoire des activités contradictoires comme le tourisme de nature et l'exploitation forestière, un domaine skiable et la protection de la biodiversité ? Une solution consiste à aborder le problème par le biais d'un calcul coût/ bénéfice. Cette approche ne favorise pas véritablement le compromis et bien souvent l'espace aménagé est entièrement capté par l'activité qui génère le meilleur bénéfice au détriment de toutes les autres. Des approches différentes ont donc été développées pour chercher des solutions moins tranchées.

- **L'approche par Système d'Information Géographique**

L'une de ces approches consiste à s'appuyer sur la cartographie, principalement pour le caractère univoque qu'elle suggère mais également pour la démarche itérative inhérente au SIG. Certains SIG modernes autorisent maintenant l'introduction de nuances dans les décisions en permettant la simulation spatiale des effets d'une décision politique renforçant encore l'intérêt de l'emploi d'un vecteur cartographique. Eastman [EASTMAN 1993]⁹⁴ montre que ces outils peuvent devenir des instruments de modélisation du processus décisionnel. Pourtant, alors même que les publications foisonnent dans les domaines des sciences informatiques, de gestion et en recherche

opérationnelle, les géographes tardent à investir un champ propice à leur action. Laaribi [LAARIBI 2000] montre pourtant tout le gain que le développement d'une telle approche pourrait apporter dans un contexte d'analyse spatiale.

- **Les systèmes experts et l'approche multicritère**

Une autre méthode consiste à aborder la résolution du problème à partir de règles identifiées et mises en action en vue de son traitement. Il s'agit alors de systèmes experts.

L'aide multicritère à la décision réside dans l'ajustement de facteurs qui peuvent se définir dans un intervalle (on parlera de critères) ou par exclusion / obligation (on parlera de contrainte). Ces deux méthodes de résolution de problèmes complexes partagent le fait qu'elles n'intègrent pas la dimension spatiale directement.

Dans le cas des systèmes experts, la méthode de résolution de problème est fondée sur la détermination de règles explicites et déductives construites à partir de la connaissance d'un ou de plusieurs experts. Le programme (moteur d'inférence) cherchera à les appliquer en suivant un raisonnement (chaînage). Ce raisonnement peut être déduit à partir de données initiales, on parlera alors de chaînage avant. On peut également traiter le problème en fonction d'un but à atteindre. Ce deuxième type de raisonnement sera dit

⁹⁴ Eastman JR ; Kyem PAK ; Toledano J ; Jin ; W : *GIS and decision making /Exploration in Geographic Information System Technology/4/UNITAR/Genève/1993*

arrière⁹⁵. Dans le cas de cet outil, le résultat est déjà connu et fait partie d'une série de solutions possibles proposées par l'expert et introduites dans le programme. Le choix sera donc **le meilleur** parmi ceux qui sont possibles. Dans cette approche, le compromis et l'émergence d'une solution non prévue au départ ne peuvent pas exister.

L'approche par aide multicritère à la décision se montre plus souple. Il ne s'agit pas de mettre en évidence une vérité cachée mais plutôt de converger vers une solution en aidant le décideur à mesurer la portée de ses données sur l'établissement de la solution. Elle se rapproche donc de notre projet sur un plan conceptuel mais elle considère le fait spatial comme isotrope. Il sera de surcroît circonscrit aux critères choisis, ce qui en offre une image plutôt réductrice. Cependant, cette méthode donne des résultats importants dans le contexte d'une problématique qui peut être celle d'un choix, d'un tri ou d'un rangement entre plusieurs options.

L'approche multicritères se définit comme un processus enclenché au moment où la perception d'un problème de décision est mise au jour. Amor Laaribi [LAARIBI 2000] dégage trois grandes phases de ce processus :⁹⁶

-« L'intelligence du problème :
identification de la situation de
décision, définition des objectifs et de la
famille de points de vue,

- la conception : définition des actions
ou des scénarios et construction des
critères,

- le choix de solution(s) : évaluation des
actions ou des scénarios sur la base
des critères en présence et agrégation
des évaluations obtenues pour le choix
d'une solution. »

L'émergence d'une solution dans cette démarche sera alors une procédure itérative qui implique l'agrégation des critères, le tamisage des variantes de solutions pour en réduire le nombre, le jugement des possibilités restantes pour n'en retenir qu'une seule⁹⁷.

Il apparaît nettement que toutes ces méthodes éclairent le même sujet selon des angles différents. Le chemin emprunté par chacune des méthodes pour traiter de problèmes spatiaux selon un point de vue contradictoire n'est cependant pas ressemblant. L'une abordera la question du point de vue des acteurs (multicritère et systèmes experts) alors que l'autre réduit la résolution du problème à une controverse spatiale et factuelle (SIG).

Développer une théorie de la conséquence du fait décisionnel sur l'espace (ce qui est le cas quand on résout un problème spatial dans un contexte d'opposition de points de vue) se révèle probablement plus ambitieux que traiter le problème de l'aménagement d'un territoire suivant une démarche de pure spatialisation. Pour la première, il s'agirait d'aborder l'espace à partir du discours que l'on porte sur lui (elle

⁹⁵ Le lecteur intéressé par la technique des systèmes experts peut consulter l'ouvrage de Jean Louis Ermine [ERMINE 1989] pour plus de précisions

⁹⁶ [LAARIBI 2000] page 57

⁹⁷ Pour l'approche multicritères, les ouvrages de Scharlig [SCHARLIG 1996] et Roy [ROY 1985] ; [ROY et BOUYSSOU 1993] permettront au lecteur de mieux appréhender cette méthode d'aide à la décision

est donc plutôt qualitative) alors que la seconde sera empirique⁹⁸ et quantitative.

Tout se passe alors, sur le plan technique, soit au sein d'une base de données géographiques, soit dans l'établissement de critères de description du réel et de leurs règles d'usage dans les environnements de type systèmes experts ou multicritère. Les problèmes qui se posent relèvent au final, de stratégies de stockage des données pour l'approche par SIG, ou par résolution de problèmes d'identification, d'enchaînement de règles et d'évaluation des possibilités proposées par l'agencement des critères pour l'approche par systèmes experts ou multicritère.

L'approche heuristique se propose d'associer les deux voies. L'information définie de façon floue sera une propriété de l'entité spatiale minimale au sein d'un environnement SIG qui reste, lui, tributaire d'un enchaînement logique sur le plan du traitement de la donnée. Peut-on stocker cette information floue au sein d'une base de données géographiques et en faire usage? Comment celle-ci est elle structurée pour permettre l'expérimentation ?

3.3.2 La modélisation des données spatiales dans une base de données

Les bases de données comprenant une dimension spatiale sont manipulées à l'aide de Systèmes d'Informations Géographiques. Denegre [DENEGRÉ, SALGE 1996] propose

⁹⁸ au sens des sciences de l'observation des faits tels que le conçoivent LOCK ou BACHELARD

une règle de définition des SIG à partir de cinq caractéristiques : la règle des cinq A.

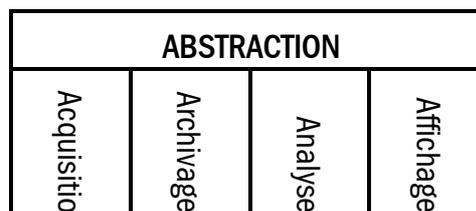


Figure 3-5: Principes des SIG

Source : Denegre 1996

Selon cette règle, un SIG doit permettre les quatre manipulations possibles des données géographiques présentées verticalement sur la figure 3-5. La dernière caractéristique, l'abstraction, est une conséquence de la modélisation des données et de leur traitement dans l'environnement. En effet, un certain nombre de détails du monde réel ne peuvent pas être appréhendés, ni dans la saisie ni dans l'analyse.

Il existe deux familles de SIG, chacune adaptée à la manipulation de phénomènes du réel aux propriétés spatiales spécifiques. Les SIG raster traitent de l'information continue dans l'espace comme l'altitude, la température ou les précipitations. Les SIG vecteurs autorisent la manipulation d'objets spatiaux discrets dans l'espace comme des bâtiments, des parcelles cadastrales, des limites administratives.

3.3.2.1 Le niveau géométrique des SIG : l'information spatiale par nature

Chacun de ces SIG présente ses propres modes de représentation géométrique des objets qu'il traite. Dans le cas de la famille raster, il n'existe qu'une seule sorte de

primitive géométrique, la cellule⁹⁹. Les cellules assemblées en **matrice géoréférencée**, permettent de reconstituer une carte où les objets modélisés du réel apparaîtront comme une suite, de taches de couleurs, contiguës ou non¹⁰⁰

Les SIG vecteurs proposent **trois primitives** de représentation pour traduire le réel dans leur environnement : le point, la ligne brisée et le polygone. En combinant ces primitives, il est possible de construire les représentations du

réel les plus complexes. Par exemple, une rivière sera composée d'une suite de lignes brisées, un point marquera la position d'un arbre et un polygone, un bâtiment. La modélisation revient donc à identifier les plus petites entités du réel dont on ne peut plus réduire la géométrie à l'échelle qui nous intéresse. Comme ce niveau de réduction ne présente que trois possibilités, il devient alors facile de les transcrire dans la base de données.

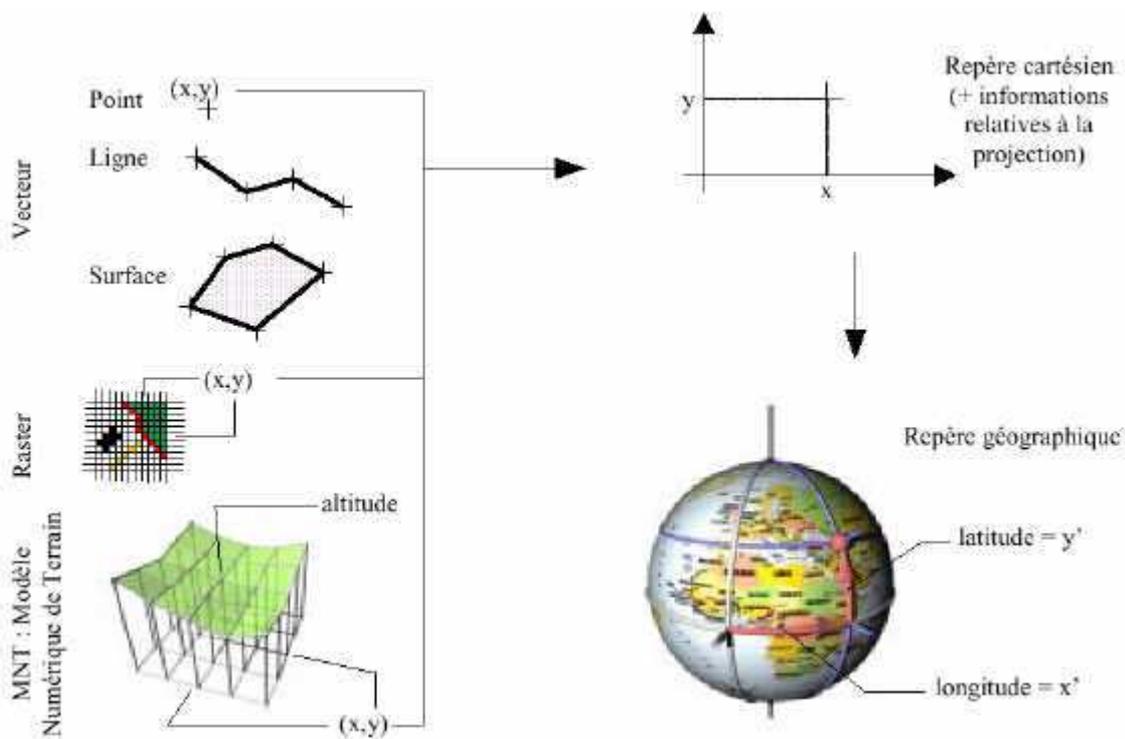


Figure 3-6: Les deux modes de représentation du réel dans un système à deux dimensions

Source : De la Losa 2000

⁹⁹ Cette cellule prend la forme d'un carré ou d'un rectangle le plus souvent. Il existe cependant des Outils qui proposent des cellules en forme d'hexagones. Cette structure améliore considérablement la contiguïté de celles-ci.

¹⁰⁰ Le principe de visualisation des objets du Sig raster correspond à la coloration de la cellule en fonction de la valeur numérique qui lui est affectée. Généralement cette coloration se fait à partir des standards de la table ANCI

Bien que ces deux modes de représentation soient fondamentalement différents, les deux familles de SIG partagent une propriété qui les différencient, les uns des logiciels de Dessin ou Conception Assistée par Ordinateur (CAO ; DAO) et les autres, des logiciels de retouches d'images. L'information géographique est une représentation du réel, elle doit donc pouvoir être située de façon précise. Les SIG permettent le stockage des coordonnées cartésiennes des objets qui composent la base de données. On peut alors intégrer leurs positions dans les opérations d'analyse spatiale. L'usage d'une projection ne sera requis que lors de la visualisation en plan de ces données et pas lors de leur manipulation.

3.3.2.2 L'information spatiale par destination : particularité des SIG vecteurs

La puissance d'analyse des SIG n'est pas simplement contenue dans leur capacité de modélisation et de géoréférencement du réel. Pour les SIG raster, le caractère numérique des données et l'exploitation de la connexité des cellules permet des traitements statistiques ou algébriques complexes comme le calcul d'une surface de difficulté de déplacement en fonction de la valeur de chaque cellule (les zones les plus difficiles porteront alors les valeurs les plus hautes) ou l'interpolation des mesures de température à partir d'un semis non régulier.

Dans le cas des SIG vecteurs, cette puissance d'analyse naît de l'utilisation **simultanée** de l'information spatiale par nature décrite ci dessus avec des relations sémantiques entre

les objets eux-mêmes dans l'espace et la description lexicale qui leur est attachée. Des requêtes complexes peuvent alors exister comme : la sélection des remontées mécaniques à moins de 150 mètres d'habitations privées. Les relations sémantiques entre objets utilisent les propriétés topologiques du plan. Elles sont **dérivées** de la géométrie et de la position de tous les objets du plan. L'information spatiale par destination concerne donc seulement toutes les données non géométriques affectées aux objets en particulier comme le nom du propriétaire du bâtiment, sa hauteur, sa nature. Elles introduisent un niveau supplémentaire de description du réel qui n'est pas accessible au modèle Raster car il est impossible d'une part, d'affecter d'autres informations que numériques à la cellule et d'autre part, cette information est également **unaire**.¹⁰¹

¹⁰¹ Dans les SIG Raster, il est impossible d'affecter plusieurs valeurs en même temps à une cellule. Il est toutefois possible d'établir des liens avec un SGBDR chargé de stocker des attributs différents (toujours numériques) de la cellule.

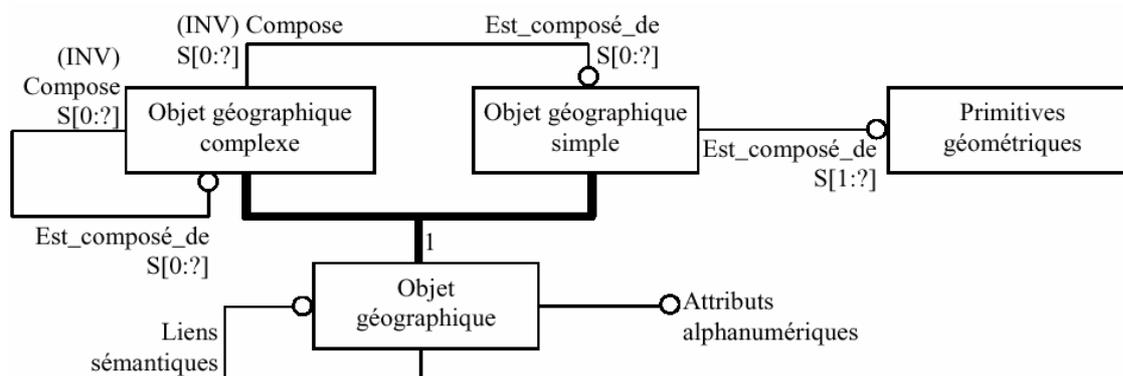


Figure 3-7: Modèle des données en SIG vecteur ; notation Express [CEN 1996]

Cette organisation des données est caractéristique des outils SIG vecteurs qualifiés de géo-relationnels. C'est à dire qu'il existe une séparation entre les données géométriques et les données attributaires des objets. Ce modèle repose sur un certain nombre de pré-requis pour exprimer toute sa puissance :

- L'information est structurée en couches thématiques (certains SIG ne proposent que des structures géométriques pour cette structuration ; une ou plusieurs couches pour les points, d'autres pour les linéaires, d'autres pour les polygones et sont cependant perçus comme géo-relationnels.)
- Le modèle repose sur l'exploitation des relations topologiques. La donnée doit donc être exempte d'erreurs de ce type comme deux droites qui se croisent sans qu'il existe un point (sommet) à l'intersection.

Bien que performant, ce modèle présente un certain nombre de limites notamment au

niveau descriptif. Les informations alphanumériques sont inséparables des entités « objet géographique. » Pourtant, il existe également une hiérarchie des informations descriptives comme il en existe une entre objets géographiques complexes et simples. Il est impossible dans ce modèle de traduire cette hiérarchie. Cela est dû au principe de séparation attributaire et géométrique en tables distinctes. Il ne peut donc exister qu'un seul niveau hiérarchique de description attributaire des objets : celui des objets de la table de géométrie à laquelle cette description attributaire est liée.

Or, certaines informations attributaires existent à d'autres niveaux hiérarchiques : celui des objets spatiaux complexes, un domaine skiable par exemple (son nom, le nombre de pistes proposées et leur kilométrage...). Cette différenciation est possible dans un contexte de modélisation objet et renvoie à la notion d'héritage.

Cette notion, et certaines autres, relatives à l'approche objet de la modélisation des données, proposent un cadre capable de

traduire le modèle théorique de l'approche heuristique en modèle conceptuel, logique, et, nous le verrons plus bas, en modèle physique, implémenté dans un environnement de simulation.

3.3.3 Une approche objet de la donnée pour une nouvelle construction de la décision

L'approche objet se montre particulièrement efficace dans sa capacité de description et de maniement des entités du monde réel. La gestion des données et de leurs procédures de manipulation se fait sous une forme « naturelle » au travers d'une unité sémantique : l'objet.

Les concepts objets sont nombreux et l'unanimité concernant leur définition reste encore en projet¹⁰². Cependant, ces multiples concepts peuvent se regrouper dans quatre catégories [AYACHE et FLORY 1996] :

- Celle de la description de l'aspect structurel de l'objet,
- Celle de la description du volet comportemental de l'objet,
- Celle de la description des associations entre objets,
- Celle qui est relative aux fondements théoriques de l'approche objet.

Nous ne décrivons pas là l'ensemble de la théorie mais nous chercherons plutôt à expliquer les points de cette approche que

¹⁰² Notamment, il s'agit d'établir une distinction entre la programmation objet, la modélisation objet et la base de données objet

nous utilisons dans notre démarche et dans l'environnement informatique.

Nous rappelons que notre projet consiste à résoudre un problème d'aménagement à l'aide de l'approche heuristique. Celle-ci est permise par l'appel, la visualisation et l'interaction d'objets spatiaux minimums dans un environnement de réalité virtuelle qui permet la simulation. L'approche objet est la seule, pour nous, qui permet d'atteindre ces objectifs à travers trois concepts fondamentaux.

3.3.3.1 Définition des concepts : l'objet ; la classe, l'héritage et la position des attributs

Ces trois concepts fondamentaux constituent le cœur de l'approche objet. Leur utilisation, même simplifiée, justifie la qualification objet de notre démarche.

• Définition de l'objet

Un objet est un élément identifiable du monde réel qui peut être, soit concret (on peut le voir), soit abstrait (c'est sa création ou sa disparition qui témoigne de son existence). Il est caractérisé par sa structure, le niveau attributaire, et son comportement : sa façon d'agir ou de réagir.

Par exemple, une remontée mécanique est un objet concret.

Ses propriétés de structures sont : longueur ; nombre de pylônes ; débit horaire

Son comportement est : démarrer ; s'arrêter

L'entreprise domaine skiable est un objet abstrait

Ses propriétés de structure sont : nombre de salariés ; chiffre d'affaires

Son comportement est : vendre des forfaits ; maintenir son outil de travail ; payer ses salariés

Chaque objet est unique en tant que tel ; Il possède un identifiant qui lui est propre et qui est indépendant de sa structure ou de son comportement comme le n° de sécurité social pour chacun d'entre nous. On peut donc stocker une multitude d'objets semblables en structure et en comportement et il est possible de les identifier individuellement.¹⁰³

• La notion de classe

L'objet correspond au composant de base de notre système. Celui-ci est appelé à gérer des ensembles d'objets. Il est logique, dès que le nombre survient, de dégager des catégories où un certain nombre d'objets partagent leurs propriétés et leurs comportements. Ce regroupement prend le nom de **classe**. Les objets membres d'une classe sont appelés instance. Créer un nouvel objet revient donc à instancier la classe. Par exemple, l'objet pylône N°1 de la remontée des « écureuils » est une instance de la classe « remontée mécanique ». L'objet pylône N°1 de la remontée des « tortues » est également une instance de cette classe.

¹⁰³ Cette qualité est également partagée par le modèle géo relationnel

Dans l'absolu, il est possible d'emboîter les classes les unes dans les autres jusqu'à parvenir à une seule super-classe qui engloberait toutes les autres et par extension tous les objets.

• La notion d'héritage

Le concept d'héritage découle de la possibilité pour les classes de s'emboîter entre elles. Dans le réel, un objet peut faire partie de plusieurs classes. Le pylône N°1 de la remontée mécanique des « écureuils » fait par exemple partie de deux classes qui sont : la classe RM et la classe pylône. La classe pylône se justifie car certaines spécificités de cet objet ne sont pas contenues dans la classe RM. L'héritage est le mécanisme qui autorise le transfert de propriétés de la classe « générale » vers la classe « spécialisée. »

Figure 3-8

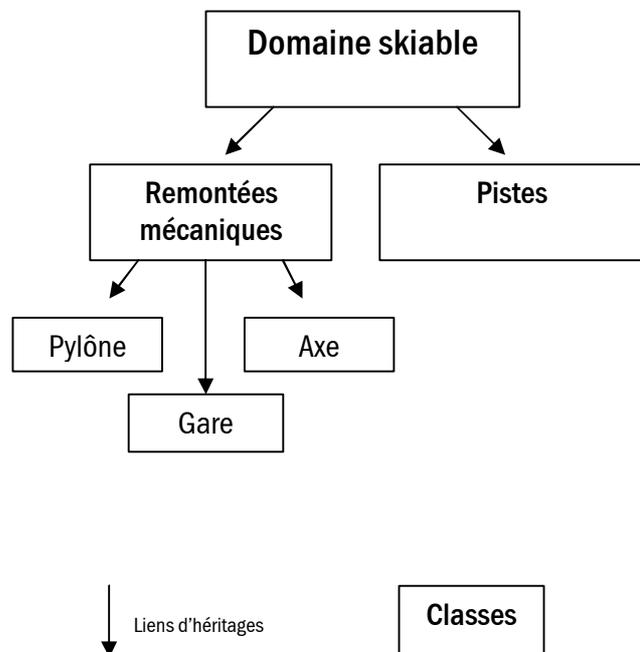


Figure 3-8: Exemple d'héritage et de classes pour la modélisation d'un domaine skiable

La notion d'héritage est un des concepts fondamentaux de l'approche orientée objet. Cependant, le manque de consensus sur celui-ci nous oblige à clarifier notre position par rapport à notre projet. L'héritage sera, pour nous, un mécanisme définissant un lien intentionnel entre classes par affinements successifs. C'est à dire dans le sens de la spécialisation. Nous l'utiliserons également dans son développement simple. Une classe ne peut hériter que d'une seule super-classe à la fois contrairement à l'héritage multiple qui autorise l'héritage simultané de plusieurs super-classes sur une classe spécialisée.

- **La position des attributs**

Sur le plan interne (valeurs, listes, multimédia...), les attributs proposés en approche orientée objet ne diffèrent pas de ceux de l'approche géo-relationnelle. En revanche, les notions de classes et d'héritage autorisent beaucoup plus de souplesse pour la modélisation du réel en fonction des différences d'échelles d'objets.

Dans l'approche traditionnelle, il n'existe qu'un seul niveau attributaire possible, structurellement lié au phénomène du tableau à double entrée, en ligne et en colonnes proposé pour la manipulation des données. Nous avons dit plus haut que cela posait des problèmes pour le traitement des objets complexes qui constituent ici une échelle plus petite par rapport aux objets primitifs dans l'espace modélisé. L'exemple qui nous sert de fil conducteur jusqu'ici, les remontées mécaniques, est caractéristique de ce

phénomène. Il est composé de plusieurs classes spécialisées, « les pylônes », « les axes », « les gares » emboîtées dans une super-classe « remontée mécanique. » Chacune de ces classes spécialisées possède ses structures et ses méthodes. Chaque objet les reprend au niveau individuel¹⁰⁴. Aucune des classes spécialisées ne contient toute la description des propriétés de l'objet complexe « remontée mécanique ». On pourrait penser que leur addition rendra compte de l'objet complexe mais rien ne nous permet de dériver une propriété particulière à une catégorie d'objets en caractéristique générale. Parfois, cela n'a même aucun sens. La hauteur d'un pylône est elle celle de la remontée mécanique tout entière ? L'objet complexe « remontée mécanique » possède donc ses propres spécificités au niveau global. En revanche, ces dernières doivent être partagées par les objets primitifs pour éviter les contradictions. Cette relation peut se traduire par l'expression : « -est partagé par- ». L'attribut Nom (de la remontée mécanique) est, par exemple, « partagé par » l'ensemble des objets instanciés dans les classes (pylône, axe, gare) qui héritent de la super classe.

Cette méthode permet de remplir d'informations adaptées toutes les inter-constructions possibles des objets de la base en considérant que l'objet complexe qui émerge est également générateur de structures et de méthodes qui lui sont propres. Exactement comme un tableau de maître qui,

¹⁰⁴ La classe la plus spécialisée définit finalement la structure et les méthodes des objets élémentaires. La différence avec l'objet sera qu'elle ne possède pas d'existence « physique » alors que celle de l'objet est attesté par son identifiant.

une fois terminé, représente plus que les coups de pinceaux qui ont servi à sa création. Cette propriété de l'approche objet, que l'on retrouve dans le questionnement géographique, définit une des conditions essentielles pour la concertation par approche heuristique. C'est à dire, permettre l'analyse spatiale sur plusieurs niveaux d'échelles présents dans la scène.

- **Un moyen puissant pour construire un paysage de concertation**

Ce mode de description du réel se montre particulièrement efficace pour embrasser sa modélisation dans une perspective de concertation. L'identification de l'objet dans l'esprit, induit toujours une information supplémentaire relative à son comportement. Dans notre perception, l'objet « remontée mécanique » induit bien une information que l'homme aborde de façon implicite mais qui est bien là et qui concerne son comportement (démarrer, s'arrêter). Généralement l'aspect comportemental de l'objet est tellement relié à l'objet perçu qu'il est parfois difficile d'en déterminer les structures ni même de s'assurer que l'on modélise vraiment le niveau primitif. Conceptualiser cette information revient donc à préciser les différences entre structure et comportement ce qui oblige à s'interroger sur ce que cet objet représente par rapport au réel. Les contours de l'objet¹⁰⁵ sont alors mieux cernés et la modélisation s'en trouve améliorée : deux objectifs que nous

poursuivons avec l'approche heuristique. Il offre de surcroît l'avantage de s'extraire de la représentation du réel en fonction d'une géométrie (point, ligne, polygone) qui prenait le rôle d'instrument de modélisation dans l'approche géo-relationnelle. L'objet signifiant du réel est alors replacé au centre du problème de modélisation en étant considéré pour lui-même.

Ce dernier éclairage sur la modélisation représente l'arc boutant conceptuel de notre projet heuristique. En effet, pour que l'approche que nous proposons dépasse un cadre strictement théorique, il faut répondre impérativement à deux critères.

Le premier est conceptuel et concerne tout le travail de modélisation d'un espace perçu à l'aide d'entités primitives formant des blocs de perception du réel. Ces derniers sont positionnés dans un espace formel orthogonal à N dimensions, autant que d'acteurs du territoire. Par exemple, dans le cas de l'aménagement d'un domaine skiable, l'espace formel proposera 4 dimensions au moins : celle de l'acteur « aménageur du domaine skiable », celle de l'acteur « écologiste », celle de l'acteur « décideur institutionnel, maire, conseil général » et celle de l'acteur « habitants locaux. » L'approche par objet fournit tout le cadre théorique nécessaire pour autoriser le travail de positionnement en permettant de décrire ce que sont ces objets dans un espace géométrique et également perçu.

Le second critère est plus technique et lié au mécanisme d'aide à la concertation choisi pour appliquer la démarche heuristique. Cette

¹⁰⁵ L'objet et non pas l'entité qui ne permet pas le traitement du comportement mais seulement de la structure

dernière en pratique, s'opère par reconstruction en temps réel dans un environnement informatique chargé de restituer un paysage : celui qui serait commun à tous les acteurs du territoire¹⁰⁶. Les objets forment dans cet environnement des briques primitives qui doivent pouvoir être appelées et chargées dans l'instrument de restitution en réalité virtuelle avec toutes leurs caractéristiques. Les bases de données objets sont capables de traduire ce type de manipulation sur le plan informatique. SIMUL-IMAGE devra donc correspondre sur le plan du stockage des objets discrets du territoire, à une architecture orientée objet. De cette façon, le paysage perçu pourra être reconstruit en interactivité avec tous les acteurs du territoire.

3.3.4 La Géomatique interactive : les nouveaux moyens d'aider la concertation

Roy [ROY 1985] a montré que les SIG pouvaient alimenter une décision par un processus de production de cartes successives ou non. Easteman [EASTEMAN 1993] a proposé des modules incluant un volet d'aide à l'aménagement concerté par la modélisation de la portée spatiale de facteurs qui influencent cette décision. Cette approche a permis d'inclure un espace anisotrope dans le processus d'aide à la décision, par le biais de la géomatique. En revanche, la modélisation du processus décisionnel d'un

point de vue global reste traditionnelle. Le modèle proposé par Simon en 1960 [SIMON 1960] demeure d'actualité tout au moins dans son acception générale (Figure 3-9).

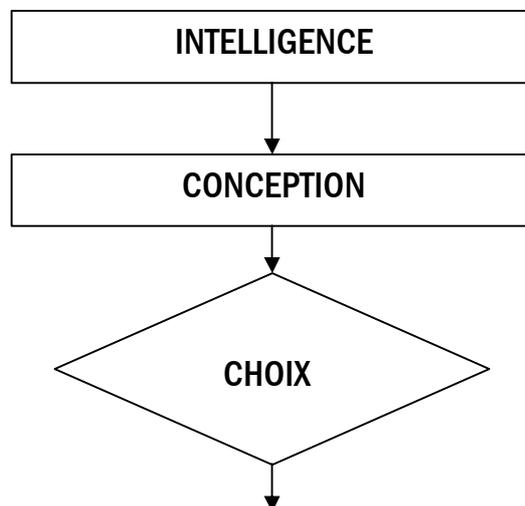


Figure 3-9 : Modèle du processus décisionnel de SIMON

Source : [LAARIBI 2000]

L'essentiel de l'effort a porté principalement sur le raffinement des méthodes de conceptualisation dans ce cadre et sur le développement d'outils employés successivement en vue de converger vers une solution. Dans ce contexte, on peut comprendre que la production cartographique n'ait jamais été envisagée comme un moyen mais plutôt comme une fin. Elle sanctionne un processus à un instant T mais ne sert que le volet communication d'un résultat. La convergence vers une solution adoptée par toutes les parties en présence est donc nécessairement segmentée en deux temps :

- celui du travail d'analyse et de production cartographique des solutions possibles en premier lieu,

¹⁰⁶ Commun parce qu'ils l'auraient construit ensemble

- celui de la concertation autour des documents produits dans un second temps.

Si l'analyse et les solutions proposées ne conviennent pas, le processus recommence au premier niveau de la figure 3-9 en intégrant les nouvelles données. On mesure facilement le temps qu'il convient d'investir pour parvenir à un résultat accepté par toutes les parties. En revanche, si le décideur est également l'utilisateur du SIG (ou de tout autre système), il réagira en « temps réel » aux informations produites par son analyse. La vitesse de convergence s'en trouvera considérablement accélérée. Ce décideur utilisateur se situe dans le contexte heuristique que nous cherchons à mettre en place. Le problème se réduit donc à une seule question : Est-il possible de conserver une réaction en temps réel et de modifier la carte également en temps réel face à plusieurs acteurs aux perceptions contradictoires du territoire ?

3.3.4.1 Animer la convergence par la cinématique SIG : Réalité virtuelle, cartographie dynamique et interactivité

Répondre à la question ci-dessus passe invariablement par le concept d'exploitation de l'image et de ses variables. On retrouve ici les thèmes proposés par Ferland [FERLAND 1997] et l'éventuelle question d'extension d'une nouvelle catégorie de variables à celles proposées par Bertin [BERTIN 1976]. La synthèse d'images et le temps réel utilisent déjà l'essentiel de ces nouvelles variables dont beaucoup sont pressenties par Ferland et Thomas [THOMAS 2001]. Ces variables

d'exploitation ne sont possibles qu'au sein d'un environnement informatique. Elles cessent donc d'être dès que l'image passe sur le papier. Elles se regroupent dans deux catégories ; celles qui sont relatives à l'amélioration du réalisme de l'image et celles qui transcendent le plan cartographique jusqu'ici inerte comme la possibilité de se déplacer en temps réel dans la scène. La mise en relation de ces deux catégories propose une définition de la réalité virtuelle.

• L'amélioration du réalisme de l'image

Les techniques de la synthèse d'image permettent de modéliser le réel sur un plan visuel proche de notre quotidien. Quand ces dernières sont exploitées à leur maximum, les résultats obtenus sont surprenants de réalisme¹⁰⁷ (Figure 3-10). Fondamentalement, l'amélioration de l'image correspond à l'exploitation avancée des volumes pour les objets discrets (modélisation 3D) et de la réflexion de la lumière sur ces volumes en fonction des matériaux choisis pour les représenter (bois, eau, pierre...) A chacun de ces matériaux correspond une équation de réflexion exploitée par un moteur de radiosité. Sur un plan théorique, on peut considérer que ces variables étaient déjà contenues dans la théorie de Bertin.

¹⁰⁷ On parle alors de vérisme



Figure 3-10: Exemple de paysage reconstitué entièrement en synthèse d'Images

Sources Société Kalibblue-Infographiste R.Fantino

Le volume n'est qu'un raffinement de la variable taille et la radiosité, un dérivé de la valeur. Les logiciels d'effets spéciaux du cinéma, d'architecture ou de jeux vidéo ont donc simplement affiné le volet sémiologique de la théorie de Bertin.

Les SIG restent encore très frileux quant à l'emploi de ces techniques (même pour la 3D) alors qu'elles sont d'utilisation courante dans des registres où la question de la représentation fine du réel se pose tous les jours. Les techniques de la synthèse d'image appliquées à la géographie proposent pourtant de nouveaux axes de recherches théoriques mais notre propos n'est pas de les développer ici.

- **Exploiter la troisième dimension du plan : méthodes et stratégies**

L'usage de la troisième dimension du plan, propriété indispensable de la réalité virtuelle, réclame quelques précisions qui justifient ce paragraphe. Le support de représentation, qu'il soit écran d'ordinateur ou papier, est toujours bidimensionnel. On a donc développé des artifices pour donner une impression de relief aux scènes dessinées. L'ombrage et la perspective sont les premières techniques inventées pour rendre compte de la troisième dimension. Le développement des ordinateurs permet de les utiliser aujourd'hui facilement. Une autre approche consiste à exploiter l'effet stéréoscopique naturel de notre vision. Cette méthode permet de rendre tridimensionnelle une visualisation à partir d'affichage bidimensionnel de deux images de la même scène prises d'endroits différents. Les cartes topographiques sont d'ailleurs construites à

l'aide de ce procédé. Enfin, la notion de mouvement renforce considérablement l'impression de volume. Devant notre écran d'ordinateur, il n'est pas possible d'exploiter l'effet stéréoscopique sans équipement adéquat. En conjuguant perspective, ombrage et mouvement, nous pouvons restituer un effet tridimensionnel efficace. La notion de mouvement permet de connaître avec un œil seul (ce qui correspond à la situation devant l'écran d'ordinateur) si l'on se trouve en face d'un objet ou bien en face d'une de ses représentations. (Figure 3-11)

Si le mouvement concerne l'objet lui-même, alors nous verrons l'objet sous un autre angle (Figure 3-11 bas droite). En revanche, si le mouvement est appliqué sur sa représentation, nous verrons une modification de celle-ci et l'objet représenté ne sera plus celui de départ (Figure 3-11 haut droite). Il convient donc, pour notre projet, d'utiliser des outils qui effectuent les opérations de mouvement sur les objets eux-mêmes avant leur affichage et non, à posteriori, sur leur représentation.

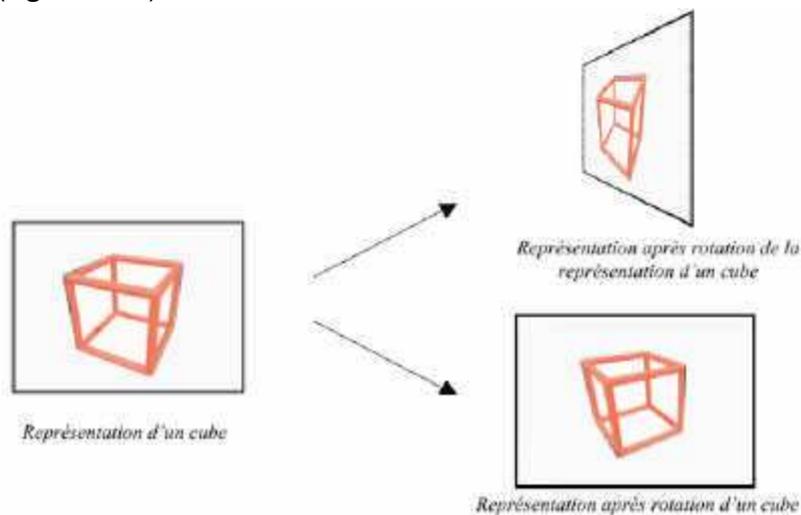


Figure 3-11 : Implication du mouvement sur un objet pour la perception de son caractère tridimensionnel

Source : De la Losa 2000

• Les variables d'exploitation de l'image

Les variables d'exploitation de l'image sont nouvelles et n'appartiennent pas à la théorie de Bertin. Le déplacement dans la scène en temps réel et les facteurs d'ambiance sont de celles-ci. Le déplacement en temps réel au sein d'un environnement 3D permet de modifier les angles de vue à volonté. On se rapproche donc de la façon dont on utilise l'espace dans notre quotidien qui est rempli

d'objets volumiques autour desquels nous évoluons en permanence. Notre compréhension des phénomènes complexes s'en trouve considérablement renforcée. L'imagerie médicale, la mécanique de précision, l'urbanisme et l'armée l'ont bien compris et l'utilisent couramment.

Souvent, on considère uniquement la 3^{ème} dimension comme moyen d'amélioration de la puissance de compréhension. Nous pensons

que celle-ci ne peut pas véritablement servir si nous ne pouvons pas également agir sur les angles de vue. Cela peut se faire de trois façons : en choisissant un angle préalable au calcul d'une image fixe (un panorama réaliste), en produisant du « temps calculé » (un film en images de synthèses) ou en temps réel (des simulateurs). L'exploitation maximale du potentiel explicatif de la scène 3D est, bien entendu, atteint quand on peut naviguer à l'intérieur à sa guise. C'est la raison pour laquelle nous considérons que le mouvement est une variable nouvelle d'exploitation de la cartographie et qu'elle doit être inséparable de la notion de 3D.

Les facteurs d'ambiance sont destinés principalement à rendre compte d'une atmosphère. Qui n'a pas déjà éprouvé des sentiments contradictoires face à un paysage découvert un jour sous la pluie, à un autre moment sous la neige ou le soleil. Il sera perçu différemment pour ce qui en émane. Dans notre projet, le paysage doit « coller » au plus près à la réalité. Cette dernière se déploie également dans des ambiances car notre espace perçu évolue aussi en fonction de la météo. Une image « idéale » (au soleil à 12 heures, le 21 juin) peut n'être pas particulièrement adaptée dans beaucoup de cas. Que penser d'un simulateur de vol qui ne proposerait que des sessions en plein jour par beau temps ? Ici encore, les facteurs d'ambiances permettent d'exploiter l'image dans des registres plus importants que sa simple représentation. Ces variables, par le potentiel offert d'exploitation de la scène sont inséparables du projet heuristique d'aide à la concertation. Cependant, elles ne suffisent

pas et les instruments de restitution de la scène doivent posséder d'autres qualités pour permettre la mise en œuvre de l'approche heuristique.

- **Cartographe dynamiquement pour aider la concertation**

Pour parvenir à une concertation efficace, il convient de pouvoir construire facilement un paysage. Les actions entreprises par les acteurs du territoire doivent être restituées dans la scène 3D le plus rapidement possible. Il ne s'agit pas ici de temps réel car, du temps s'écoule entre la décision (créer un objet comme une piste de ski par exemple) et son apparition effective dans la scène. Cependant, cette action de création / destruction doit être la plus rapide possible. Nos instruments informatiques de reconstruction en réalité virtuelle doivent donc proposer un pseudo temps réel pour la construction de la scène. A ce moment, les acteurs du territoire n'auront qu'à puiser dans des catalogues d'objets (on mesure ici tout l'intérêt de l'approche objet dont nous avons décrit les principes plus haut) pour construire le paysage et le modifier à mesure qu'évolue la concertation.

Nous avons maintenant décrit la plupart des outils conceptuels qu'il nous faut pour une mise en action de l'approche heuristique en simulation visuelle. Il ne nous reste plus qu'à déterminer quel type de 3D à utiliser pour qu'un prototype informatique d'aide à la concertation soit envisageable.

3.3.4.2 Présentation de la troisième dimension dans les SIG : une technologie en devenir

Les travaux d'intégration de la troisième dimension dans les SIG, particulièrement ceux du mode vecteur, sont récents. VAN OOSTEROM [VAN OOSTEROM et al 1994] propose de rajouter un attribut Z à chacun des points stockés d'une base de données géographique de type vectorielle. Cette méthode est appelée $2D^{1/2}$. Le Z est en effet dépendant de la position X et Y du point stocké. Le réel tridimensionnel est exprimé par l'indépendance des trois axes X, Y et Z du plan. La $2D^{1/2}$ se trouve donc limitée par des contraintes assez importantes. On ne peut pas, par exemple, superposer plusieurs points. Il est également impossible de représenter des formes particulières du terrain comme des surplombs. Cette dernière limite est abolie si l'on se cantonne à des petites échelles (en deçà du 1/100 000) où ces variations de terrain n'exercent aucune influence. Enfin, ce mode de restitution se montre finalement assez éloigné du réel quand il s'agit de construire un modèle numérique de paysage. Dans le cas d'une forêt par exemple, on ne stocke, dans une base géographique, que ses contours sous la forme d'un polygone. Le relief à l'intérieur du polygone peut induire des différences mais comme le stockage du Z s'établit sur la géométrie, il est impossible de traduire ces variations. Le problème ici concerne l'épaisseur de l'objet surfacique. La 2.75D [LARUE et al 1992] propose de traduire

l'épaisseur en autorisant le stockage d'une altitude minimale et maximale. Le problème persiste cependant au niveau du raccord entre objets qui possède déjà une épaisseur mais dont le point au sol partage également une altitude. (Figure 3-12)

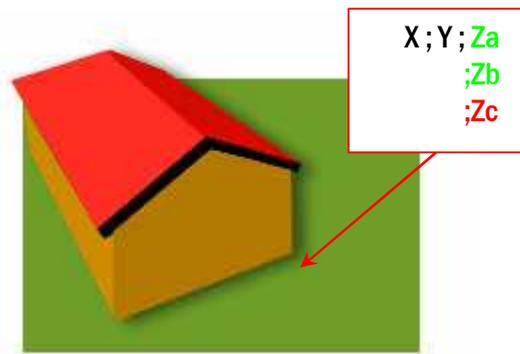


Figure 3-12: Le problème de la 2D75.

Le point de raccord contient déjà deux informations en Z pour déterminer l'épaisseur de l'objet (Za ; Zb). Si l'on respecte le principe de topologie, ce point est également partagé par le terrain qui propose également une altitude (Zc)

La solution actuellement la plus efficace pour l'exploitation de la troisième dimension a été proposée par Cambray [CAMBRAY 1994]. Il s'agit de gérer simultanément une couche en 2D, en $2D^{1/2}$ et en 3D à l'aide de la relation « est posé sur » (Figure 3-13). La couche 2D correspond aux objets dont l'altitude n'est pas une propriété indispensable à leur représentation. La $2D^{1/2}$ restitue le terrain (MNT). La couche 3D permet de représenter des objets complexes ou non mais dont l'altitude est une propriété indispensable à leur représentation.

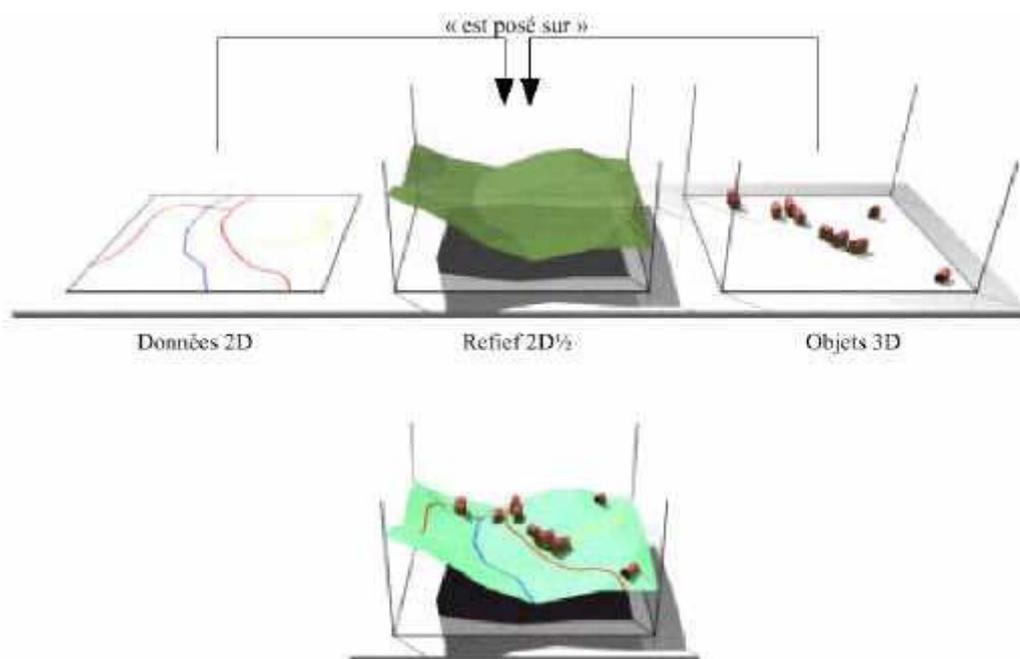


Figure 3-13: Modèle de représentation de la 3D de Cambray

Source : De la Losa 2000

Cette dernière approche est particulièrement intéressante pour nous, même si certaines limites persistent et que d'autres apparaissent. Par exemple, l'usage de la $2D^{1/2}$ pour la représentation du terrain empêche la modélisation de surplombs, nous l'avons vu plus haut. La principale limite est ailleurs. Elle vient de l'absence de partage de géométrie entre les couches. Les opérations de topologie ne peuvent donc pas être exécutées. Cela explique pourquoi, les SIG du marché ne proposent pas d'analyse spatiale à partir de l'environnement 3D.

Pour nous, cette dernière limite ne prête pas à conséquence car les opérations de topologie que nous mettrons en œuvre dans Simul-Image sont à but de modification de la base 3D en vue de traduire l'évolution du paysage. L'analyse spatiale s'effectue entièrement dans le SIG qui restitue les informations au moteur de réalité virtuelle. Ce dernier ne modifie que

la couche 3D en pseudo temps réel après la phase d'analyse. Les opérations permises aux acteurs du territoire concernent la couche 2D du SIG. Cette couche est également celle sur laquelle s'effectue l'analyse spatiale. Elle est dupliquée dans l'environnement de simulation. Le nœud de notre instrument de simulation repose donc sur la vitesse de transfert des informations données par le SIG vers le moteur de réalité virtuelle chargé de traduire ces informations. Par exemple, la création d'une piste de ski ; L'opération de topologie pour sélectionner les arbres contenus à l'intérieur de la zone et leur suppression s'effectue dans la base SIG. Seule, la restitution visuelle du résultat est calculée par le moteur de réalité virtuelle.

La partie conceptuelle de notre projet est maintenant achevée. Nous avons vu qu'il est possible de concevoir un environnement informatique d'aide à la concertation par

approche heuristique. Cet outil doit posséder un certain nombre de qualités. Il doit stocker les données discrètes du territoire par une méthode objet. Il doit également permettre une restitution modifiable d'un paysage entièrement construit en réalité virtuelle. De cette façon, les acteurs du territoire peuvent expérimenter des solutions d'aménagement en temps réel. Nous pouvons donc répondre par l'affirmative à la question posée plus haut du maintien de la capacité de réaction et de modification du support cartographique en présence de plusieurs acteurs du territoire dont les projets et les visions sont opposées. Leurs divergences seront simulées et visualisées en temps réel et le consensus émergera de cette confrontation.

Les pages qui suivent décrivent la structure du prototype SIMUL- IMAGE sur le plan informatique et sur le plan de l'organisation de la donnée. Dans cette partie, nous aborderons les questions de créations, de stockage et d'usage des deux types de données possibles : celles qui sont discrètes et celles qui sont continues. Nous verrons que le choix des techniques d'acquisitions ou d'analyses n'est pas innocent, particulièrement dans un contexte opérationnel.

4 **Simul-Image** : un outil conçu pour la simulation interactive de phénomènes spatiaux

L'approche heuristique dont nous avons brossé les grandes lignes plus haut, prendra dans cette partie un sens appliqué à travers l'étude des effets du changement climatique en montagne, sur l'économie du ski et la préservation de la biodiversité. Le projet de concertation que nous poursuivons s'inscrit dans les oppositions d'objectifs entre la nécessité d'aménagement d'un domaine skiable et les contradictions que cela génère du point de vue environnemental. L'outil que nous allons décrire dans les pages qui suivent peut s'inscrire dans la catégorie des Systèmes d'Informations. C'est à dire qu'il met en jeu des ressources informatiques, des données géoréférencées ou non et enfin, des utilisateurs.

Nous allons expliquer dans cette partie, bien entendu l'architecture de notre prototype mais aussi un certain nombre de concepts relatifs au stockage des données.

Dans une démarche classique de modélisation d'un Système d'Information, cette partie serait qualifiée de volet logique de l'implémentation. Nous acceptons bien volontiers ce terme car il correspond à la démarche que nous poursuivons. Cependant,

nous introduirons quelques nuances à cette qualification. La partie logique d'une démarche de modélisation (de type merise par exemple) résout les questions de l'organisation des données au sein d'un environnement informatique défini, pour répondre aux besoins pour lesquels le Système d'Information est prévu. Nous avons voulu, en plus de cet aspect de modélisation, introduire un volet plus conceptuel autour des moyens d'acquisition et de traitement de la donnée, particulièrement sur le plan de celle qui est continue.

Dans notre travail, cette donnée continue dans l'espace (température et précipitation) est produite à partir d'un semis de stations météorologiques à la suite d'un important travail d'interpolation. Il s'agit donc d'une estimation de la manière dont se déploient ces phénomènes dans notre champ. L'approche heuristique ne pouvait être expérimentée sérieusement que dans un contexte opérationnel. Nous avons donc évalué quelles étaient les méthodes d'interpolation les plus efficaces pour représenter ces phénomènes climatiques et pourquoi. Cette partie de notre travail propose une importante section

conceptuelle et appliquée sur les différentes méthodes d'interpolation que nous pouvons mettre en œuvre sur notre thématique.

L'intérêt de réfléchir aux méthodes de traitement de l'information sur un plan conceptuel est inséparable de l'approche heuristique. En effet, si l'architecture informatique que nous proposons est « universelle », si l'organisation des données l'est également, il n'en va pas de même pour leur traitement. Celui-ci reste tributaire de notre objectif et de sa qualité. C'est sur ce point que nous établissons un lien entre l'aspect purement théorique de l'idée heuristique et sa mise en œuvre dans la thématique du changement climatique en montagne. Le lecteur trouvera donc dans ces chapitres des questions (et des réponses) spécifiques à la donnée de notre champ, la Savoie et la Haute Savoie, relatives à la meilleure traduction spatiale possible des températures et des précipitations ainsi que les moyens d'améliorer leur estimation. Il s'agit simplement d'un travail d'analyse spatiale sur notre sujet mais nous avons souhaité ne jamais perdre de vue l'emploi des résultats dans un contexte heuristique. Cette intégration implique de connaître le plus précisément possible la distance entre le réel et sa modélisation sous forme de données qu'elles soient continues ou discrètes.

Avant d'aborder ces rivages, attachons-nous d'abord à décrire l'organisation de l'environnement informatique.

4.1 Structure et organisation de SIMUL-IMAGE

L'outil que nous avons développé est un méta-système. C'est à dire qu'il ne prend naissance que dans la mise en interaction de plusieurs logiciels. Cinq types de logiciels¹⁰⁸ cohabitent et échangent des données :

- un modèle de circulation climatique,
- un système de gestion de bases de données,
- un SIG raster
- un SIG vecteur.
- un moteur de réalité virtuelle

Ce méta système se compose de deux grandes parties distinctes. La première partie, composée du modèle de circulation climatique, d'une base de données climatiques historique et du SIG Raster est organisée pour la simulation locale des effets du changement climatique (Figure 4-1 en haut). Elle est essentiellement numérique. C'est dans cette partie du système que sont construites les cartes climatiques par interpolation.

¹⁰⁸ Leurs descriptions sont données en annexe

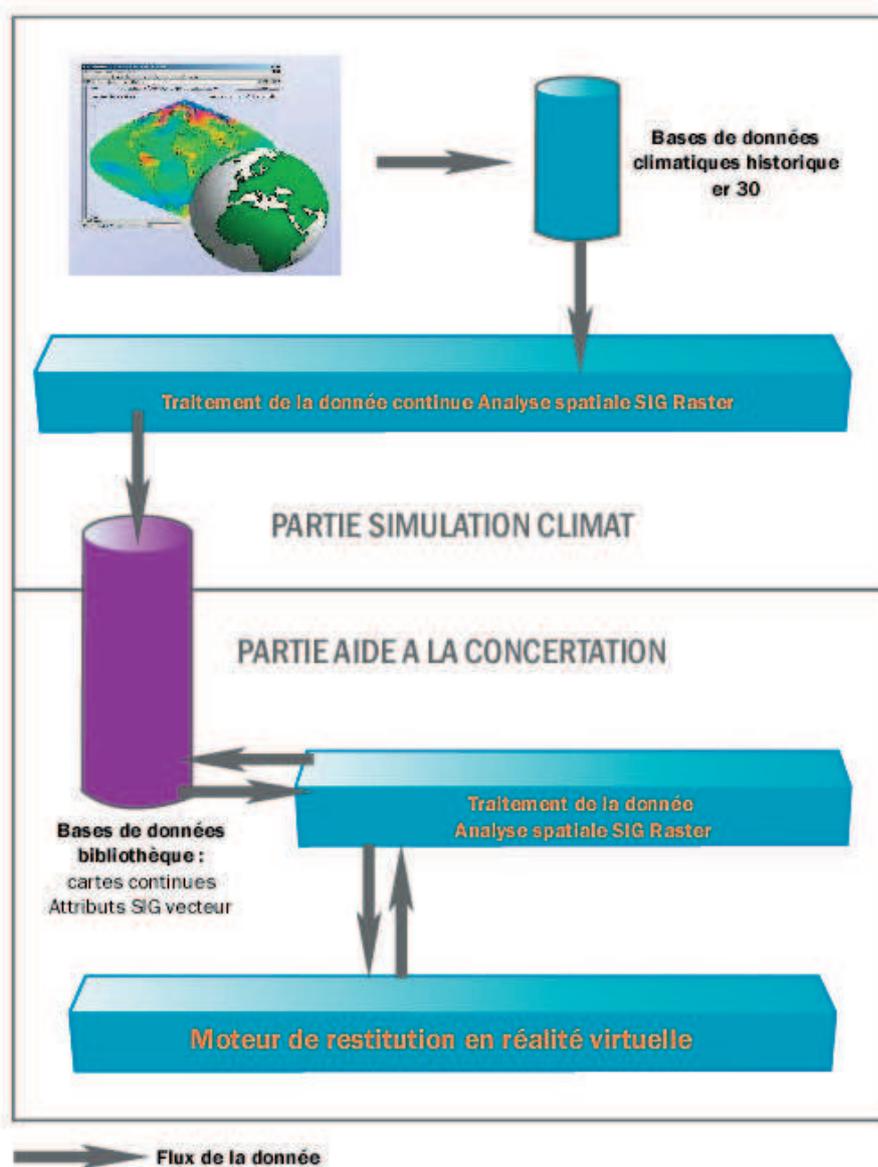


Figure 4-1 : Structure de l'environnement informatique

La seconde partie de l'environnement informatique concerne la mise en valeur des données dans le contexte heuristique. C'est donc elle seule qui sera visible pour les acteurs du territoire au moment de la concertation (Figure 4-1 en bas). Le lien entre

la partie analyse spatiale et concertation est assuré par une base de donnée à vocation de bibliothèque. Cette base stocke les cartes de précipitations et de températures issues du SIG raster sous la forme d'images géoréférencées. Ces dernières sont, par la

suite, appelées à la demande par les acteurs dans le SIG vecteur et calées automatiquement comme fond sous la base de données vectorielles. Comme nous avons choisi un pas mensuel¹⁰⁹ pour traiter du climat, il est possible de voir les températures et les précipitations habituelles ou simulées par le modèle de circulation climatique pour chaque mois de l'année.

Le moteur de réalité virtuelle est en interaction avec la base de données géographiques du SIG vecteur. C'est à dire qu'il restitue tout ce

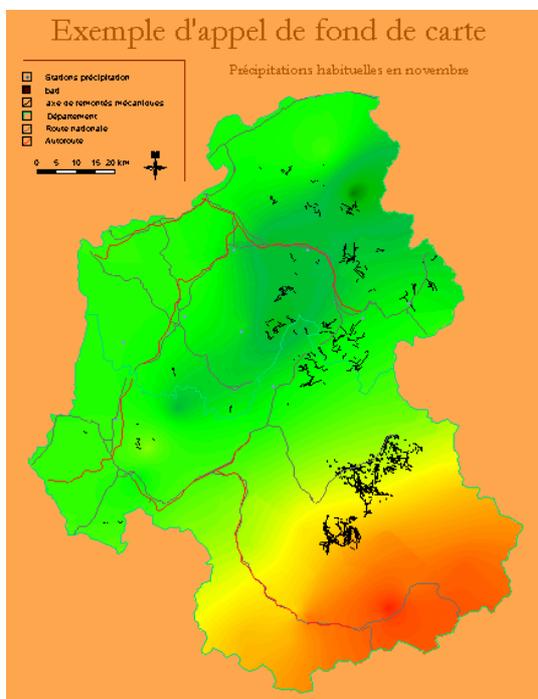


Figure 4-2: Base de données vecteur avec raster calé automatiquement

qui est activé et visible dans l'environnement d'affichage du SIG. (Figures 4-2 et 4-3). Tout le potentiel d'expérimentation en temps

réel repose donc sur les méthodes d'analyse spatiale proposées par le SIG vecteur. On usera donc principalement des outils de création / suppression et des principes de la topologie pour mener cette expérimentation. De cette façon, nous pouvons entièrement reconstituer un paysage (au sens de CAMBRAY) et agir sur lui.

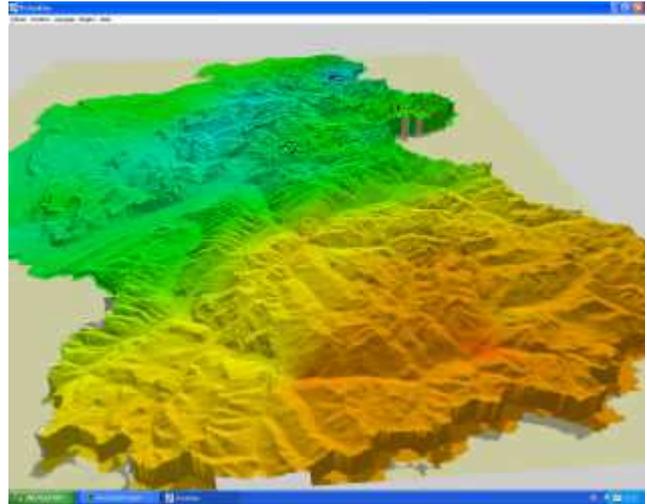


Figure 4-3: Exemple de passage du fond de carte du SIG vecteur vers l'environnement de réalité virtuelle

¹⁰⁹ Le choix du pas de temps mensuel nous semble correspondre à l'objectif initial de la thèse, c'est à dire mesurer et visualiser les espaces de conflits à venir entre économie du ski et environnement en Savoie et Haute Savoie. La saison de ski se déroule sur plusieurs mois et les espèces végétales sont spatialisées en fonction de la répétition des profils saisonniers. Ceux-ci sont trimestriels

4.1.1 La topologie et la réalité virtuelle pour la reconstruction automatique de modèles numériques de paysages

Dans notre environnement, le paysage modifiable ne concerne que les couches 2D et 3D. L'analyse spatiale s'effectue sur la donnée 2D et sa transcription sur le paysage est visible sur les objets 3D qui sont modifiés. Ces objets 3D sont insérés dans l'environnement via un ponctuel auquel ils sont affectés. Un ponctuel, reconnu dans la base SIG comme pylône de remontée mécanique, récupérera donc un volume 3D représentant un pylône de remontée mécanique dans l'environnement de réalité virtuelle. Ce ponctuel est créé dans la

base SIG vecteur sur la couche 2D. Il est donc positionné en X et Y. La gestion de sa position en Z est plus complexe car elle doit tenir compte de l'altitude du terrain au point X et Y et de celle de l'objet dans l'espace au-dessus de ce point. Pour résoudre ce problème, il suffit d'exploiter un point d'insertion de l'objet calculé au moment de sa modélisation. Dans un logiciel de modélisation 3D comme le logiciel 3Dsmax par exemple, ce point correspond au point d'équilibre de l'objet. (Figure 4-4)

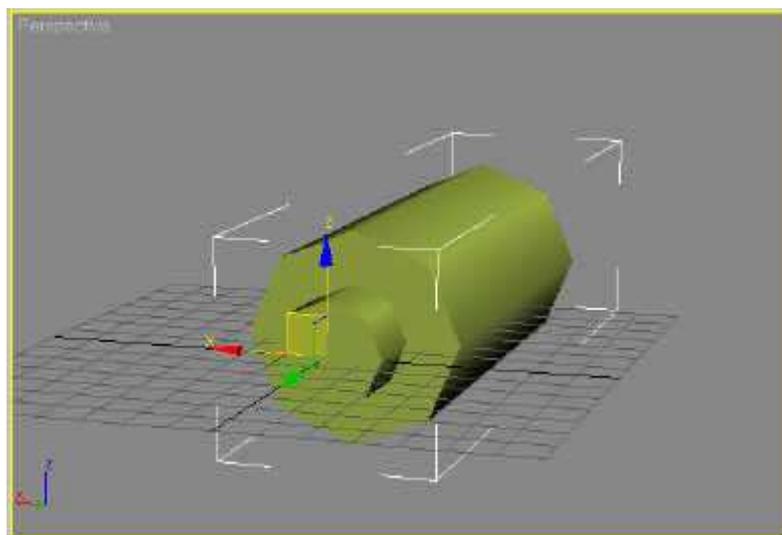


Figure 4-4: Visualisation du point d'équilibre d'un objet dans un environnement de modélisation 3D.

Ce point d'équilibre est calculé par rapport à la boîte (en blanc sur la figure). La grille représente le sol. Notre objet sera donc ici semi enterré dans l'environnement de réalité virtuelle

En déplaçant ce point vers le bas de l'objet, nous aurons l'assurance d'éviter la visualisation d'objets en lévitation ou semi-enterrés dans la scène reconstituée.

4.1.1.1 Méthode d'interaction entre analyse spatiale et reconstitution du paysage

Pour agir en temps réel sur les volumes qui représentent la végétation de notre zone, il convient de rajouter une couche spéciale dans la base 2D. Cette couche sera uniquement

composée de ponctuels, créés sur les nœuds d'une grille régulière¹¹⁰ posée sur le terrain d'étude. Ces ponctuels seront, dans un premier temps des instances d'une classe sans signification particulière que nous baptiserons : bibliothèque d'objets végétation de premier niveau. (Figure 4-5)

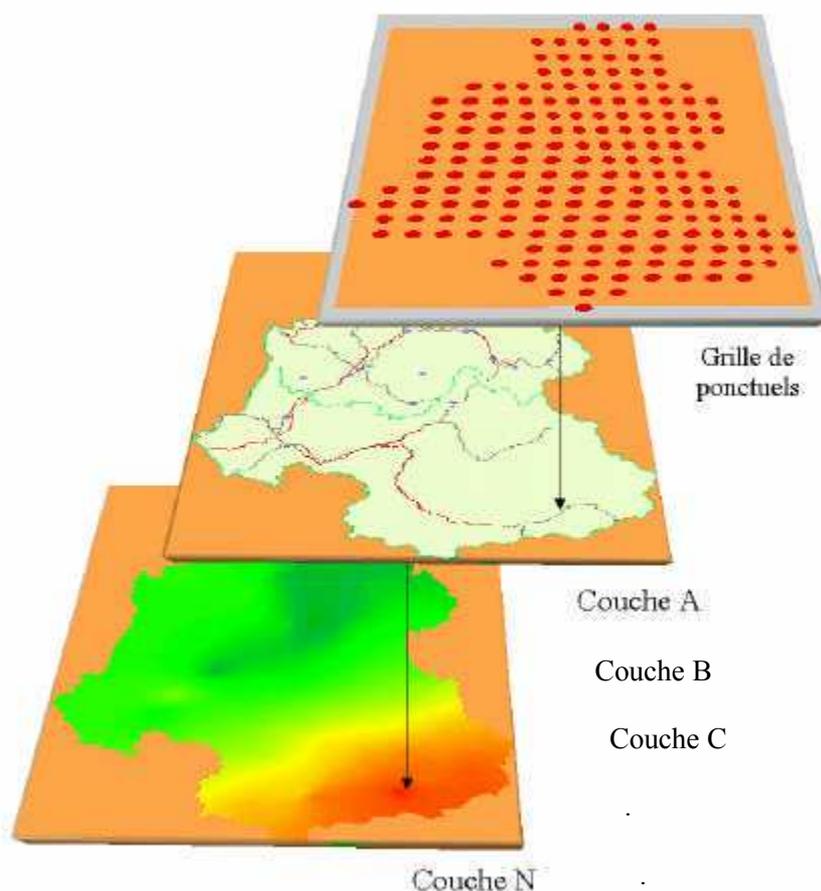


Figure 4-5: Exemple de structure d'une base de données géographiques pour la reconstitution automatique d'un paysage

¹¹⁰ Le pas de cette grille correspond à un compromis entre l'échelle pertinente de visualisation dans un contexte heuristique et le potentiel de calcul de l'ordinateur sur lequel est installé l'environnement.

Ces ponctuels « réagissent » aux stimulations du terrain introduites par les analyses des acteurs ou la dynamique du climat. Ces stimulations sont traduites par la relation topologique « strictement à l'intérieur du polygone ». Ce traitement entraîne un déplacement des objets d'une classe vers une autre. D'un point de vue informatique, il s'agit d'une migration des instances. Comme nous sommes dans un environnement objet, les nouvelles instances récupèrent toutes les caractéristiques de la classe qui les réceptionne. L'une de ces caractéristiques est justement le genre d'objet 3D correspondant à cette dernière classe dans la scène 3D. Cette classe spécialisée prend le nom de bibliothèque de végétation de second niveau. Le déplacement de ces objets particuliers peut s'effectuer dans les trois directions de la hiérarchie de la base de donnée objet. (Figure 4-6) Ils ne peuvent pas être détruits, sinon nous serions contraints de refaire la grille à

chaque analyse. Chacun possède un comportement indépendant par rapport à tous les autres. C'est à dire que nous pouvons faire transiter d'une classe à une autre seulement une sélection de certaines instances et non pas toutes les instances de la classe sur laquelle s'effectue la requête topologique. Enfin, ils ne jouent aucun autre rôle que celui de briques élémentaires du modèle de paysage. La modification dynamique des objets qui peuvent changer de classe dans la base SIG est répercutée dans la scène en réalité virtuelle par la modification et le déplacement des volumes 3D qui semblent « sauter » d'un ponctuel à un autre en fonction de la stimulation. De cette façon, nous pouvons simuler les effets climatiques et les choix des acteurs du territoire sur le paysage. La vitesse de calcul du processeur pour restituer la scène sera la seule limite de notre environnement

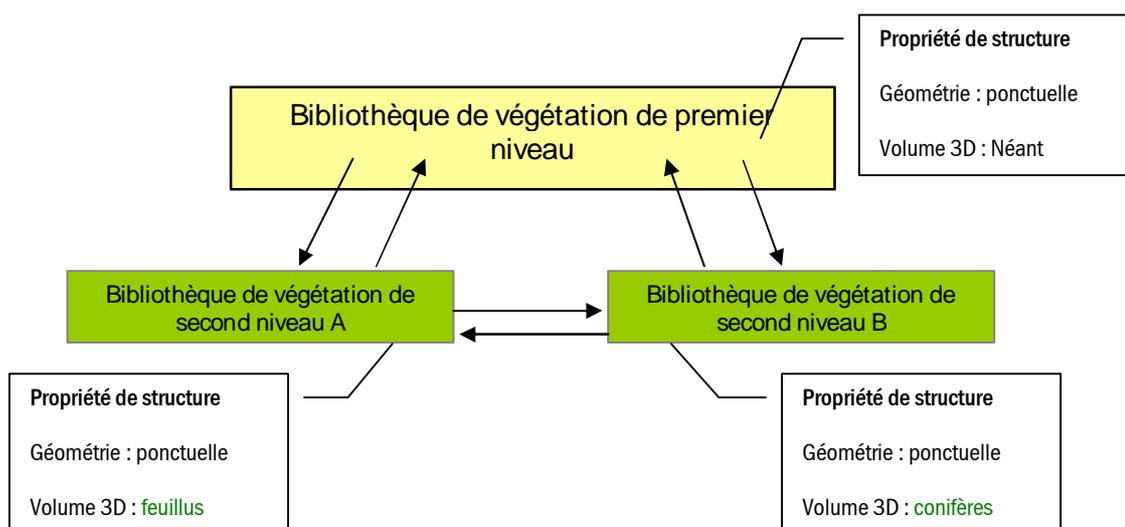


Figure 4-6: Modèle d'instanciation des objets ponctuels pour la reconstitution interactive d'un paysage

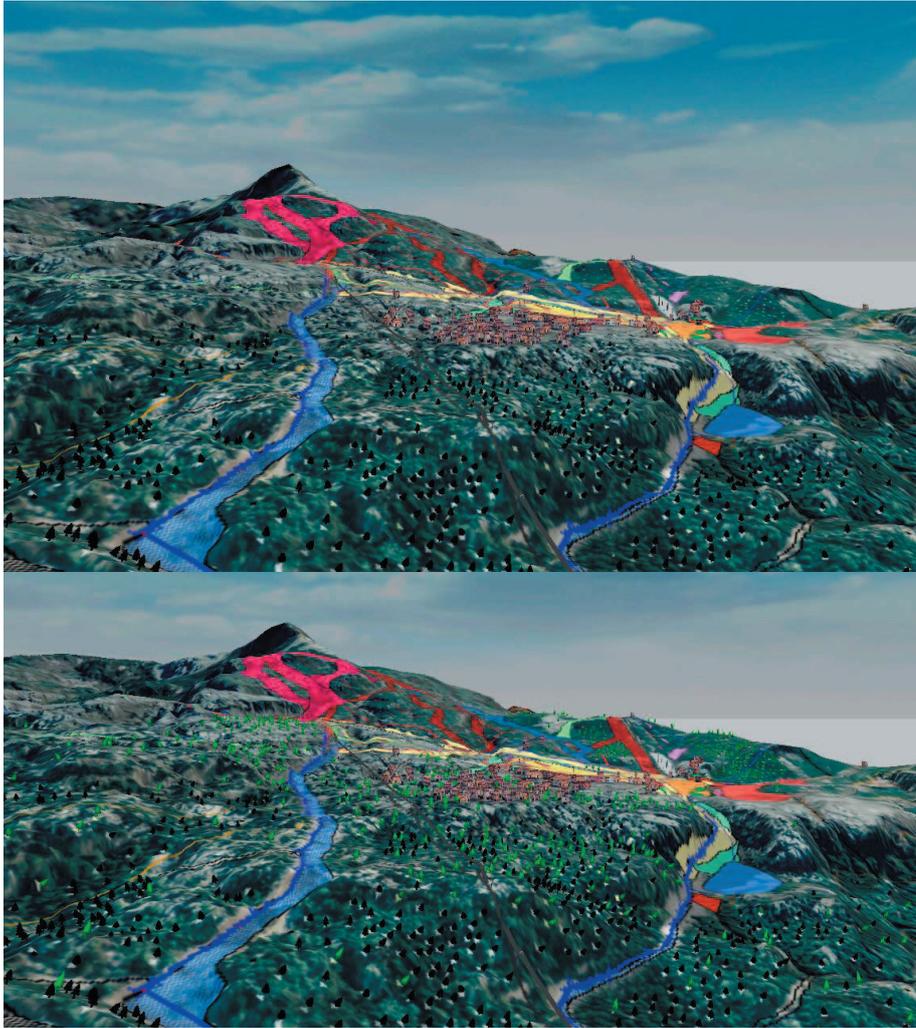


Figure4-7: Scènes reconstituées après analyse climatique : Domaine skiable Arête la Pierre St Martin.

L'image haut montre la forêt avant scénario. L'image bas montre la remontée potentielle après analyse (arbres en vert clair)

4.2 Traduire le terrain d'étude en modèles spatiaux :

La modélisation des objets du terrain, sur lequel va être engagée une démarche de concertation, doit être abordée du point de vue de la perception que les acteurs ont du milieu à aménager. Nous avons cherché plus haut des stratégies pour proposer une mesure standardisée de ces objets perçus. (Figure 3-4) Dans cette méthode, la distinction entre information continue et discrète n'est

pas établie. Cette distinction est pourtant importante car elle entraîne une différence de statut de la donnée. Certaines catégories d'informations continues jouissent d'un statut stratégique dans l'établissement d'une solution alors que l'information discrète se distingue, elle, par son usage. C'est cette dernière catégorie de données qui contrôle entièrement la capacité heuristique du système. La première raison de ce contrôle est d'abord liée au caractère objet de notre approche.

Comme le paysage de concertation est construit à l'aide de ces objets, ils doivent être nécessairement finis dans l'espace pour autoriser cette construction comme un maçon userait de briques pour réaliser une maison.

La seconde raison concerne la démarche de simulation développée dans notre système. Nous avons dit plus haut que les acteurs du territoire ne pouvaient agir à leur guise sur la donnée qu'à partir du SIG vectoriel. Leurs actions dans cette partie de l'environnement produiront alors des réactions visuelles au sein du moteur de réalité virtuelle. Le potentiel d'expérimentation proposé aux acteurs du territoire ne s'exprime donc qu'au moyen d'objets vectoriels qui doivent être structurés au sein d'une base de données géographiques idoine. Les objets vectoriels sont par définition discrets.

l'ensemble des acteurs du territoire. C'est à dire qu'une seule base modélise tout le réel perçu. Cependant certaines zones de cette base seront spécifiques. Pour notre projet, nous pouvons distinguer deux espaces de modélisation : celui de l'économie du ski (Figure 4-8) et celui du milieu naturel. (Figure 4-9)

4.2.1 Organisation de la base de données objets

Ces données discrètes jouent aussi un rôle de modélisation du réel. Il s'agit de la décomposition du réel perçu en objets minimaux qui correspondent aux récifs de consensus ou de non-consensus que nous avons décrits plus haut. En fait, cette notion (consensus, non consensus) est principalement attachée à l'aspect comportemental de l'objet. La réalité de celui-ci n'est jamais mise en doute du moment que cet objet est admis à exister dans la base de données géographiques. Cette propriété facilite grandement la modélisation. Cette base doit bien entendu être significative pour

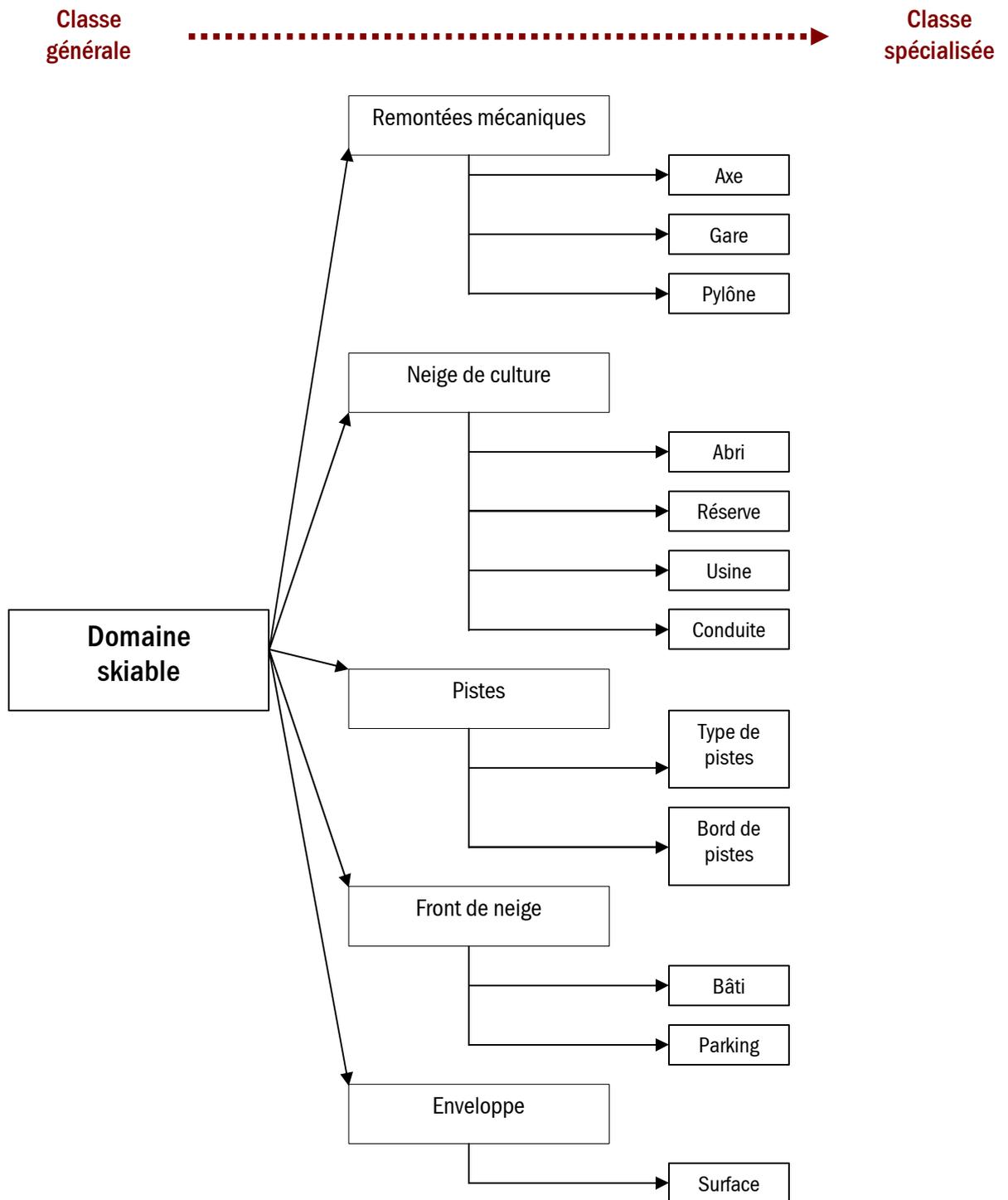


Figure 4-8: Modélisation objet d'un domaine skiable

La figure 4-8 montre un modèle objet de définition d'un domaine skiable. Ce modèle est adapté pour notre projet. N'importe quel domaine skiable de notre champ peut s'y

intégrer. Cependant, ce modèle n'est pas suffisant pour déterminer précisément un domaine skiable. Par exemple, il n'existe pas de classes dans notre modèle, pour

représenter les réseaux électriques ou téléphoniques enterrés. Les classes spécialisées que nous avons proposées sont cependant suffisantes pour permettre la concertation entre un aménageur et un écologue à l'échelle qui nous intéresse. L'aménageur retrouvera suffisamment

d'éléments essentiels de son domaine pour la simulation. L'écologue ne sera pas submergé par les informations discrètes destinées à représenter un espace qu'il connaît peu mais dont il identifie les objets en interactions avec son propre champ. La réciproque pour la modélisation du milieu naturel doit donc s'établir.

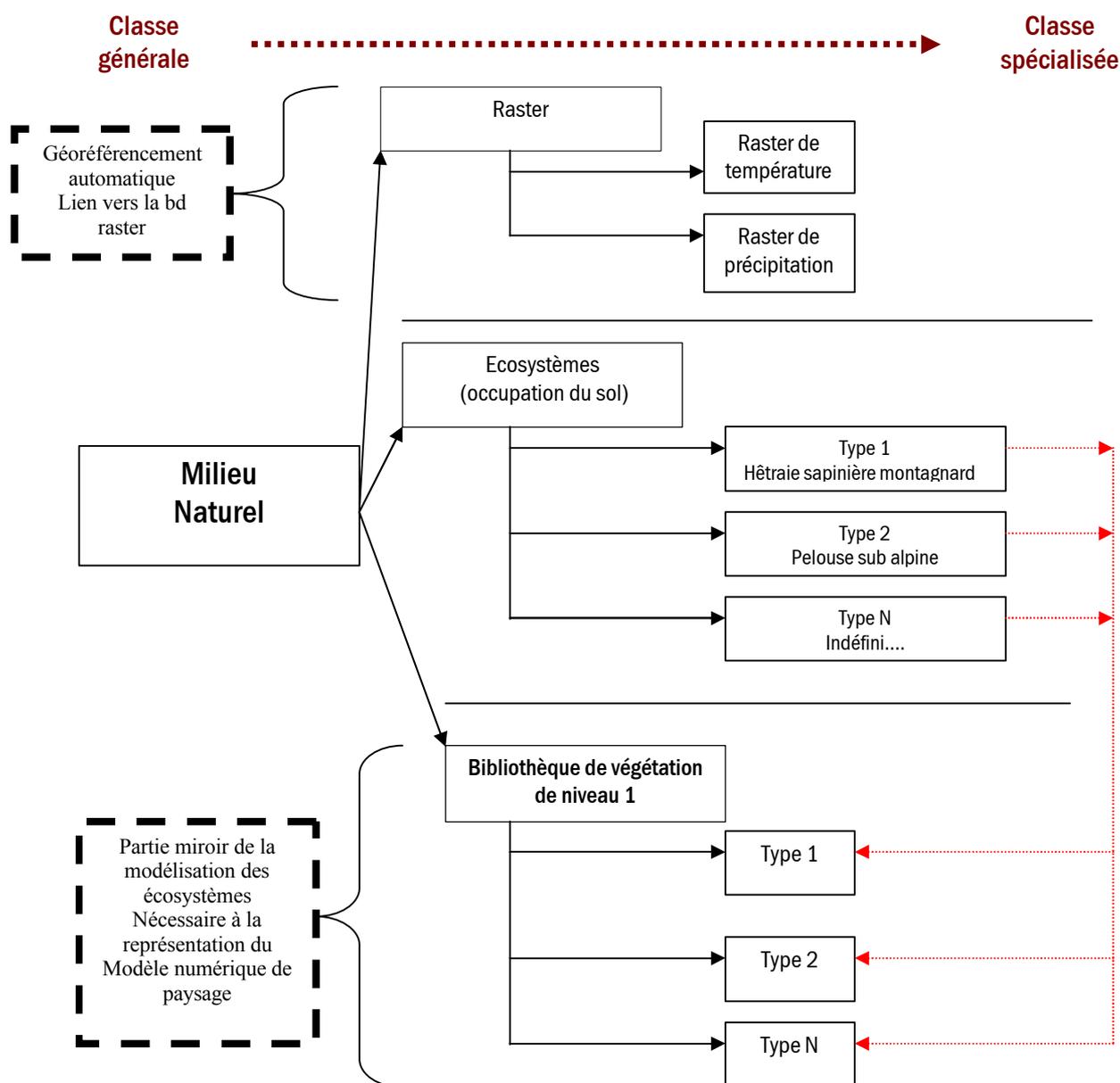


Figure 4-9: Modélisation objet du milieu naturel

Le modèle relatif au volet écologique de notre base de données semble plus complexe que celui qui est lié à la partie économique. Cela est dû au fait que le milieu naturel est étroitement dépendant du climat. C'est donc sur cette partie de la base que les couches raster du SIG vectoriel sont intégrées (partie supérieure de la figure 4-9). La détermination des limites physiques des écosystèmes est d'ailleurs dérivée des cartes de climat. C'est également dans cette zone de la base de données géographiques qu'est stockée la couche ponctuelle nécessaire pour la reconstitution du modèle numérique de paysage. La raison de ce placement est simple. Comme les volumes 3D représentant le milieu naturel dans le moteur de réalité virtuelle sont liés aux écosystèmes, nous devons dupliquer les classes écosystèmes en autant de classes miroirs pour leur attacher le volume 3D correspondant (partie inférieure de la figure 4-9). Le modèle de données écologique utilisé réellement par les acteurs écologiques ne se compose donc que de la partie centrale de la figure 4-9. Les briques élémentaires qui la composent sont facilement comprises par un aménageur de domaine skiable.

4.2.2 Les bibliothèques de phénomènes climatiques

Les objets situés sur l'axe $Y=X$ de la figure 3-4 peuvent être considérés comme des composantes intrinsèques du milieu au sens de faits objectifs. D'une façon générale, toute

l'information continue qui se déploie sur notre champ, et qui exerce une influence objective sur l'aménagement final, devrait se retrouver sur cet axe. Dans le problème qui nous intéresse, le modèle numérique de terrain, la température et les précipitations représentent ces composantes intrinsèques du milieu. En revanche, cette position leur confère un rôle particulier car, de leur évolution dépend les choix des acteurs du territoire. Ces derniers doivent donc connaître et situer les limites en qualité de l'information continue qui représentera ces données, particulièrement celles du climat. En effet cette dernière est une estimation à partir d'un semi de points. Toute l'efficacité de cette information dépendra alors de la qualité de l'interpolation. La qualité stratégique de l'information continue dans ce contexte décisionnel nous a conduit à évaluer différentes méthodes d'interpolation en vue de rechercher celle(s) qui permettra (ont) une interpolation puissante et dont la qualité pourra être estimée. Nous insistons sur l'évaluation de la qualité de l'estimation car les cartes créées à partir d'une méthode d'interpolation serviront pour la suite du travail. Elles représentent un niveau élémentaire de l'information de départ, équivalente aux classes spécialisées des données discrètes. Ce niveau élémentaire est toutefois constitué à la suite d'opérations complexes qui induisent des erreurs. Celles-ci, impossibles à faire disparaître, doivent être identifiées pour les prendre en compte dans le raisonnement des acteurs.

Quand toutes les cartes climatiques nécessaires au projet ont été interpolées, on

se retrouve en possession d'une base de donnée raster. Cette dernière peut donc être considérée comme une bibliothèque élémentaire du climat en action ou simulé de notre terrain d'étude.

Pour intégrer toutes les simulations du modèle général de climat à l'échelle de notre terrain, nous devons faire en sorte de pouvoir facilement changer l'attribut « mesure climatique » aux stations météo intégrées dans le SIG raster. Il n'est pas possible de stocker plusieurs attributs sur la même cellule

dans ce type de SIG. Ce stockage ne peut donc se faire qu'à l'extérieur du logiciel SIG via un Système de Gestion de Base de Données Relationnelles. Nous nous sommes donc attachés à définir une architecture d'échange de données où chaque cellule représentant une station météorologique ne pouvait être affectée que de ces propres données (une pour chaque mois de l'année), ces dernières étant stockées dans une table d'un SGBDR. (Figure 4-10)

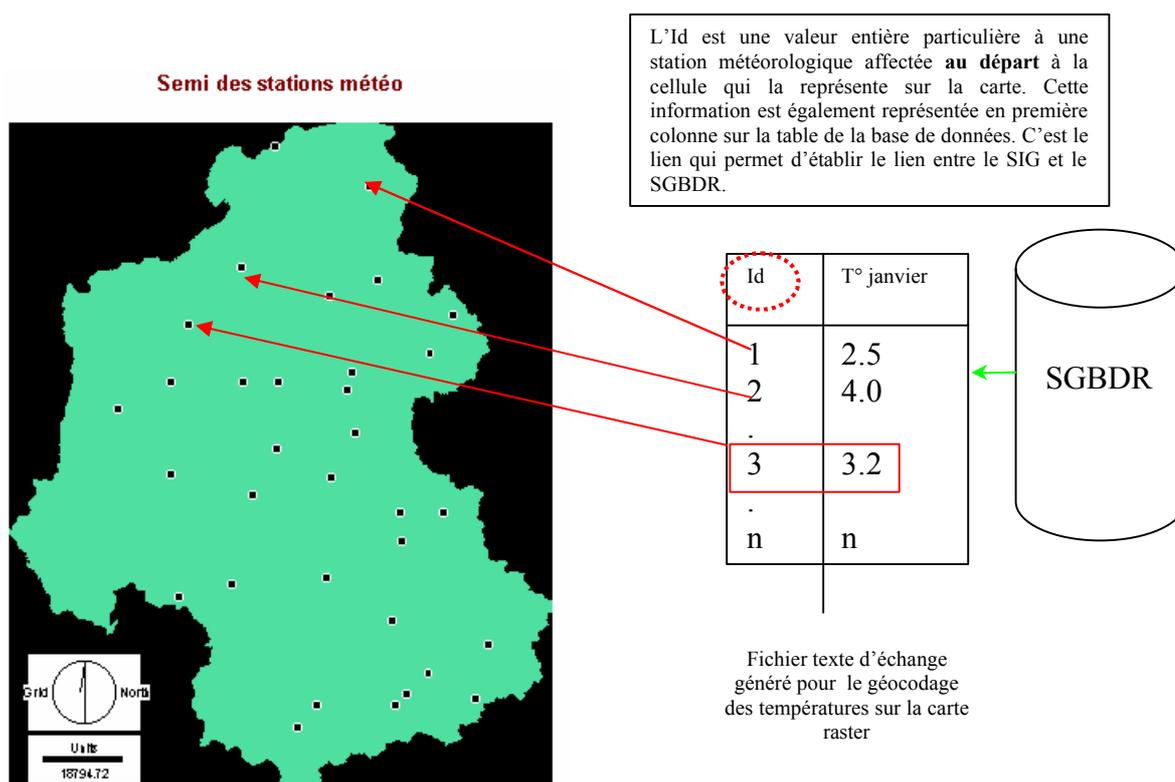


Figure 4-10: Schéma explicatif pour l'échange des données entre le SIG raster et le SGBDR

4.2.3 Le problème de l'information continue : interpolation géométrique et/ou probabiliste

Dans la mesure où nous avons établi cette relation entre le SIG raster et un Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles (SGBDR) nous devenons capables de produire dynamiquement une carte des stations avec les mesures de précipitations ou de températures attachées au point par un attribut. L'intérêt d'une bonne organisation de la base de données prend ici tout son sens. Les mesures climatiques mensuelles pouvant être chargées ou déchargées dans l'environnement informatique en fonction des

besoins, la notion d'évolution dans le temps devient possible. La seconde carte à droite (Figure 4-11) est intéressante. Elle représente, dans un espace géo-référencé, un phénomène (les précipitations moyennes du mois de juillet) à travers 38 variables régionalisées.

Si l'on considère que le phénomène est correctement décrit au niveau ponctuel, on peut arriver à prévoir des valeurs inconnues (en d'autres points de l'espace) à partir de celles qui sont déjà connues. C'est l'interpolation. Cette prévision est possible parce qu'il existe une corrélation spatiale des valeurs entre elles. Toute la difficulté réside dans la manière d'évaluer la qualité du résultat interpolé.

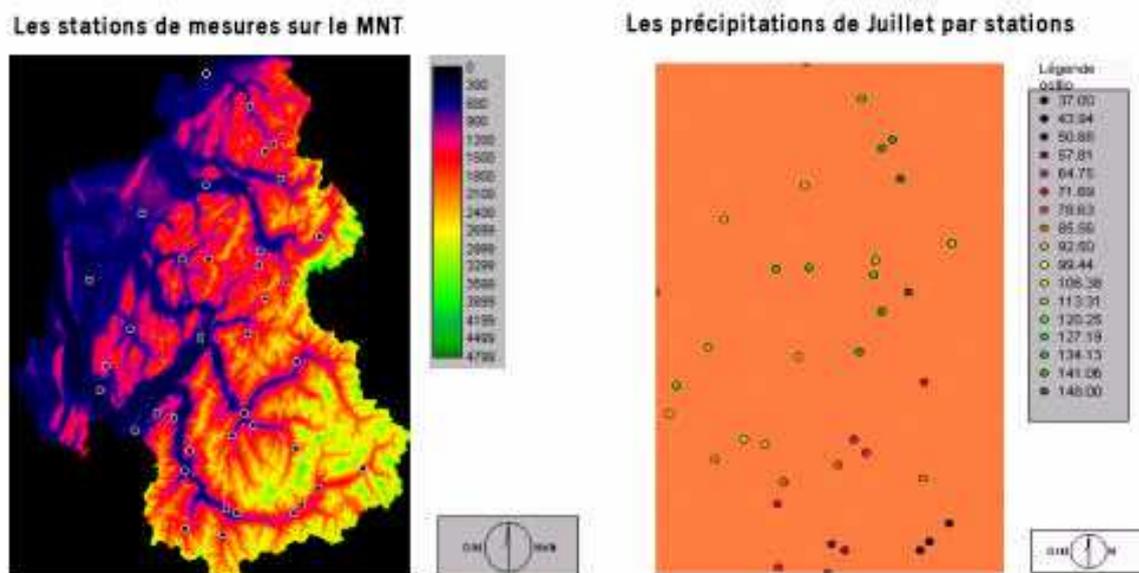


Figure 4-11: Une réalisation du phénomène des précipitations en juillet

On peut classer les méthodes d'estimation et d'interpolation dans deux grandes familles : les méthodes déterministes et celles qui sont probabilistes.¹¹¹ Les méthodes déterministes reposent sur des concepts purement mathématiques et plus particulièrement géométriques. Les secondes familles de méthodes sont fondées sur des modèles probabilistes.

Ces deux familles de méthodes sont indépendantes les unes des autres. C'est à dire qu'il n'y a pas ici une succession de méthodes d'interpolation de plus en plus puissantes et complexes qui seraient l'aboutissement des progrès faits en la matière. Il n'y a que des choix possibles en fonction d'objectifs de réalisation en temps, en précision, et en fonction du type de données à disposition. Recourir à l'une d'entre elles reste alors le fait du praticien, particulièrement quand il décide de recourir à celles qui sont stochastiques.

4.2.3.1 Les méthodes géométriques : une relation forte à la distance inter-stations

Les méthodes déterministes ne tiennent pas réellement compte de la structure spatiale du phénomène et s'attachent à représenter ce dernier « aveuglément » principalement à partir de la position des points de mesures en considérant un espace isomorphe. Le cas le plus simple d'interpolation déterministe est celui des polygones de Thiessen.

¹¹¹ Estimation et interpolation spatiale/ Michel Arnaud Xavier Emry/ Hermes page 26

• Polygones de Thiessen

Dans un espace à deux dimensions, des polygones sont créés en traçant les médiatrices des segments reliant chaque site avec ses voisins. On choisit alors le plus petit polygone contenant chaque site de mesure et le champ complet est décomposé en polygones. La carte ci-dessous montre le résultat de ce type d'interpolation pour notre champ d'étude. Manifestement, cette méthode n'est pas précise et n'offre qu'un intérêt très limité à part la simplicité de sa mise en œuvre.

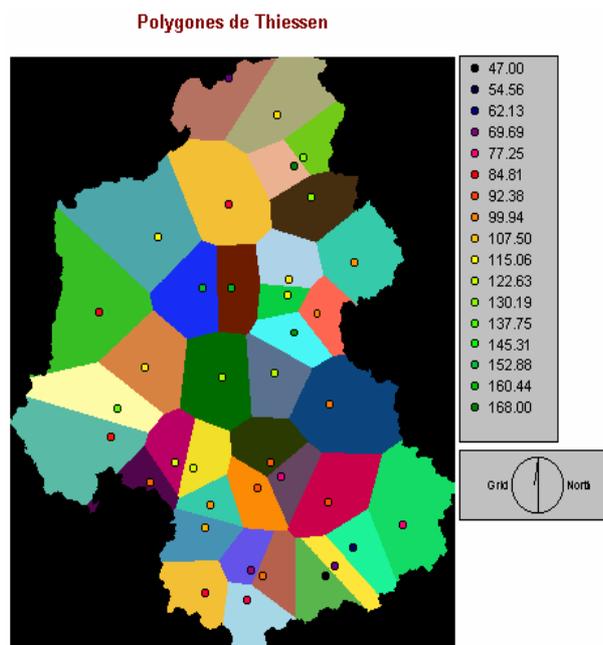


Figure 4-12: Carte d'interpolation des valeurs des sites de mesures (Thiessen)

• Méthode polynomiale

Une autre solution géométrique d'interpolation serait d'utiliser la méthode polynomiale. Ici, l'interpolation se fait à partir de l'équation d'un polynôme de degré P. L'idée sous-jacente consiste à approcher la fonction $f(X)$ qui

représente le phénomène étudié par un polynôme $G(X)$. Le nombre de paramètres du polynôme correspond au nombre de points où l'on connaît $f(X)$ donc pour $f(x_i)$ connu, on a $G(x_i)$.

Plus concrètement, nous connaissons la valeur de $f(X)$ en 33 points de coordonnées $(x_i; y_i)$. Nous pouvons interpoler le phénomène par un polynôme du type¹¹² :

$$G(X) = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{n-j} a_{jk} x^j y^k .$$
 La valeur de $G(X)$

est connu en : les 33 points $(x_i; y_i)$, ce qui permet d'identifier les paramètres a_{jk} , donc, de déterminer entièrement le polynôme d'interpolation.

Cette méthode d'interpolation globale doit être considérée avec circonspection par le géographe car les résultats dépendent fortement du choix du degré du polynôme retenu pour l'interpolation. En effet, l'outil mathématique (interpolation polynomiale) mal maîtrisé (degré du polynôme d'interpolation trop élevé) donne des résultats aberrants en dehors des $(x_i; y_i)$ connus. A mesure que son degré augmente, $G(x_j; y_j)_{j \neq i}$ peut s'avérer très différent de $f(x_j; y_j)$.

C'est ce que montre la figure 4-13.

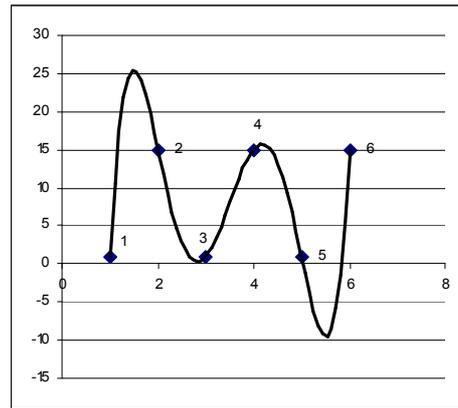


Figure 4-13: Exemple de polynôme d'interpolation. Le polynôme de degré 6 interpole parfaitement les six points du plan mais « flotte » fortement entre les couple $(x_1$ et $x_2)$ et $(x_5 ; x_6)$

On peut donc s'interroger sur l'efficacité de cette technique dans le cas d'un ajustement direct avec un grand nombre de points. Cette méthode produit en outre des cartes souvent sans réelle relation avec la structure locale du phénomène puisqu'elle se fonde principalement sur la régularité dans l'espace de la réalisation manifestée aux points de mesures.

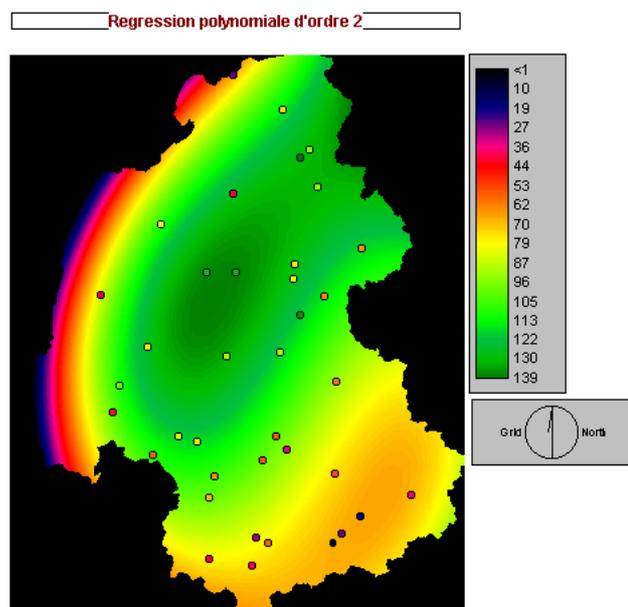


Figure 4-14: Carte d'interpolation des valeurs des sites de mesures

¹¹² [ARNAUD et EMRY 2000 page 67]

Ces méthodes sont relativement simples à mettre en œuvre aujourd'hui. Avec les instruments informatiques, il devient aisé de recourir à des fonctionnalités intégrées dans des progiciels qui interpoleront pour le praticien. Cependant, le danger de non-conformité avec le phénomène que l'on souhaite décrire persiste car les fondements spatiaux¹¹³ sont inexistantes. Enfin, il est impossible d'estimer l'erreur entre la valeur interpolée en un point inconnu et sa vraie valeur. Le géographe, avec un peu d'investissement intellectuel, peut considérablement renforcer sa connaissance des phénomènes spatiaux avec les méthodes faisant appel aux fonctions aléatoires comme le krigeage, les fonctions bases radiales, ou l'interpolation dite : optimale de Gandin.

4.2.3.2 La voie de la Géostatistique : une alternative séduisante

La voie des techniques déterministes pour représenter un phénomène spatial comme les précipitations ou les températures n'est toutefois pas véritablement aberrante malgré l'étrangeté visuelle des cartes que nous avons pu produire plus haut. Elles abordent la représentation du phénomène dans sa globalité et les fondements mathématiques qui les alimentent sont parfaitement satisfaisants pour l'esprit. La difficulté se situe principalement dans le fait qu'il nous est impossible d'estimer l'erreur liée à l'interpolation alors que nous savons que c'est justement au niveau local que les erreurs sont

les plus grandes.¹¹⁴ Quelle confiance accorder alors aux cartes qui ont été construites en dérivant l'information apportée par des interpolations de phénomènes de type continu comme ceux du climat? Visualiser les variations de la limite isotherme du 0° est, en soi, intéressant pour un gestionnaire de domaine skiable. L'attrait d'une telle carte pour la prise de décision peut se trouver considérablement réduit voire entièrement condamné par le manque de confiance dans les méthodes qui ont servi à sa création.

Dans le cadre de notre projet, nous ne pouvons pas nous affranchir de l'étude des structures spatiales ainsi que des moyens d'évaluation et d'optimisation de l'interpolation puisque c'est précisément de la qualité des cartes de spatialisation que dépendent la précision et la qualité de notre résultat sur l'identification des espaces de conflits environnement / économie. Une approche totalement déterministe ne pouvait donc pas convenir car, minimiser l'erreur au maximum, revient à déterminer les paramètres d'interpolation avec une précision infinie, ce qui n'est accessible qu'au démon de Laplace.

L'approche stochastique permet de s'intéresser de façon plus souple au phénomène que l'on étudie. En plus de la capacité d'estimation de valeurs inconnues, elle permet d'étudier finement la structure spatiale de la variable que l'on cherche à interpoler. On peut de cette façon mieux comprendre l'allure du déploiement du phénomène dans l'espace. Ces avantages

¹¹³ Il s'agit là de fondements en relation avec le réel

par opposition aux concepts mathématiques
¹¹⁴ Estimation et interpolation spatiale page 87
 paragraphe 1

sont déterminants pour la démarche que nous voulions mettre en place dans SIMUL-IMAGE puisqu'ils apportent des outils de compréhension supplémentaires, supérieurs à la simple réalisation mathématique d'une fonction. Ils alimenteront notre réflexion au moment de la création des bibliothèques de cartes spécifiques aux points de vue des décideurs comme celles des zones soumises à une température inférieure à Zéro de façon récurrente.

Toutefois, il convient de manier ces outils avec la plus grande rigueur, particulièrement sur le plan de la démarche intellectuelle et des hypothèses car le résultat repose entièrement sur les choix du praticien. Ces derniers ne sont ni faux ni justes, ils sont simplement judicieux ou non en fonction de la manière dont il exerce son sens critique. Eventuellement le modèle probabiliste pourra être confirmé par une validation croisée.

4.2.4 Interpoler un phénomène climatique par la démarche géostatistique

Un premier postulat de base est que nous pouvons considérer que la mécanique relative à l'établissement d'une température ou d'une hauteur de précipitation est contenue tout entière dans la mesure que nous en faisons à un instant T dans un lieu $X;Y$ et Z . La géostatistique non transitive peut, à ce moment, nous être d'un grand secours.

La géostatistique non transitive fait appel à la notion de fonction aléatoire. Quand on

dispose d'une série de variables régionalisées (situés dans un espace tri-dimensionnel), il est possible d'aborder d'autres types d'informations qui décrivent la façon dont se déploie dans l'espace, le phénomène que l'on traite. Parfois, on peut même accéder à des équations mathématiques qui modéliseront parfaitement l'évolution dans l'espace de la variable régionalisée. C'est le cas de la régression linéaire du jeu de températures moyennes annuelles en fonction de l'altitude des stations de mesures.

Quelquefois pourtant, les informations dont on dispose sont très fragmentaires. Cela peut correspondre à un manque de connaissances ou simplement parce que notre phénomène est vraiment « indéfinissable » d'un point de vue formel. C'est à dire qu'il n'y a pas de lois mathématiques qui gouvernent le phénomène physique que l'on traite. C'est le cas habituellement pour la description du phénomène des précipitations et nous allons voir plus loin que la question de l'interpolation des températures semble poser des problèmes voisins aux échelles de temps qui nous intéressent. Recourir à une fonction aléatoire pour décrire nos phénomènes de températures et précipitations et estimer les autres valeurs sur le champ que l'on traite sera pour nous une voie prometteuse face aux limites intrinsèques des méthodes géométriques. Cependant, il faut garder en tête très clairement que ce passage dans un espace topo-probabiliste est un choix

arbitraire qui se justifie par « [l'espérance] d'un regain d'efficacité ». ¹¹⁵

4.2.4.1 Les écueils relatifs à une démarche opérationnelle au sein de SIMUL-IMAGE

L'approche probabiliste nous ouvre de grandes possibilités pour comprendre et caractériser le déploiement d'un phénomène climatique dans l'espace. Cette ouverture vers l'information qualitative liée au phénomène n'est pas sans risques et nous devons les avoir en permanence à l'esprit.

Il convient tout d'abord de bien avoir en tête la distinction entre le phénomène régionalisé et la variable régionalisée. Dans le cas qui nous intéresse, le phénomène à interpoler concerne les précipitations ou les températures. Il se déploie dans un espace à 4 dimensions, X, Y, Z et T. Cette dernière dimension est représentée pour chaque station, par douze réalisations de la moyenne des précipitations mensuelles minimales sur les 31 années de notre chronique. Les températures étant, elles aussi, représentées de la même façon.

Il est impossible de connaître exhaustivement ce phénomène à la fois dans le temps et dans l'espace. Nous en avons donc une réalisation sous la forme de variables régionalisées. Cette distinction est une abstraction car il ne s'agit pas du réel qui est représenté seulement par le phénomène, mais d'une image de ce dernier représenté sous une forme numérique. ¹¹⁶

¹¹⁵ Aide-mémoire de géostatistique linéaire/ Pierre Chauvet/ Ecole des mines de Paris/ 1999/ P32

¹¹⁶ Estimer et choisir /Matheron G / Les cahiers du centre de morphologie mathématiques N°7/ Ecole des Mines Paris / 1978 page 2

L'avantage est que nous passons d'une réalité physique à une fonction mathématique sur laquelle nous pouvons exercer un certain nombre de manipulations.

Le danger se situe exactement à ce niveau. Comme il s'agit d'un être mathématique, le risque est grand de le traiter pour lui-même en oubliant que sa raison d'être n'est que de témoigner d'un phénomène impossible à appréhender directement. Pour un géographe non-mathématicien, il faudra prendre garde de bien faire la distinction entre ce qui est de l'ordre du modèle mathématique et ce qui est de l'ordre de la réalité physique. C'est à dire qu'au moment d'établir le modèle mathématique sur la base de l'étude des données, nous devons établir un lien entre une propriété interne de notre modèle lié au formalisme mathématique que nous décidons d'utiliser, sur la base d'une affirmation que nous établissons au niveau physique. C'est cette affirmation qui établit le lien entre notre modèle et la réalité. Outre le fait qu'elle est empreinte de subjectivité, elle ne peut se concevoir comme étant juste ou fausse mais simplement comme adéquate ou non. C'est ici que le praticien doit exercer son sens critique avec acuité.

4.2.4.2 Choix des méthodes d'interpolations

Dans l'approche géostatistique non transitive, ce sont les données que nous avons à notre disposition qui vont nous guider dans notre choix de la méthode d'interpolation.

LABORDE¹¹⁷ propose le tableau suivant afin d'aider le praticien à s'orienter vers une méthode moderne adaptée aux données :

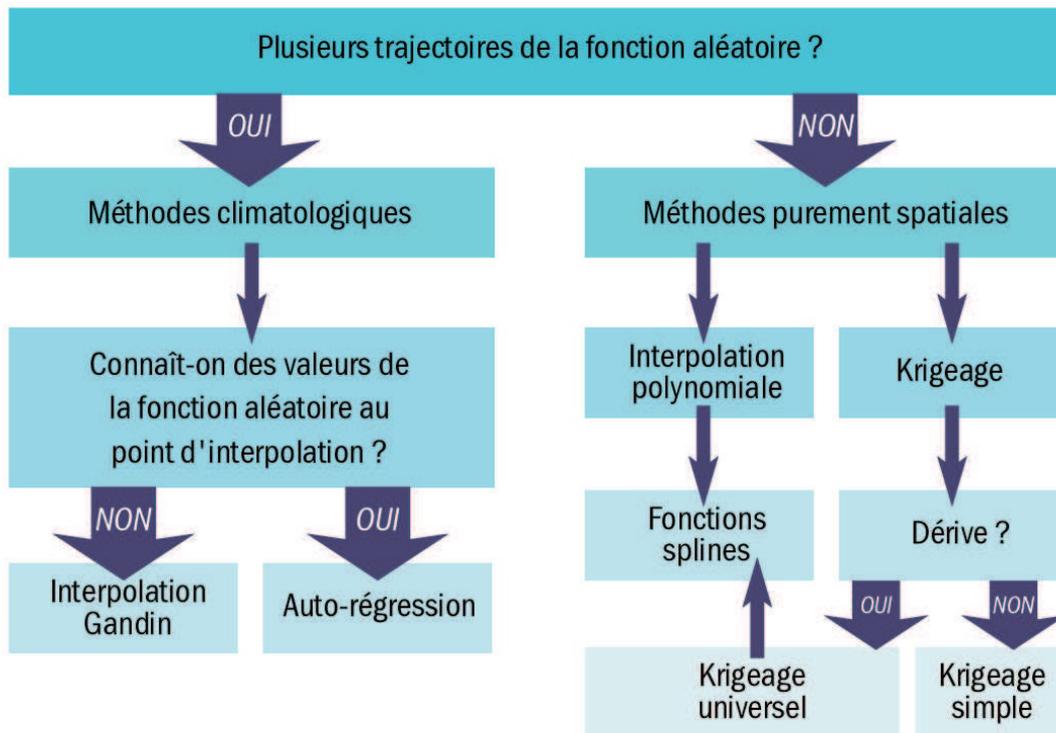


Figure 4-15: Tableau de choix des méthodes d'interpolation

Toutefois, ce tableau ne considère les choix que dans un cadre formel. Dans la pratique, la quantité de points à disposition est un facteur prépondérant et limitant dans le choix de la méthode. L'approche par variographie et krigeage par exemple n'exprime sa pleine puissance que si la quantité de points de mesures est suffisamment importante pour permettre l'ajustement des modèles mathématiques sur des variogrammes non erratiques.

L'aspect calculatoire est également déterminant. L'auto-régression est, de ce point de vue, extrêmement difficile à mettre en œuvre tout comme l'interpolation optimale de Gandin. La raison pratique se pose en terme de temps de calcul. Ces opérations demandent des ressources informatiques extraordinaires si on souhaite obtenir un résultat dans des temps encore acceptables.

¹¹⁷ Laborde Jean-Pierre / Méthodes d'interpolation et géostatistiques pour la cartographie automatique à l'usage des Géographes / Cours CNRS/1997

4.2.4.3 Qualité de l'interpolation : la victoire des méthodes modernes

CREUTIN [CREUTIN 1979] a testé les différentes méthodes d'interpolation proposées ci-dessus sur un cas d'étude des phénomènes pluvieux de la région cévenole.

L'exercice portait sur une interpolation à partir d'un réseau de 73 stations de mesures pluviométriques et 84 épisodes pluvieux importants (plus de 50mm de pluie entre 1956 et 1976). La vérification de la qualité de l'interpolation a porté sur 26 autres postes pluviométriques présents sur le champ et gardés en réserve. L'estimation de la qualité de l'interpolation s'est donc effectuée en calculant le coefficient de corrélation entre les précipitations observées aux 26 stations et

celles estimées par les différentes méthodes mises en œuvre. La figure 4-16 regroupe les résultats de façon synthétique

Comme nous pouvions nous y attendre, la méthode de Thiessen se révèle très mauvaise. En revanche, la méthode de la moyenne arithmétique des 5 plus proches voisins (non testée dans ces pages) peut éventuellement faire l'affaire dans le cas d'une utilisation de méthodes d'interpolation classique. Enfin, groupées en haut du graphique, nous voyons la supériorité des trois grandes méthodes modernes d'interpolations Gandin, splines (fonction base radiale) et krigeage.

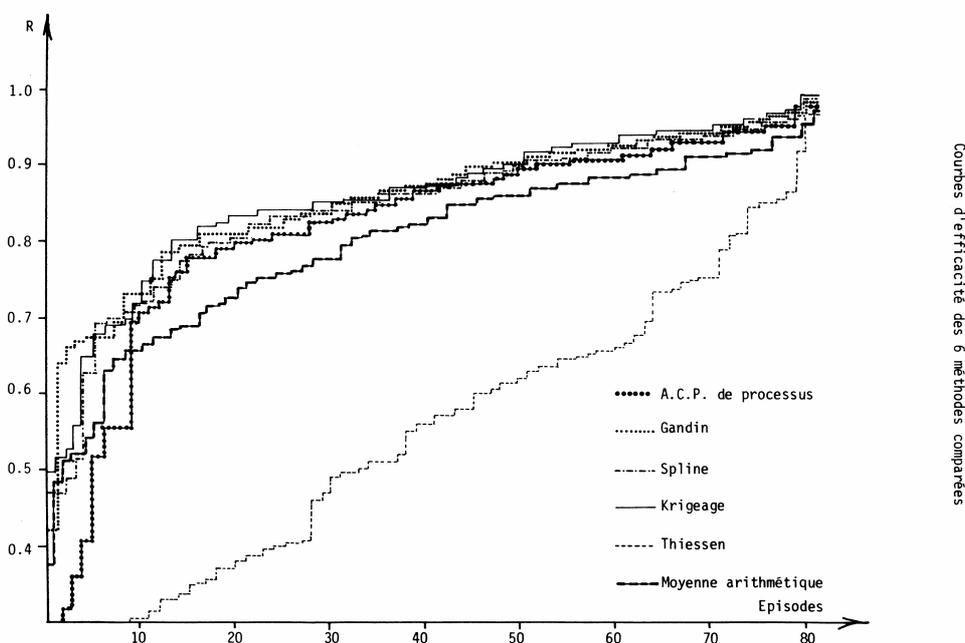


Figure 4-16: Courbe d'efficacité des différentes méthodes d'interpolations

Source [Creutin 1979 pp III.8 fig III.3]

Le réel gain d'efficacité démontré par le travail de Creutin renforce notre choix d'orientation vers une méthode d'interpolation moderne et adaptée à notre cortège de données. L'approche par variographie et krigeage est aujourd'hui d'utilisation courante, bien que les concepts à maîtriser pour le géographe soient assez complexes. C'était pour notre projet, une voie classique et efficace. Cependant, nous nous sommes rapidement heurté à des variogrammes erratiques par manque d'informations de base. Ce constat nous a conduit à nous intéresser aux splines de type plaque mince et au développement d'une méthode originale de rajout de stations virtuelles pour les températures.

Nous verrons plus loin qu'il n'existe pas de recettes toutes faites à appliquer seulement en fonction des données. Bien souvent, le praticien devra adapter ces méthodes à ses objectifs et à ses moyens. Son expérience sera alors déterminante. Les pages qui suivent présentent les principales méthodes et leurs comparaisons pour traduire en cartes nos données climatiques.

4.2.5 Interpoler des phénomènes spatiaux complexes : la voie du Krigeage

Le krigeage est une opération d'estimation. Dans les années 50 le géologue Krige a développé plusieurs méthodes d'estimations statistiques pour déterminer le plus efficacement possible la distribution spatiale de minerai d'or en fonction d'un ensemble de

forages¹¹⁸. Le nom de Krigeage a été donné à cette méthode par Matheron, également inventeur du terme géostatistique. Ce dernier en a formalisé l'approche en s'appuyant sur l'étude des corrélations entre les forages pour en estimer la répartition spatiale. L'étude de cette corrélation passe par un objet statistique appelé le variogramme. Pour que la méthode du krigeage donne des résultats pertinents, il convient de connaître parfaitement les conditions indispensables à son usage. C'est à dire que la moyenne et la variance de la fonction étudiée doivent être au minimum stationnaires d'ordre 2 pour permettre une estimation correcte. Pour préciser, elles ne doivent dépendre que de la distance inter-points et jamais de leur position. La variographie ne dispense donc pas d'une première étude statistique classique du jeu de données à interpoler.

4.2.5.1 La variographie : présentation des concepts

L'interpolation spatiale consiste à estimer une fonction $R(X)$ où $X = (x;y)$ en un point $X_p = (x_p ; y_p)$ quelconque du plan. Cette estimation s'établit en fonction de la proximité des points connus de R et par la définition de leur poids, noté W_i , dans le calcul de $R(X_p)$ ce qui donne la fonction suivante.

$$R(X_p) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot R(X_i)$$

¹¹⁸ Krige/ D.G/ A statistical approach to some basic mine valuation problems on Withwatersrand / Journal of Chem, Metal and mining society of south Africa / 1951 / N°52 p119-139

Nous avons vu plus haut des exemples d'interpolation par différentes méthodes géométriques comme celle des polygones de Thiessen. Dans ce cas, le calcul du poids de chaque point dans la réalisation n'intervient pas. Seule la distance entre chaque point est prise en compte. Dans le cas des méthodes probabilistes d'interpolation, le calcul du W est en revanche prépondérant. Le krigeage va définir ces poids par l'établissement du degré de similarité entre les valeurs données aux points de R . Ce calcul s'établit par le variogramme. Ce dernier représente la variance totale moins la covariance en fonction de la distance entre les points [ARNAUD et EMERY 2000]. On fera usage pour le krigeage du semi-variogramme (noté $\gamma(h)$) afin de déterminer les W .

4.2.5.2 Krigeage : une méthode optimale d'interpolation spatiale

Le krigeage permet d'estimer localement une valeur en tenant compte simultanément de la position des données dans le champ et des caractéristiques propres de la régionalisation des valeurs. Quatre facteurs relatifs à la réalisation sont pris en compte dans le processus de krigeage :

- le nombre d'échantillons et la qualité des données aux points
- l'allure du semis. Un semi régulier offre une meilleure couverture de l'espace qu'un semis présenté en grappes
- la distance entre les mesures et le point que l'on souhaite estimer. D'un point de vue logique, nous pouvons penser que

l'estimation sera meilleure au voisinage immédiat d'une mesure qu'à une distance éloignée.

- la continuité spatiale du phénomène. Le résultat sera d'autant plus correct que le phénomène se comporte de façon régulière dans l'espace.

L'opération qui consiste à pratiquer un krigeage se définit en cinq temps. Le premier de ces temps est la définition du voisinage de krigeage. Il s'agit de poser le cadre « géographique » de prise en compte des données qui vont servir à l'estimation locale. La notion de voisinage glissant revient à ne considérer que les données les plus voisines (quinze au minimum) du site que l'on cherche à estimer. La taille et la forme de ce voisinage sont également importantes, particulièrement dans le cas d'une anisotropie du phénomène. Une valeur lointaine, mais dans l'axe de plus grande continuité du phénomène, exercera une influence plus importante qu'une valeur proche mais dans la direction de plus faible continuité.

Les quatre autres temps concernent l'écriture des quatre contraintes pour que cette estimation soit optimale.

La contrainte de linéarité : (L'estimateur est une combinaison linéaire pondérée des données)

La contrainte d'autorisation : (L'erreur d'estimation doit être une combinaison linéaire autorisée. Pour cela, l'espérance et la variance de cette combinaison doivent exister)

La contrainte de non-biais : (l'espérance de l'erreur d'estimation doit être nulle.)

La contrainte d'optimalité (Il faut des pondérateurs qui minimisent la variance de l'erreur d'estimation sous les contraintes précédentes)

Dans le cas du krigeage d'une seule variable, il existe trois méthodes adaptées au comportement statistique de la variable concernée. Le krigeage simple est adapté pour une variable stationnaire dont la moyenne est connue. Le krigeage ordinaire s'emploie dans le cas d'une variable stationnaire à moyenne inconnue. Pour finir, le krigeage universel permet d'estimer une variable non stationnaire.

L'opération de krigeage consiste à calculer le poids des W en fonction des valeurs données par l'équation du semi variogramme $\gamma(h)$. Ces poids seront obtenus par la multiplication de chaque W des m points présents dans le voisinage glissant par chacune des semi variances associées au point à estimer¹¹⁹.

4.2.5.3 Variogrammes erratiques: les limites fonctionnelles du krigeage

Le krigeage montre son efficacité pour l'estimation optimale (au sens de la moindre variation) d'un phénomène dont on ne possède que des mesures ponctuelles. Cependant, la qualité du résultat reste tributaire de l'ajustement d'un modèle sur le variogramme. Si les modèles ajustés ont des

comportements similaires (au sens formel) à l'origine du variogramme, les estimateurs et les variances du krigeage seront proches. L'opérateur doit donc avoir une idée précise du comportement réel du phénomène et, simultanément, une connaissance formelle de l'algèbre suffisante pour choisir un modèle adéquat. Un déficit à ce niveau conduira à une mauvaise estimation.

L'autre difficulté pour l'usage du krigeage est relative au nombre de mesures spatialisées disponibles. Si ces dernières sont en faible quantité, il sera difficile de contrôler l'allure du variogramme dans les zones proches des origines. Or, la qualité du krigeage est en général directement corrélée à la qualité de l'ajustement aux petites distances. La plupart du temps, le krigeage reste possible dans ce cas en ajustant un variogramme linéaire. Le résultat reste assez efficace mais la méthode est relativement dénaturée. Elle ne doit être utilisée que dans le cas d'un jeu de données faibles.

Exemple de mise en œuvre du krigeage sur notre champ : la T° moyenne du mois de janvier

L'interpolation par krigeage se conduit en deux parties : l'analyse structurale des données avec l'ajustement d'un modèle mathématique sur le semi variogramme puis le processus de krigeage. La qualité du résultat final dépend entièrement de la modélisation du variogramme.

¹¹⁹ [ARNAUD et EMRY 2000] chapitre 6 pages 179 à 192

- **Analyse des données et construction du semi variogramme.**

Nous disposons d'un semis irrégulier de 33 stations de mesures météo. Pour chaque station, nous possédons les 3 informations suivantes : la position en X; Y et la mesure de température. L'analyse structurale est fondée sur la théorie des variables régionalisées de Matheron. C'est à dire que les phénomènes continus dans l'espace ont trois composantes :

- Une tendance générale appelée **variation de premier ordre** qui se déploie sur l'ensemble de la région que nous étudions
- Des variations locales, aléatoires mais corrélées spatialement, les **variations de second ordre**
- Des variations aléatoires et non corrélées, le **bruit** de la distribution

Le calcul des points du variogramme s'établit sur des couples de stations météo

Le nombre de paires possibles pour l'ajustement sur notre champ est : $33 \times 32 / 2 = 528$.

- **Analyse par défaut sous surfer**

Le logiciel Surfer propose tous les outils nécessaires pour mener une analyse variographique et un krigeage. Dans notre cas, un très faible jeu de données sur un champ assez important, la stratégie d'estimation et d'interpolation conseillée est le krigeage ou la méthode par fonction base radiale. Nous exécuterons l'approche par krigeage en suivant le conseil de laisser l'ajustement par défaut (variogramme linéaire ajusté par le logiciel.)

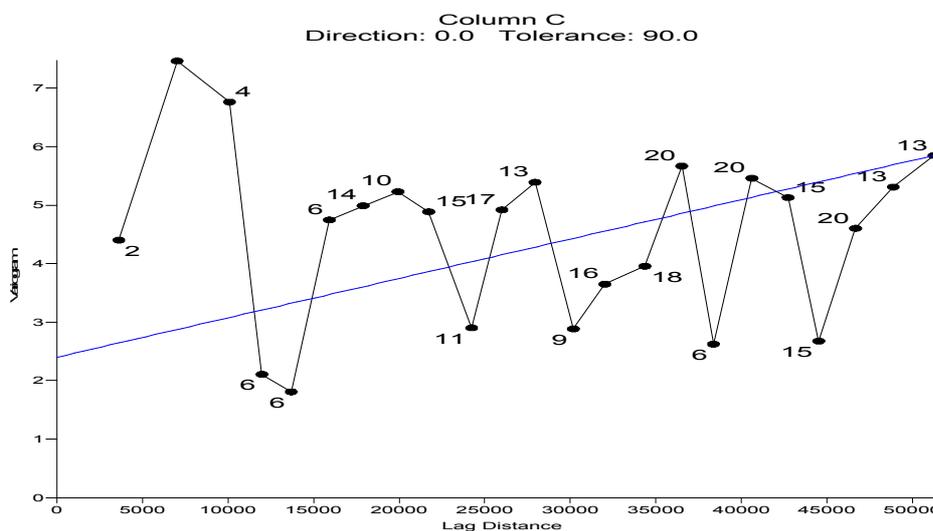


Figure 4-17: Variogramme expérimental et ajustement par défaut

Le logiciel propose un ajustement linéaire sur un variogramme omnidirectionnel. Il s'agit d'une structure gîgogne composée d'un effet de pépite de 2.4 et d'une fonction linéaire de

pende 0.000006 avec la détection d'une anisotropie de 1°.

• Résultat cartographique

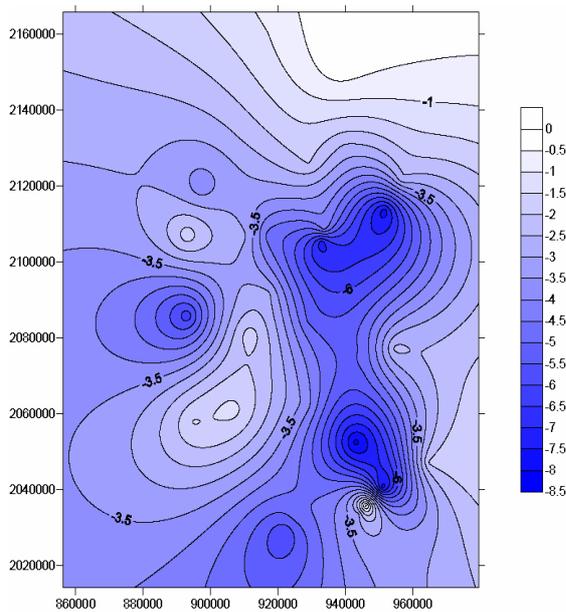


Figure 4-18: Estimations des températures moyennes d'un mois de janvier type par krigeage ordinaire

Cette carte offre une estimation des températures pour un mois de janvier en situation habituelle (moyenne sur 31ans). Compte tenu de la méthode d'ajustement du variogramme, nous savons que le modèle tient compte d'un fort effet de discontinuité aux petites distances. En revanche, le choix d'une unique fonction linéaire pour la modélisation peut être discutable. Cette fonction est sans palier. C'est à dire qu'elle décrit une fonction aléatoire de variance infinie incompatible avec l'hypothèse de stationnarité d'ordre deux. Cela suppose donc une hypothèse intrinsèque¹²⁰ or rien ne nous autorise à formuler cette hypothèse au premier abord car si une fonction aléatoire d'ordre deux est également intrinsèque, la réciproque n'est pas exacte.

¹²⁰ On dira qu'une fonction aléatoire est intrinsèque quand ses accroissements sont stationnaires d'ordre deux. C'est à dire que sa variance augmente à mesure que le domaine sur lequel elle s'exprime augmente.

Cependant, l'hypothèse intrinsèque reste adaptée au phénomène de la température. En effet, intuitivement, on peut penser qu'à mesure que le champ augmente, la variance des échantillons ne converge pas vers la variance à priori. Cela indique simplement que la dispersion de ce phénomène est infinie.

• Validation croisée

La validation croisée est une méthode d'évaluation de la qualité du krigeage. Il s'agit d'estimer chaque donnée (au point de mesure) par krigeage en ne tenant compte que des autres stations. On peut comparer alors la valeur estimée à la « vraie » valeur. En répétant l'opération sur plusieurs modèles de variogrammes, il devient possible de parvenir à une comparaison de leurs performances. On peut alors réaliser une étude statistique simple des erreurs commises pour l'ensemble des données. Le krigeage sera satisfaisant quand la moyenne des erreurs est proche de zéro avec une variance la plus faible possible.

L'étude des résidus de l'estimation par défaut montre que 95% des erreurs sont concentrées entre -1 et 1. Il montre également une tendance légère à sous-estimer la valeur par rapport à la médiane. Cependant, la plupart des valeurs s'organisent près de la valeur 0 et la moyenne est de 0.027 pour une variance de 5.11. On peut donc considérer que l'estimation est sans biais.

Statistiques descriptives

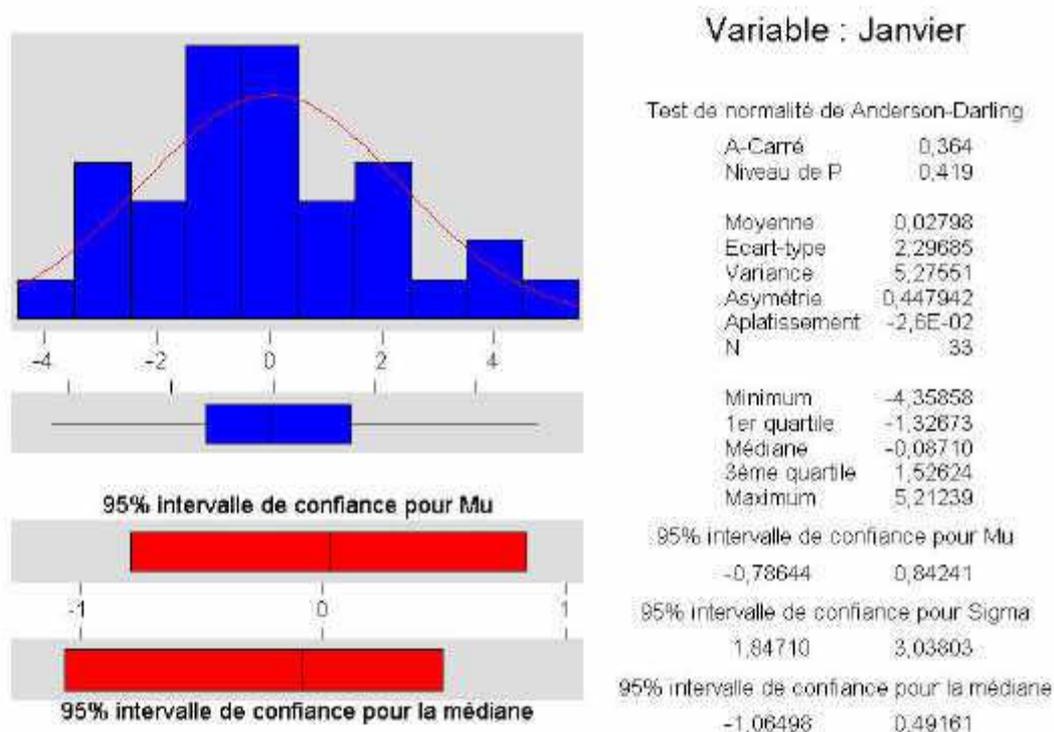


Figure 4-19: Histogramme des résidus de l'estimation par défaut

En conclusion, la carte des températures du mois de janvier peut être considérée comme suffisamment pertinente pour être intégrée dans notre système malgré l'usage d'un modèle linéaire. Mais nous savons que ce modèle ne rendra pas bien compte de l'allure de notre phénomène à de petites distances. Aussi nous allons tenter d'améliorer la qualité du variogramme à des distances plus courtes. En identifiant un palier, nous parviendrons peut être à sortir de l'hypothèse intrinsèque et satisfaire à l'hypothèse de stationnarité d'ordre deux. A ce moment-là nous disposerons d'un choix de fonctions linéaires de modélisation du variogramme plus riche que les simples modèles d'accroissement.

• Essai de krigeage en hypothèse quasi stationnaire

Afin de pouvoir interpoler dans de bonnes conditions, notre jeu de données doit satisfaire à l'hypothèse de stationnarité d'ordre deux (la covariance entre deux sites ne dépend pas de leur position mais seulement de leur séparation.). Le premier variogramme (Figure 4-20) calculé sur notre réalisation montre qu'à l'échelle de notre champ, cette hypothèse n'est pas judicieuse car les valeurs affichent une tendance concave. Cependant, si l'on observe la partie centrale de notre fonction, l'hypothèse d'une stationnarité locale devient acceptable pour un pas de 5000 mètres. Les valeurs fluctuent autour d'une valeur constante

et l'amplitude de ces fluctuations est également constante. En pratique, la fonction aléatoire qui modélise notre phénomène ne doit pas obligatoirement satisfaire à l'hypothèse stationnaire sur l'ensemble de notre champ. On parlera alors d'hypothèse quasi-stationnaire [ARNAUD et EMRY 2000 p 108]

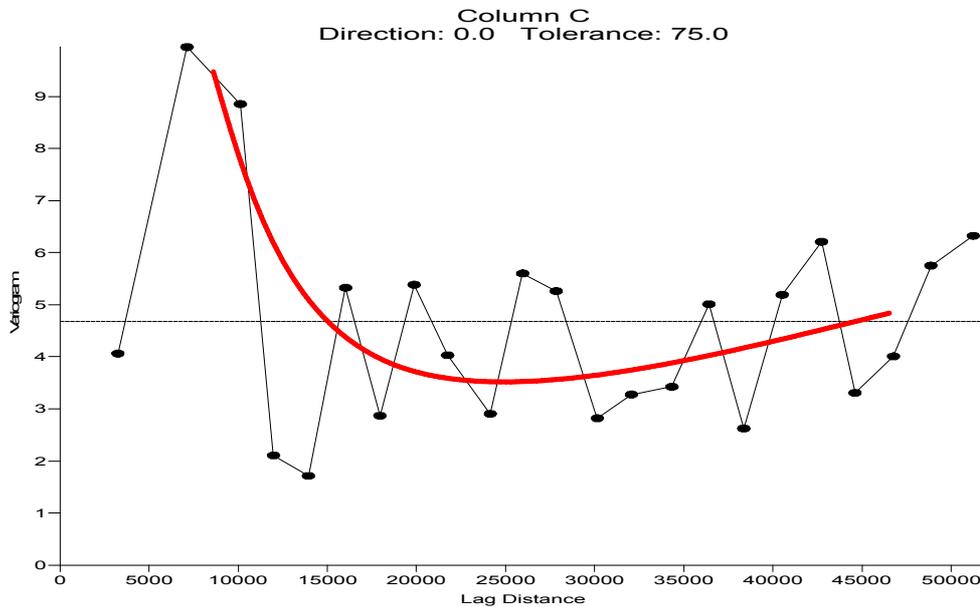


Figure 4-20: Allure générale du variogramme expérimental. La mesure sur l'axe des X est en mètres

L'hypothèse quasi stationnaire est la transcription formelle de la notion d'échelle. Un phénomène régionalisé possède des caractéristiques différentes en fonction de l'échelle à laquelle on le traite. Ici, ce premier variogramme nous montre que l'échelle pertinente se situe autour d'une distance de 5000 M. Si nous parvenons à respecter l'inférence statistique autour de cette valeur nous aurons toutes les chances de parvenir à un modèle correct¹²¹. Notre premier variogramme montre également un fort effet de pépite. Cela est dû à la faiblesse de notre

jeu de donnée par rapport à la taille de notre champ d'interpolation. Nous pouvons donc affirmer que le krigeage sera moins performant aux petites distances quelle que soit la qualité du travail d'ajustement

¹²¹ L'inférence statistique est l'obligation de satisfaire aux conditions de stationnarité et d'ergodicité. Pour cette dernière propriété, il s'agit de vérifier que la suite des moyennes d'espaces convergent vers l'espérance mathématique lorsque le domaine tend vers l'infini.

• Analyse du second variogramme

Nous avons construit un second variogramme sur une distance de 11500 m. Par convention, le variogramme se construit sur la moitié de la distance maximum calculée entre toutes les

paires (Ici 22900). Passé cette limite le nombre de paires devient trop faible. Le pas choisi a été de 5000 m.

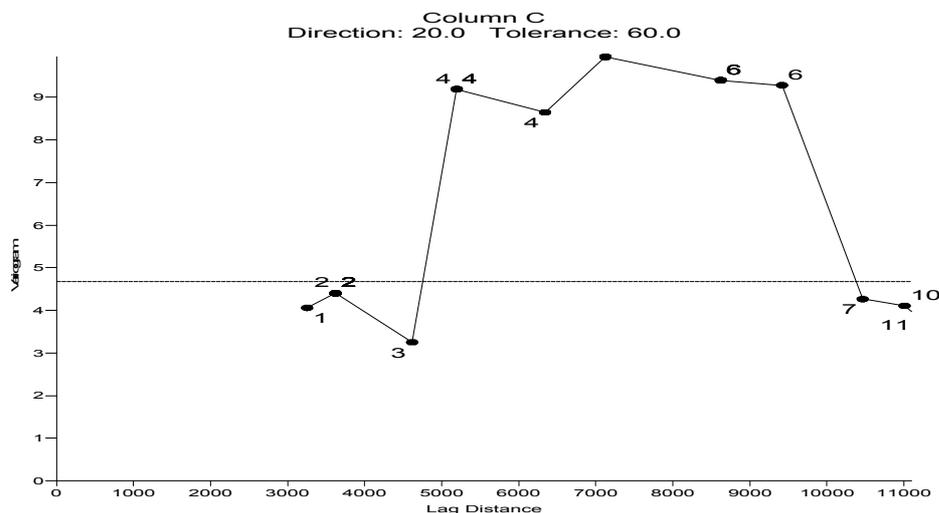


Figure 4-21: Variogramme expérimental N°1 au pas de 5000 M et de porté 11500

La direction choisie correspond à une anisotropie détectée par le calcul d'une série de variogrammes dans toutes les directions du champ (tous les 10°). Cette anisotropie correspond à l'influence de l'altitude sur la mesure. Le nombre de pas a été fixé à 25. Une plus grande quantité de pas n'apportait pas d'informations supplémentaires.

Nous remarquons immédiatement la faiblesse du nombre de paires de points considérés pour le calcul des points expérimentaux. Encore une fois, nous souffrons d'un manque à l'échelle du semis de stations météo. Il est cependant impossible de modifier le pas pour augmenter le nombre de stations prises en compte car nous sortirions de l'hypothèse de quasi- stationnarité. Augmenter la tolérance

déjà très grande ne permettrait plus de tenir compte de l'anisotropie. Bien que peu fiable, ce variogramme représente un modèle acceptable d'analyse structurale de notre phénomène à l'échelle que nous avons choisie.

• Modélisation du variogramme

Trois tendances se dégagent : un comportement pépétique de l'origine jusqu'à la distance de 3000 m, l'arrivée sur un plateau (seuil) vers 5000 m (portée 9) et une tendance croissante légère et régulière jusqu'à 10 000 m.

Nous pouvons ajuster plusieurs sortes de fonctions sur notre modèle. Le caractère pépétique indique qu'il y a « absence »

(partielle ou totale) de corrélation entre les valeurs prises entre deux sites proches.» [ARNAUD et EMERY 2000 p 125] Notre variable est donc discontinue dans notre champ, ce qui n'est guère étonnant pour notre échelle de travail. Le simple fait de changer de versant implique déjà, pour des sites proches, une très grande différence dans la mesure. Que dire alors de sites dont le caractère « proche » se compte en milliers de mètres ? Pour tenir compte de ce facteur, nous introduirons dans notre modèle un effet de pépité de valeur 2.5. Cette valeur a été choisie par extrapolation jusqu'à l'origine.

La modélisation du seuil et du plateau peut se mener de plusieurs façons. Nous pouvons

considérer seulement le seuil et la portée pour la modélisation. A ce moment, l'usage d'une fonction sphérique sera adapté. Les fonctions de ce type croissent rapidement pour atteindre un palier qu'elles ne dépasseront jamais. Nous pouvons également considérer que le plateau est un étalement de la portée. Le palier ne peut donc pas être modélisé de façon aussi forte. Les fonctions exponentielles traduisent le mieux cette idée. Elles croissent tout aussi vite qu'une fonction sphérique pour atteindre les environs d'une valeur qu'elles ne rattraperont jamais. Nous avons choisi cette dernière solution en proposant une fonction exponentielle de portée 8 à 3500 M. Cette fonction supporte également un facteur d'anisotropie de 20°.

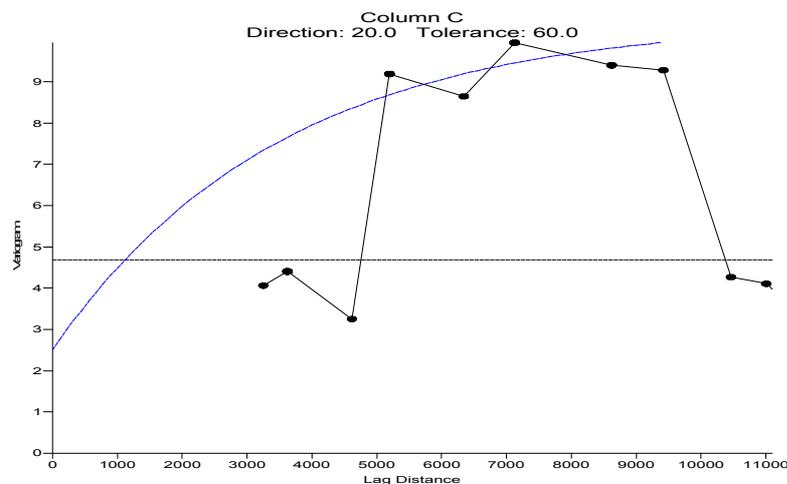


Figure 4-22: Ajustement simple sur le variogramme expérimental n°1

• Krigeage et interpolation

Trois méthodes de krigeage sont possibles : le krigeage simple, ordinaire ou universel. Le premier s'emploie quand la variable à estimer

est stationnaire et de moyenne connue, le second pour une variable stationnaire de moyenne inconnue et le dernier pour les cas de non stationnarité. Dans ce cas, on suppose une dérive (tendance de la moyenne). Dans

notre cas, le krigeage ordinaire (nous avons fait l'hypothèse de quasi-stationnarité d'ordre 2) sera celui que nous utiliserons.

- **Résultat de l'estimation et interpolation**

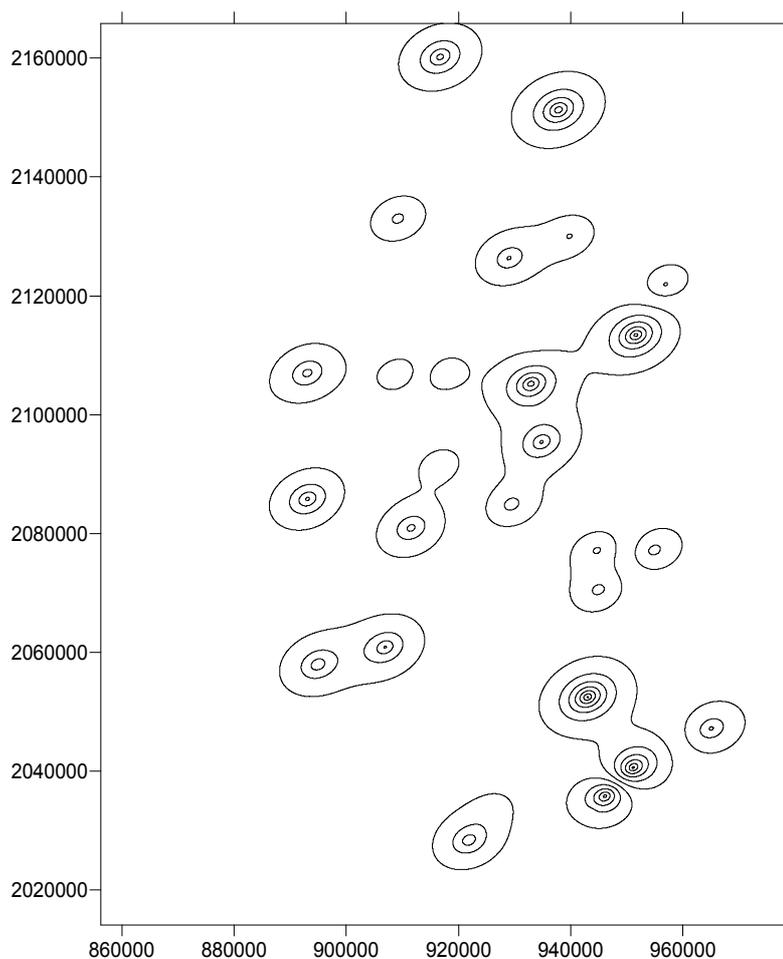


Figure 4-23: Carte des températures d'après l'ajustement exponentiel

Manifestement, cette carte est inacceptable. L'ajustement exponentiel lisse fortement l'estimation dès que l'on s'éloigne des stations de mesure. En revanche, sur un plan « local », nous voyons apparaître des structures qui n'existaient pas dans l'interpolation par

défaut. Ce mauvais résultat est un enseignement. Nous devons reconsidérer la portée maximale du variogramme pour une nouvelle analyse mais les idées, que nous avons développées autour de la structure du phénomène, semblent correctes.

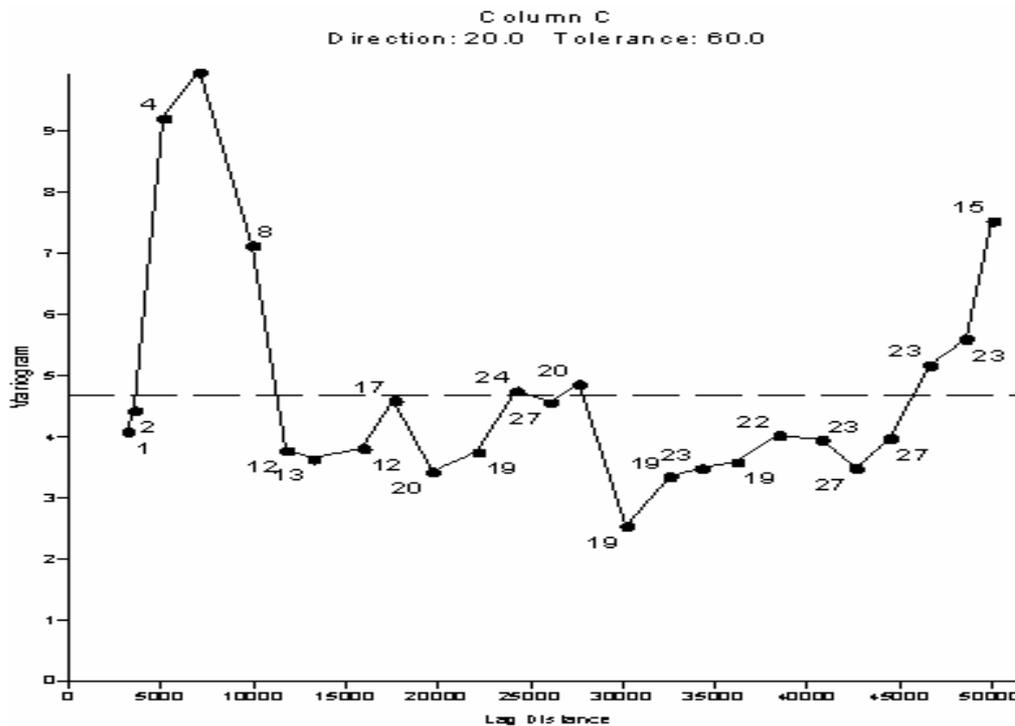


Figure 4-24: Variogramme expérimental N°2 au pas de 5000 M et de portée 5200M

Le variogramme suivant possède une portée égale à celle qui a été proposée avec l'analyse par défaut. Mais nous conservons la direction de 20° et la tolérance de 60° pour tenir compte de l'anisotropie que nous avons détectée. Le nombre de paires utilisées pour le calcul des points est bien plus important que pour notre premier variogramme. Il sera donc plus fiable. Comme prévu, nous retrouvons le caractère pépitique aux petites distances. A partir de 10000 mètres, ce variogramme propose trois grandes structures : une première croissance de 10 000 M à 28 000 M, une décroissance brusque de 28 000 à 30000 M et, de nouveau une croissance de 30 000 à 52000 M.

Ce variogramme est complexe car il présente une rupture de pente importante entre les deux croissances. La structuration des données change à partir d'une certaine échelle. Nous

devrons ajuster notre modèle en sommant des modèles élémentaires afin d'obtenir une structure gigogne. C'est dire que nous emploierons un type de modèle pour les petites distances, un autre pour les distances moyennes et un autre pour les grandes distances. Nous utiliserons un effet de pépites de palier 2.9, pour les petites distances, un modèle sphérique de portée 12000 et de palier 4.2 pour les distances moyennes. Enfin, un modèle linéaire de pente 0.000014 traitera des grandes distances. Ce dernier modèle comprend une anisotropie de 79° dans l'axe de plus grande direction sur 50% du champ.

L'effet de pépité rend compte du double phénomène de micro structures (le pas choisi de 5000 M ne permet pas la visualisation de structures plus fines) et de faiblesse de notre semis. La fonction sphérique traduit les effets de l'altitude sur la température des massifs pré

alpines (notre variogramme donne une direction d'ouest en est). Nous avons décidé d'intégrer la rupture de pente dans le modèle linéaire prévu pour les grandes distances. Ce modèle servira à traduire la tendance générale bien

connue du gradient thermique en tenant compte du phénomène d'anisotropie (les altitudes les plus importantes de notre champs sont orientées selon un axe ouest est).

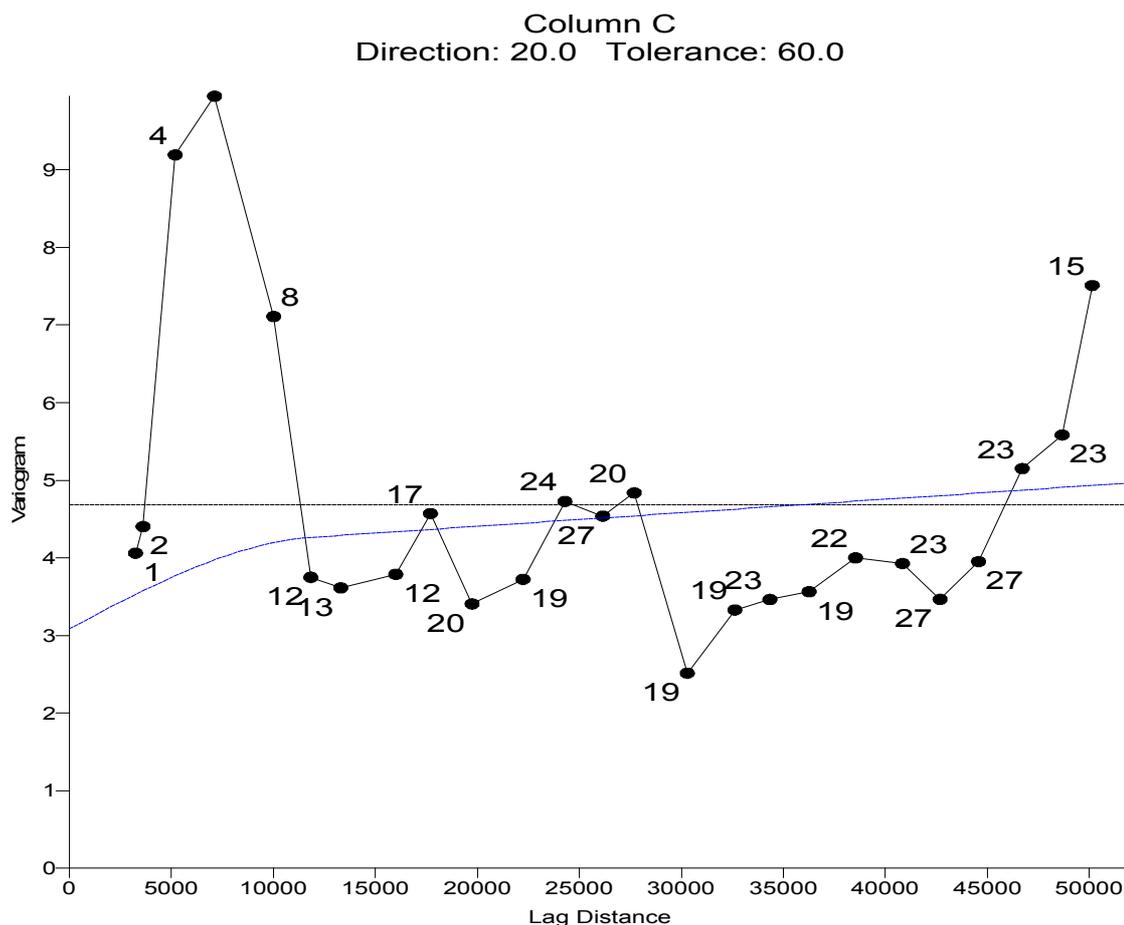


Figure 4-25: Ajustement du modèle sur le variogramme expérimental n°2

• Analyse et résultat cartographique

Le résultat cartographique (Figure 4-26) de l'interpolation des températures diffère peu du modèle initial. Il fait cependant apparaître des structures locales plus fines que celles proposées par le logiciel en choix par défaut. (Figure 4-18). La moyenne des erreurs de ce modèle est de $-0,0065$ pour une variance de $5,09$. La plupart des valeurs s'organisent

autour de zéro. Il est donc sans biais. Cependant les erreurs d'estimations sont importantes pour les stations esseulées. Par comparaison avec le modèle linéaire proposé par défaut, ce modèle offre une estimation meilleure aux distances petites et moyennes et l'effet de l'anisotropie est bien rendu.

L'objectif d'amélioration du krigeage n'est pourtant que partiellement atteint. Compte tenu de la faiblesse de notre jeu de données, il semble que le modèle glogne (linéaire et effet de pépite) proposé par le logiciel soit la solution qui offre la meilleure interpolation sur le plan global au détriment de structures plus « locales ». La stratégie de rajout de stations virtuelles sur notre semis que nous verrons plus bas prend ici un sens évident. En renforçant le semis, nous parviendrons à détailler plus de structures aux petites distances. La tendance générale sera aussi mieux comprise et donc mieux modélisée. En revanche, nous devons conserver très probablement une hypothèse intrinsèque pour l'ajustement des variogrammes pour le phénomène de la température. Ce choix d'usage de l'hypothèse la plus flexible semble la plus adaptée bien que les modèles disponibles pour l'ajustement soient très restreints.

La méthode du krigeage décrit ci-dessus sera employée pour l'interpolation de toutes les cartes de phénomène climatique. A l'avenir nous n'indiquerons pas de façon aussi détaillée les étapes qui ont conduit aux cartes.¹²²

¹²² Chaque carte et sa validation croisée sera indiquée en annexe.

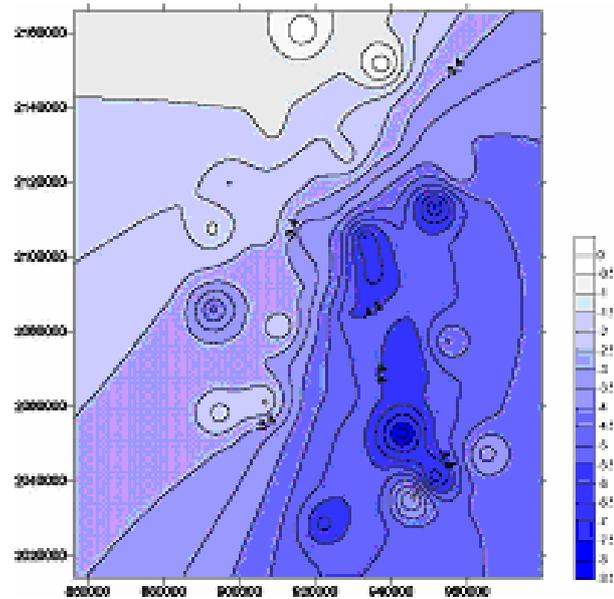


Figure 4-26: Carte des températures pour un mois de janvier moyen en hypothèse quasi stationnaire d'ordre deux

4.2.6 Les fonctions base radiale : un exemple à travers les splines de type plaque mince

Les fonctions base radiales proposent des alternatives intéressantes en matière d'interpolation. Peu utilisées en raison d'un coût important en puissance de calcul, elles se développent maintenant grâce à l'amélioration de l'outil informatique. Elles présentent une forte analogie avec les objectifs du variogramme en krigeage. C'est à dire qu'elles vont proposer le meilleur poids possible (W) à chacun des points de la réalisation en fonction de leur position dans le champ, de la valeur qui leur est attachée et d'un facteur de lissage du phénomène.

Il existe plusieurs types de fonctions base radiales. Dans cette catégorie, les plus utilisées sont les fonctions multiquadriques et

les fonctions splines de type plaque mince. Nous nous sommes particulièrement intéressés à ces dernières. Historiquement, l'approche par interpolation de type plaque mince a donné des résultats probants dans l'interpolation de phénomènes continus dans l'espace comme les précipitations. Creutin [CREUTIN 1979] montre même que ces dernières rivalisent en efficacité avec le krigeage.

L'usage des fonctions splines permet de conjuguer un formalisme mathématique efficace tout en offrant une évaluation de l'erreur d'interpolation à condition de formuler quelques hypothèses restrictives. On peut considérer que l'interpolation par fonction spline présente une forte analogie avec le krigeage universel. Il devient alors possible d'apprécier la variance d'estimation. C'est une voie intéressante pour les cas de variogrammes erratiques ou trop complexes à ajuster. Cependant, les exigences en calcul demeurent importantes et nécessitent des ordinateurs puissants.

4.2.6.1 Définition physique des fonctions splines

Une spline est une règle métallique flexible qui, grâce à sa possibilité de déformation, permet de tracer des courbes passant par plusieurs points. Il s'agit d'un instrument aujourd'hui peu utilisé mais qui était fort répandu dans les bureaux de dessinateurs. Le tracé qui en résulte peut se concevoir comme une interpolation physique. C'est à dire que la

forme de la spline est celle qui minimise l'énergie de flexion entre le premier et dernier point utilisé. Elle représente donc le plus grand rayon de courbure possible qui passe par tous les points. Sur les bordures, elle reprend sa forme rectiligne. Cette dernière remarque ne sera pas sans conséquence sur l'interpolation finale. Cela indique que l'interpolation proposée au delà de la surface totale couverte par les stations météorologiques de notre champs sera d'autant moins bonne que l'on s'éloigne de ces points pour se rapprocher vers les bordures du champ.

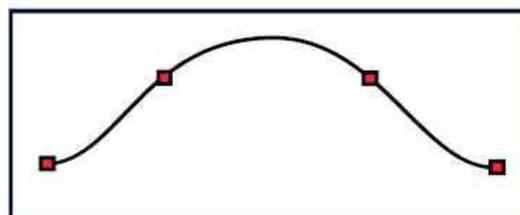


Figure 4-27: Exemple de spline à une dimension

Nous pouvons modéliser cette idée d'un point de vue mathématique par une intégrale destinée à maximiser le rayon de courbure de la fonction, c'est-à-dire de minimiser l'intégrale de la dérivée seconde au carré de la fonction :

$$\int_{X_1}^{X_2} \left\{ R''(x) \right\}^2 dx = \text{minimum}$$

où $R''(x)$ est la dérivée seconde de $R(x)$.

Il existe plusieurs formes de fonctions splines. La plus simple est connue sous le nom de spline cubique.

$$R(x) = \alpha x + \beta + \sum_{i=1}^n \lambda_i \frac{|x - x_i|^3}{3!}$$

où α, β et λ_i sont tels que pour tout i de 1 à n et que l'on ait l'approximation égale à la fonction en tout les points connus ainsi que:

$$\int_{x_1}^{x_2} \left\{ R''(x) \right\}^2 dx = \text{minimum.}$$

Nous pouvons interpoler dans une seule dimension avec cette méthode. Pour passer à deux dimensions, nous devons recourir aux splines bi-cubiques. Nous obtenons alors une surface qui serait la représentation mathématique d'une plaque souple et déformable (Figure 4-28) qui passerait par tous les points du plan tout en maximisant son rayon de courbure. L'intégrale double de la dérivée à minimiser a la forme suivante :

$$\iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 R(x, y)}{\partial^2 x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 R(x, y)}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 R(x, y)}{\partial^2 y} \right)^2 \right\} \partial x \partial y = \text{minimum}$$

L'équation qui permet de généraliser l'interpolation de une à deux dimensions est donc:

$$R_{app}(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + \sum_{i=1}^n b_i K(s - s_i)$$

$$\text{avec } \forall h \in \text{domaine } K(h) = |h|^2 \ln(|h|)$$

et a_0, a_1, a_2 et b_i solutions du système :

$$\begin{cases} a_0 + a_1 x_i + a_2 y_i + \sum_{j=1}^n b_j K(s_i - s_j) = R(s_i) & \forall i = 1..n \\ \sum_{j=1}^n b_j = 0 & \sum_{j=1}^n b_j x_j = 0 & \sum_{j=1}^n b_j y_j = 0 \end{cases}$$

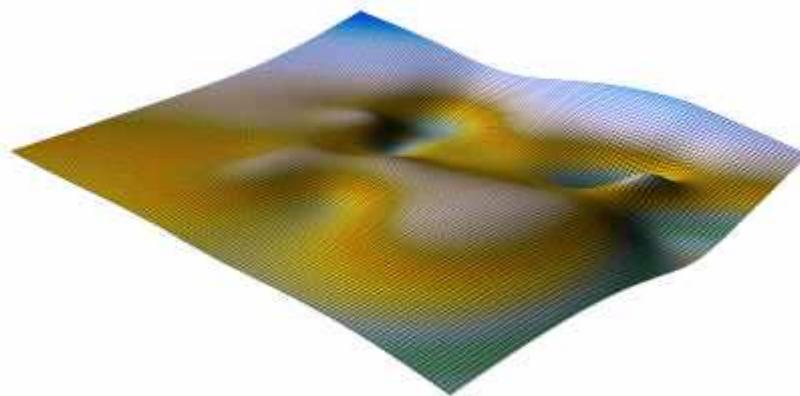


Figure 4-28: Exemple d'une plaque mince de type spline bi-cubique

Le système ci-dessus est assez proche du système développé dans le cas du krigeage universel c'est à dire quand la variable est non

stationnaire. Les fonctions splines de type plaque mince peuvent donc être considérées comme un cas particulier de krigeage. Comme

nous l'avons indiqué plus haut, il devient alors possible d'évaluer la variance d'estimation à condition de formuler l'hypothèse que la dérive est linéaire :

4.2.6.2 Exemple d'interpolation par fonction Base radiale de type plaque mince

L'interpolation par fonction base radiale peut se prendre dans sa seule assertion géométrique. Nous utiliserons les fonctionnalités proposées par le logiciel SURFER. Il convient donc de préciser le cadre d'usage de la fonction Thin Plate Spline proposé dans le menu Base radial fuction.

La fonction proposée par le logiciel est :

$$R(h) = (h^2 + T^2) \log(h^2 + T^2)$$

où h est la distance relative entre le point (data) et le nœud (interpolation) recalculé en fonction de l'anisotropie du phénomène en Z.

T^2 est le facteur de tension (lissage) proposé par l'utilisateur. L'algorithme utilisé pour déterminer ce coefficient de tension est le suivant :

(Longueur de la diagonale maximale du champ)*2/ (25* nombre de points de la réalisation)¹²³

Le point crucial du calcul est l'inversion de la matrice nécessaire à la résolution du système. Des configurations particulières du champ peuvent conduire à des matrices singulières. La voie de l'interpolation par spline de type plaque mince devient alors impossible.

¹²³ Carlson R E et FOLEY T A (1991) The parameter R^2 in the multiquadric Interpolation / computer math applic V 21 n° 9 p 29 - 42

Cependant, ce problème peut, parfois, être lié à la puissance de calcul proposée par l'ordinateur qui ne parvient pas à résoudre le problème de l'inversion¹²⁴.

• Interpolation et validation croisée.

Le facteur de tension R^2 vaut 30000000. L'interpolation par spline de type plaque mince propose la carte suivante(Figure 4-29).

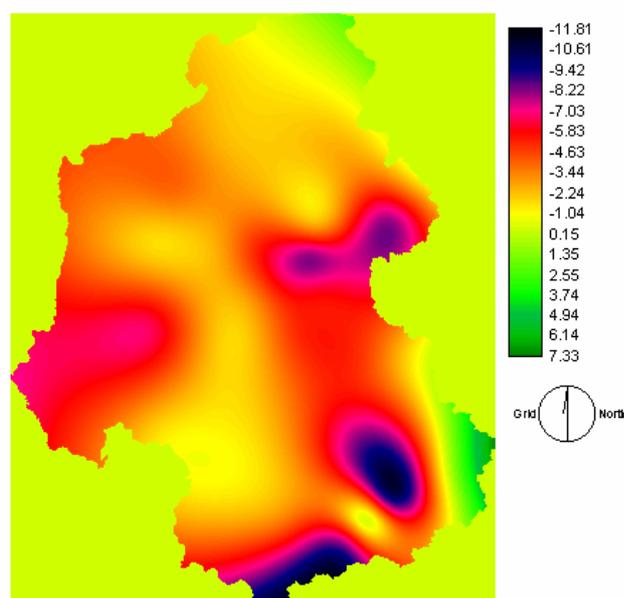


Figure 4-29: carte des températures de janvier habituel (méthode spline plaque mince)

L'étude de la disposition des résidus montre que cette approche est parfaitement valable et puissante (Figure 4-30).

¹²⁴ Nous avons été directement confrontés à ce problème de limite. Les premières machines que nous utilisions nous indiquaient l'apparition de matrices singulières sur les données exemples du mois de janvier. Le passage sur un ordinateur plus puissant a suffi à résoudre ce problème puisque nous avons conservé les mêmes valeurs de R^2 .

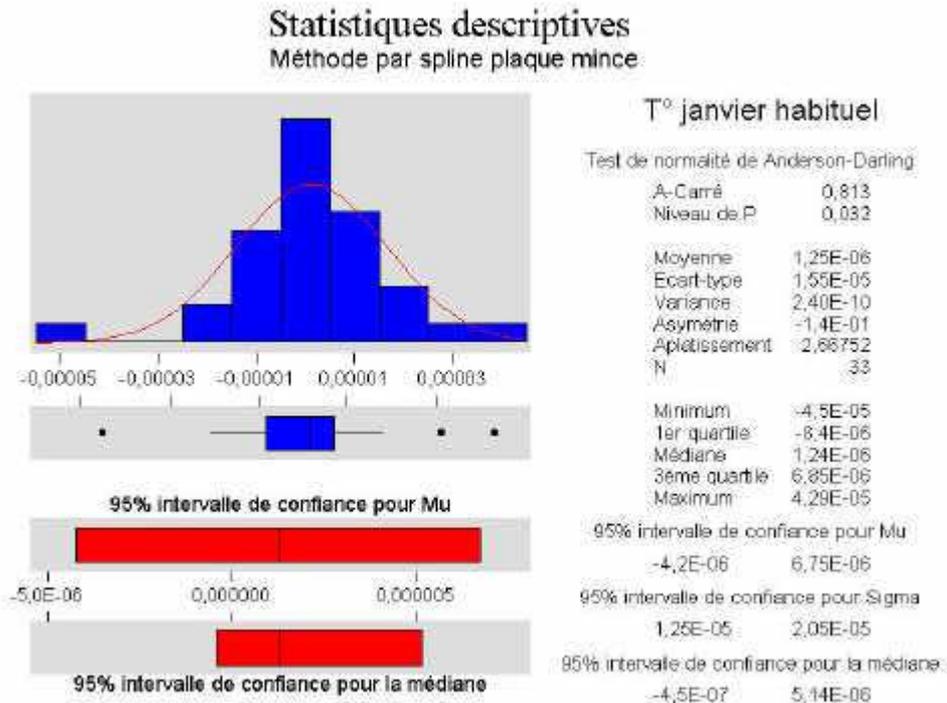


Figure 4-30: Validation croisée répartition des résidus

4.3 Des données vers la carte : une autre approche pour interpoler des phénomènes climatiques

Nous venons de traiter des méthodes d'interpolations qui se basent sur la position des données dans le champ. Il existe une approche différente qui consiste à déterminer des lois d'explication de l'allure du phénomène dans l'espace. Le travail pour interpoler consiste alors à mettre en évidence ces lois. On utilisera pour cela les méthodes de la statistique exploratoire des données.

Tous les phénomènes continus qui se déploient dans l'espace ne sont pas diffus. Certains sont déterminés par des lois physiques qui décrivent parfaitement leurs caractéristiques. La différence de dureté des

roches se traduit spatialement par des pentes plus ou moins fortes en fonction de l'érosion en action sur le champ d'étude. Ce phénomène est bien connu des géomorphologues. La relation linéaire décrite par cette loi peut donc servir d'interpolateur.

L'une des manières pour interpoler des températures données aux stations météorologiques serait de l'aborder à partir de la loi des gradients thermiques. D'un point de vue géo-climatique, cette approche ne peut s'appliquer qu'au facteur température car il existe une relation mathématique sur laquelle nous pouvons nous appuyer pour créer nos cartes. Il est évident que le caractère complexe (au sens physique du terme) du phénomène des précipitations ne permet pas d'utiliser une

voie similaire pour construire les cartes de précipitations.

La décroissance de la pression au niveau des basses couches atmosphériques permet une diminution de la température que l'on peut calculer assez précisément à l'aide du premier principe de la thermodynamique. Ce gradient est dit adiabatique. C'est à dire que la particule d'air n'échange pas de chaleur avec son environnement. Les mouvements de subsidences ou d'ascendances qui affectent les particules sont en effet suffisamment rapides pour considérer qu'elles n'échangent pas de chaleurs. Pour l'air sec ce gradient est de -1° pour 100 mètres [GUYOT 1997] [VIGNEAU 2000]. Pour l'air humide, ce gradient est compris entre -0.5° et -1° . Ozenda [OZENDA 1986] remarque que ce gradient pris dans le cadre d'une mesure moyenne annuelle décroît linéairement à peu près partout avec l'altitude « à raison de 0.55° pour 100 mètres¹²⁵ ».

En revanche, dans le cas de moyennes mensuelles, ce gradient thermique peut varier considérablement en fonction de la saison [OZENDA 1986]. En été, la décroissance est en moyenne de 0.70 et en hiver, de 0.40. Mais Carrega montre qu'il reste le facteur principal de détermination d'une température en montagne [CARREGA 1982]

Dans notre cas, nous disposons de mesures où le relief et le pas de temps mensuel choisi

introduisent des distorsions par rapport à cette loi. Nous avons donc travaillé sur le cortège de données pour élaborer des modèles linéaires plus locaux. La démarche a été la suivante.

4.3.1 Construction des modèles de régression linéaire

Nous disposons d'un ensemble de mesures climatiques (t° Moyennes minimales et maximales) pour 33 stations sur 30 ans (1960/1990). Afin de faire apparaître les distorsions locales de la loi des gradients adiabatiques, nous avons cherché à faire émerger des groupes de stations ayant des « comportements climatiques » proches. L'idée que nous avons suivie s'appuyait sur l'hypothèse que ces groupes de stations seraient les individus sur lesquels nous produirions nos modèles d'interpolation linéaires, tenant compte, par ce biais, des particularités locales. La détermination des groupes et leur composition s'est alors construite en deux temps : une analyse en composante principale et une classification ascendante hiérarchique.

4.3.1.1 Développement de la démarche

L'objectif principal ainsi caractérisé, nous nous sommes attachés à rechercher les liens entre les stations météorologiques et les variables du terrain susceptibles d'influencer la température. Nous savons par exemple que l'altitude est un facteur prépondérant dans la

¹²⁵ OZENDA / La végétation de la chaîne alpine / Masson / 1986 page 9

détermination d'une température [CARREGA 1982. OZENDA 1986]. L'analyse en composante principale nous permettra de donner la valeur locale (à l'intérieur des bornes de notre champ) de l'influence de cette variable et des autres, tant au niveau global qu'à l'échelle de chacune des stations. Ces informations seront précieuses pour la mise en place de modèles linéaires d'interpolation plus locaux. Dans un second temps, les axes factoriels serviront de données d'entrée pour une classification ascendante hiérarchique. De cette façon, nous ferons émerger des groupes sur des informations fondées sur la mise en valeur des individus les plus représentatifs (au sens statistique du terme). C'est sur chacun de ces groupes que nous développerons un modèle d'interpolation linéaire. De cette façon, nous espérons introduire pour l'interpolation une dimension locale du phénomène des températures.

du MNT était de 50 M. Ce pas n'est certainement pas le plus adéquat pour une analyse spatiale portant sur le climat à l'échelon local mais c'est celui qui est proposé par l'IGN dans sa Base Alti. Les valeurs entrantes du tableau sont donc des approximations présentées sans retraitement sauf pour le cas de l'orientation.

4.3.1.2 Analyse en composante principale

Le tableau de données comprend 33 stations et 6 variables. Son allure est fonction de choix et de contraintes. Les 6 variables sont des représentations du terrain sur lequel sont positionnées les stations. Les informations relatives à l'altitude, la pente et l'orientation¹²⁶ ont été acquises par analyse SIG raster. Le pas

¹²⁶ Dans le cas de cette variable, nous avons traduit l'orientation en degré (1 variable) en deux variables orientation en radian selon un axe Nord-sud et Est-ouest. Cette opération a été rendu obligatoire pour tenir compte de l'effet de similarité d'orientation dans l'analyse factorielle, ce qui est impossible à faire en conservant l'orientation donnée en degré. Si nous avons conservé les mesures en degré, l'ACP aurait considéré que 360° était opposé à 0°.

• La matrice de corrélation

	Z	x	y	EO (cos)	NS (sin)	PENTE
Z	1	0,7862	-0,5080	-0,1010	-0,0580	0,3271
x	0,7862	1	-0,2662	-0,2699	-0,2184	0,4108
y	-0,5080	-0,2662	1	0,1754	-0,2958	-0,1890
EO (cos)	-0,1010	-0,2699	0,1754	1	0,0481	0,1282
NS (sin)	-0,0580	-0,2184	-0,2958	0,0481	1	-0,0122
PENTE	0,3271	0,4108	-0,1890	0,1282	-0,0122	1

L'étude de la matrice de corrélation montre que l'altitude est très fortement corrélée (78%) à la variable X. En effet, les Alpes offrent un profil global de plus en plus élevé à mesure que l'on se déplace vers l'est (Figure 4-31)



Figure 4-31: Evolution de l'altitude des Alpes selon un transect orienté de l'ouest vers l'est

Les autres variables sont, comme nous pouvions nous y attendre, relativement indépendantes. Nous remarquons que la pente est également corrélée aux facteurs X et Z. Il s'agit simplement encore de l'effet relatif à la disposition du relief car les pentes augmentent en fonction de l'altitude. La corrélation altitude et longitude nous obligera à extraire l'une de ces variables du tableau de données et relancer l'étude de l'ACP afin de mieux distinguer l'information redondante contenue dans chacune de ces deux variables.

initial. Les seconds, troisièmes et quatrièmes facteurs représentent respectivement 21%, 18% et 10% de l'information totale. En retenant ces quatre facteurs, nous parvenons à un total de 89% de l'information dont 79% pour les trois premiers axes. L'objectif de résumer l'information est atteint sans retenir les deux derniers facteurs qui ne contiennent que 10% de l'information du tableau de départ. (Figure 4-32). L'étude des vecteurs propres montre tout le poids de la variable Z dans notre jeu de données. Chaque axe factoriel est une représentation par opposition :

• La hiérarchie des facteurs

Le premier facteur représente 39% de l'information totale contenue dans le tableau

L'altitude / longitude en contraste avec la latitude pour le facteur 1

L'orientation selon un axe Nord-sud en contreponds de la variable Y principalement, pour le facteur 2

L'orientation selon un axe Est-ouest par rapport à la variable X et Z pour l'axe 3

La pente opposée à un axe d'orientation Est Ouest pour le facteur 4

Valeur propres	1	2	3	4	5	6
Valeur	2,3463	1,2728	1,1289	0,6454	0,4758	0,1309
% de variabilité	0,3910	0,2121	0,1881	0,1076	0,0793	0,0218
% cumulé	0,3910	0,6032	0,7913	0,8989	0,9782	1,0000
Vecteurs :	1	2	3	4	5	6
Z	0,5891	-0,0091	0,0314	-0,3941	0,2368	0,6637
x	0,5749	-0,2623	-0,0486	-0,0089	0,4025	-0,6604
y	-0,4007	-0,5348	0,1113	0,2335	0,6514	0,2493
EO (cos)	-0,1790	0,0343	0,8134	-0,5141	0,0393	-0,1984
NS (sin)	-0,0402	0,8005	0,0628	0,2183	0,5526	-0,0237
PENTE	0,3581	-0,0552	0,5645	0,6915	-0,2251	0,1456

Figure 4-32: tableau des valeurs propres de la distribution

L'étude des vecteurs propres renforce l'intérêt de relancer une ACP en éliminant l'une des deux variables : X ou Z afin de mieux comprendre le poids réel des variables sur nos individus.

• La corrélation des variables avec les facteurs

	facteur 1	facteur 2	facteur 3	facteur 4
Z	0,9023	-0,0103	0,0334	-0,3166
x	0,8806	-0,2959	-0,0516	-0,0072
y	-0,6138	-0,6034	0,1183	0,1876
EO (cos)	-0,2742	0,0387	0,8642	-0,4130
NS (sin)	-0,0616	0,9031	0,0668	0,1754
PENTE	0,5485	-0,0622	0,5998	0,5555

Figure 4-33: Tableau de corrélation des variables avec les axes

Nous retrouvons les mêmes significations, axe par axe, que pour les vecteurs propres mais du point de vue des variables. Il s'agit ici d'évaluer la qualité de l'ajustement des variables résumées par chaque axe, dans l'information totale. Pour le facteur 1, l'altitude compte pour 90% de l'information totale résumé et la longitude pour 88%. Nous retrouvons,

l'opposition avec la latitude de valeur négative 61% (Figure 4-33).

Le poids des variables du facteur 2 exprime la prédominance de la variable orientation selon l'axe Nord Sud (90%) par opposition aux variables de position Y. (-60%) et X (-29%) Cette information indique que l'axe met en valeur les stations où l'orientation comprise

entre 0° et 180° est particulièrement prépondérante.

Les variables du facteur 3 sont fortement influencées par l'orientation selon un axe Est-Ouest (86%) mais aussi par la pente (59%)

Enfin, les variables du facteur 4 sont particulièrement concernées par la pente (55%) par opposition à l'axe Est-Ouest (-41%) et la variable Z (-31%)

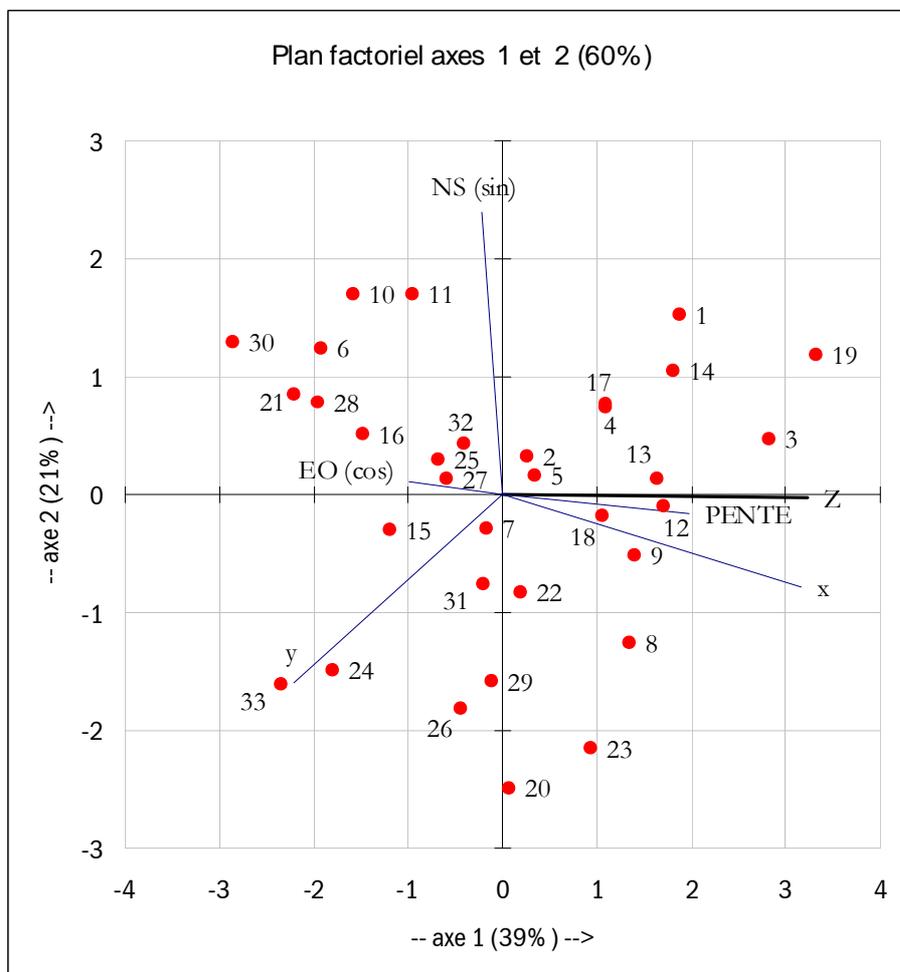


Figure 4-34: Analyse du score des individus par plan factoriel

Le plan factoriel (Figure 4-34) représente les individus sur l'axe 1 et 2. Les noms de station ont été remplacés par un entier pour des raisons de lisibilité¹²⁷. Nous pouvons établir des regroupements de stations à partir de ce plan

Le premier axe oppose les stations à altitudes élevées, Aussois [1]; Bessans [3] aux stations à l'altitude plus modeste, Thonon [33] les Bains, Rumilly [30]). On interprètera les corrélations avec l'axe 1 en relation avec la variable X. Le deuxième axe oppose les stations selon l'orientation Nord-Sud. Quatre grands groupes de stations se dégagent. Les stations orientées nord-sud et altitude faible

¹²⁷ Le tableau de correspondance est présenté en annexe

composent un groupe de stations de piémont liés aux grands mouvements topographiques qui structurent le massif alpin dans sa longueur, La Rochette les cités [10], Lescheraine [6], Annecy [21]. Les stations avec une altitude intermédiaire mais décorrelées à l'axe d'orientation Nord sud correspondent aux profondes vallées latérales qui s'enfoncent dans le massif (Chamonix [22], Abondance [20].) Les stations de type alpin sont, bien entendu, représentées par une forte corrélation avec l'axe 1. Il s'agit de station comme Aussois [1]. Bessans[2] ou Lanslebourg Mont cenis [19]. Enfin, un dernier groupe représente les stations « de plaine », faible altitude et décorrélation avec l'axe Nord-Sud. C'est le cas des stations de Thonon les bains [33] et Contamine sur Arve [24].

Plusieurs stations sont mal représentées dans notre plan factoriel. C'est à dire qu'elles sont positionnées à 0.5 ou moins de la valeur 0 des axes. IL s'agit de Hauteluze Belleville [5], Moutier centre Ville [7], Beaufort Arèche [2], la Clusaz [25] et Combloux le perret [27]. Ces stations forment cependant un groupe de type massifs préalpins. Leur mauvaise représentation est liée au fait que ces massifs correspondent peu aux structures générales proposées par l'axe factoriel n° 1. En effet, l'altitude est moyenne et les formes de reliefs générales qui influencent l'orientation Nord-sud de l'axe 2 sont peu marquées.

L'apport principal de l'étude du plan factoriel des axes 1 et 3 concerne ce groupe (figX).

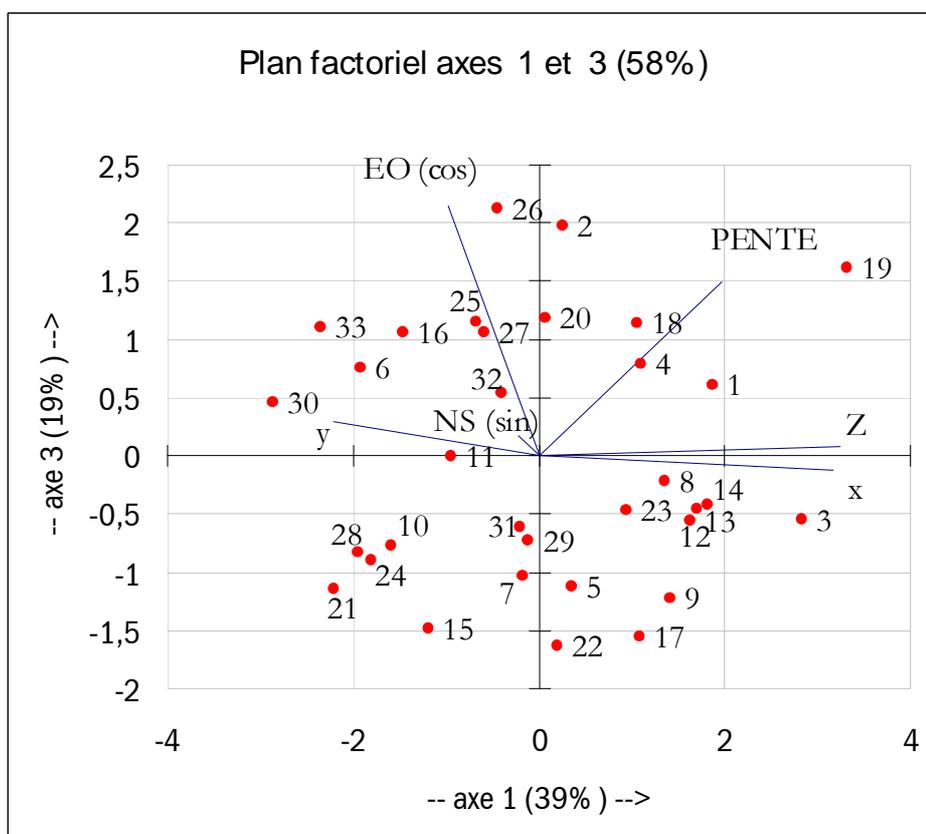


Figure 4-35: Analyse du score des individus par plan factoriel

Nous remarquons que les stations mal représentées par le plan factoriel N°1 sont, ici, bien résumées par l'axe 3 du plan. Le groupe de stations de type « préalpin » se décompose en deux catégories par rapport à l'axe d'orientation Est-Ouest. Les stations Hauteluze Belleville [7] et Moutier centre ville [5] sont décorréliées à cet axe alors que les autres stations, Beaufort Arèche, la Clusaz et Comblous le Perret sont assez fortement corrélées à cette orientation.

La direction des variables X et Z dans les plans factoriels et leur proximité montre que nous ne pouvons pas nous contenter de cette analyse car l'information contenue par ces deux variables est certainement en partie redondante. Il s'agit donc maintenant d'étudier l'influence que ces deux variables exercent sur les individus.

- **Etude de l'influence des variables X et Z sur les individus**

Nous devons comprendre et évaluer la quantité d'informations redondantes portée par les variables X et Z. Ce travail se justifie par le souci de ne pas accorder plus d'importance à ces variables dans le plan factoriel qu'elles n'en ont vraiment. Cette opération est déterminante pour ne pas introduire un biais dans la classification ascendante hiérarchique. L'analyse de la nouvelle ACP sera conduite en comparaison avec les conclusions de la première analyse que nous avons traitée ci-dessus.

- **Matrice des corrélations comparées et total de l'information résumée**

L'analyse des tableaux de valeur propre montre que l'extraction d'une des deux variables ne réduit pas la quantité d'information résumée. Elle s'améliore même car, en enlevant la variable X, elle passe à 92% de l'information résumée par les quatre premiers facteurs et, en enlevant la variable Z, à 91% contre 89% pour la première analyse. Une partie de l'information saute d'un axe vers l'autre. Dans le cas de l'extraction de la variable X, l'axe 1 perd 4% de l'information qu'il résume au profit des axes 2, 3 et 4. Dans le cas de l'extraction de la variable Z, cette valeur passe à 7%. Comme on peut s'y attendre, la valeur Z possède plus d'information que la variable X. Ceci s'explique principalement par le choix de création d'une station en fonction de l'altitude plutôt que par la longitude. Eliminer la variable Z sera donc moins pertinent que se défaire de la variable X. Enfin, l'étude comparée des matrices de corrélations montre que les variables sont moins corrélées entre elles, particulièrement quand on enlève la variable X.

	Z	y	EO (cos)	NS (sin)	PENTE
Z	1	-0,5080	-0,1010	-0,0580	0,3271
y	-0,5080	1	0,1754	-0,2958	-0,1890
EO (cos)	-0,1010	0,1754	1	0,0481	0,1282
NS (sin)	-0,0580	-0,2958	0,0481	1	-0,0122
PENTE	0,3271	-0,1890	0,1282	-0,0122	1

Figure 4-36: Matrice de corrélation sans la variable X

	x	y	EO (cos)	NS (sin)	PENTE
x	1	-0,2662	-0,2699	-0,2184	0,4108
y	-0,2662	1	0,1754	-0,2958	-0,1890
EO (cos)	-0,2699	0,1754	1	0,0481	0,1282
NS (sin)	-0,2184	-0,2958	0,0481	1	-0,0122
PENTE	0,4108	-0,1890	0,1282	-0,0122	1

Figure 4-37: Matrice de corrélation sans la variable Z

Etude des plans factoriels sans la variable X

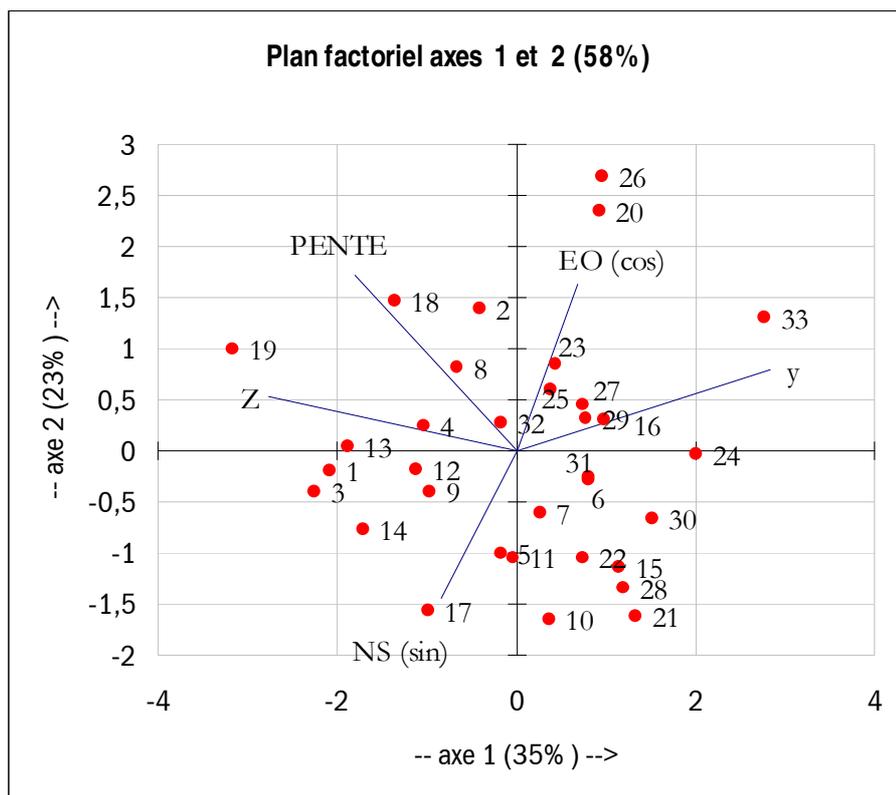


Figure 4-38: Analyse du score des individus pour le plan factoriel N°1 sans la variable X

Nous remarquons que l'axe 1 oppose maintenant l'altitude (Z) avec la latitude (Y) tandis que l'axe 2 oppose principalement les deux axes d'orientations principaux (Nord Sud

et Est Ouest). La position des individus sur ce plan factoriel a fortement évolué. Nous devons relancer l'interprétation. Nous voyons un premier groupe de stations que nous pouvons qualifier de stations alpines ; Elles partagent une altitude élevée, avec une pente forte et une orientation proche de l'axe Nord-Sud. Parmi ces stations, nous trouvons Aussois [1], Lanslebourg [19], Bessans [3], Termignon [14]. A l'opposé, apparaît un groupe de stations à l'altitude faible, orientées plutôt Est

Ouest et corrélées à la variable Y. Il s'agit de stations de piémont comme Thonon les Bains [33], Contamine sur Arve [24], Verens Arvey [16]. Nous retrouvons un groupe de stations, Ugine [15], la rochette les cités [10], Groisy [28], qui rappelle celui que nous avons détecté en première analyse et qui concerne des stations de vallées profondes ou de grands mouvements topographiques orientés dans le sens principal du massif.

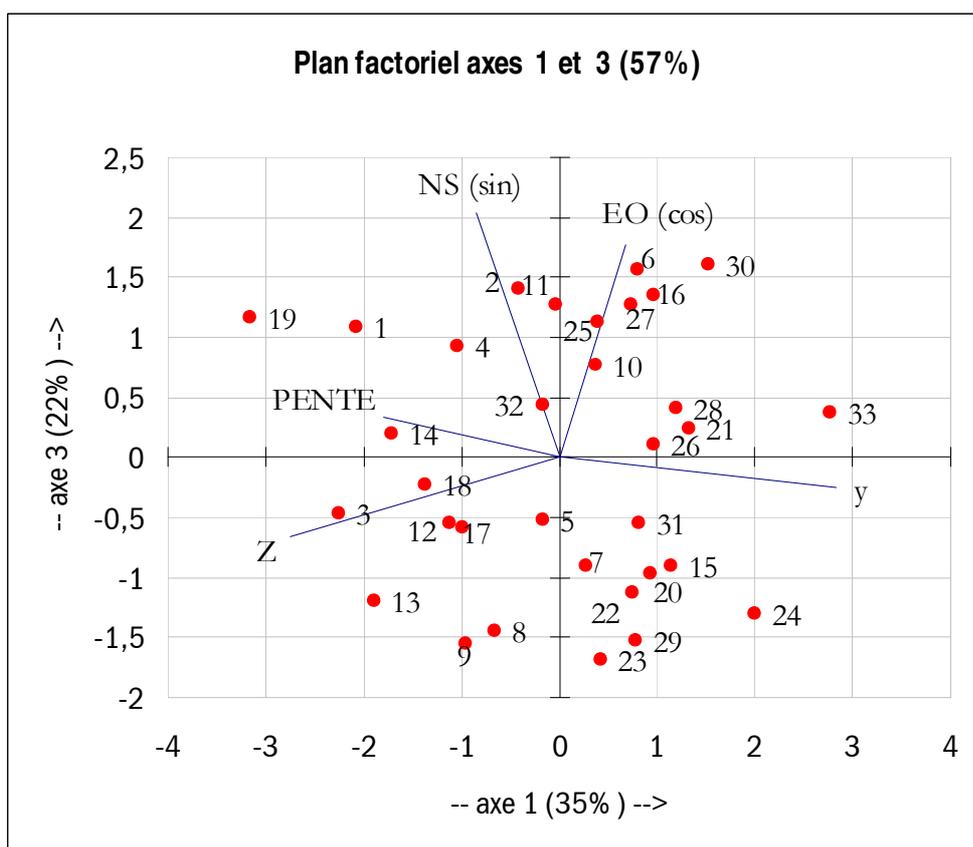


Figure 4-39: Analyse du score des individus pour le plan factoriel N°2 sans la variable X

La plan factoriel n°2 montre encore mieux la double opposition entre stations « alpines » (Z élevé, forte pente, et orientation Nord-Sud affirmée) et stations de « vallées » (pente et Z faibles, orientation indéterminée et Y moyen à faible). Cette structure semble être une ligne de force dans l'organisation de notre semis de stations météorologiques. Ce plan établit également une distinction pour les stations de moyennes montagne, entre celles qui sont plutôt corrélées à une orientation comme la Clusaz [25], Thones [32], Lescheraines [6] et celles qui sont plutôt corrélées à la variable Y comme Abondance [20] ou Samoëns [31].

L'étude des différents plans factoriels nous a permis de définir des lignes directrices pour le regroupement de nos stations météorologiques. L'implantation du semis n'est pas aléatoire car l'analyse factorielle met en évidence le grand rôle joué par le terrain, particulièrement les vallées, pour l'établissement du réseau de stations. Nous allons maintenant construire ces groupes par la méthode de classification ascendante hiérarchique.

• Classification ascendante hiérarchique

Les axes factoriels de l'analyse sans la variable X seront nos données d'entrée. Bien qu'ils soient issus d'un traitement, nous avons considéré qu'il s'agissait de données brutes. L'objectif poursuivi était de constituer des groupes les plus homogènes possibles. Ces groupes représenteront les individus sur

lesquels nous construirons nos interpolateurs linéaires de températures.

La méthode de classification que nous avons mise en œuvre est la méthode de classification de Ward fondée sur le calcul de perte d'inertie. Le regroupement se construit sur le calcul de la plus faible perte d'inertie possible. En répétant l'opération par itération, des groupes se forment jusqu'à l'obtention d'un super groupe final. En étudiant les ruptures entre chaque nœud, il devient possible de définir une partition optimale. C'est à dire la classification qui engendre la plus faible inertie. C'est l'une des principales qualités de cette méthode. Il est possible de vérifier cette partition par la suite en conduisant une analyse factorielle discriminante qui nous permettra de vérifier la qualité de cette classification.

• Résultat de la classification

La classification nous propose une première partition en quatre groupes. Cependant, nous remarquons qu'un de ces groupes ne comprend que trois stations. L'analyse factorielle discriminante que nous avons menée à la suite de cette première classification montre que la variabilité intra-classe de ce groupe est très importante. Mais la probabilité que ces stations puissent être rattachées à un autre groupe est égale à 0. Nous avons donc pensé que ces stations, bien que différentes entre elles, ont formé un groupe car elles étaient encore plus différentes des autres. On peut penser, dans ce cas, que ces stations concentrent une

grande partie du bruit de la distribution. Nous avons décidé de les sortir de notre jeu de données. La seconde classification

ascendante hiérarchique détermine une partition optimale de trois groupes dans notre nouveau jeu de données (30 stations).

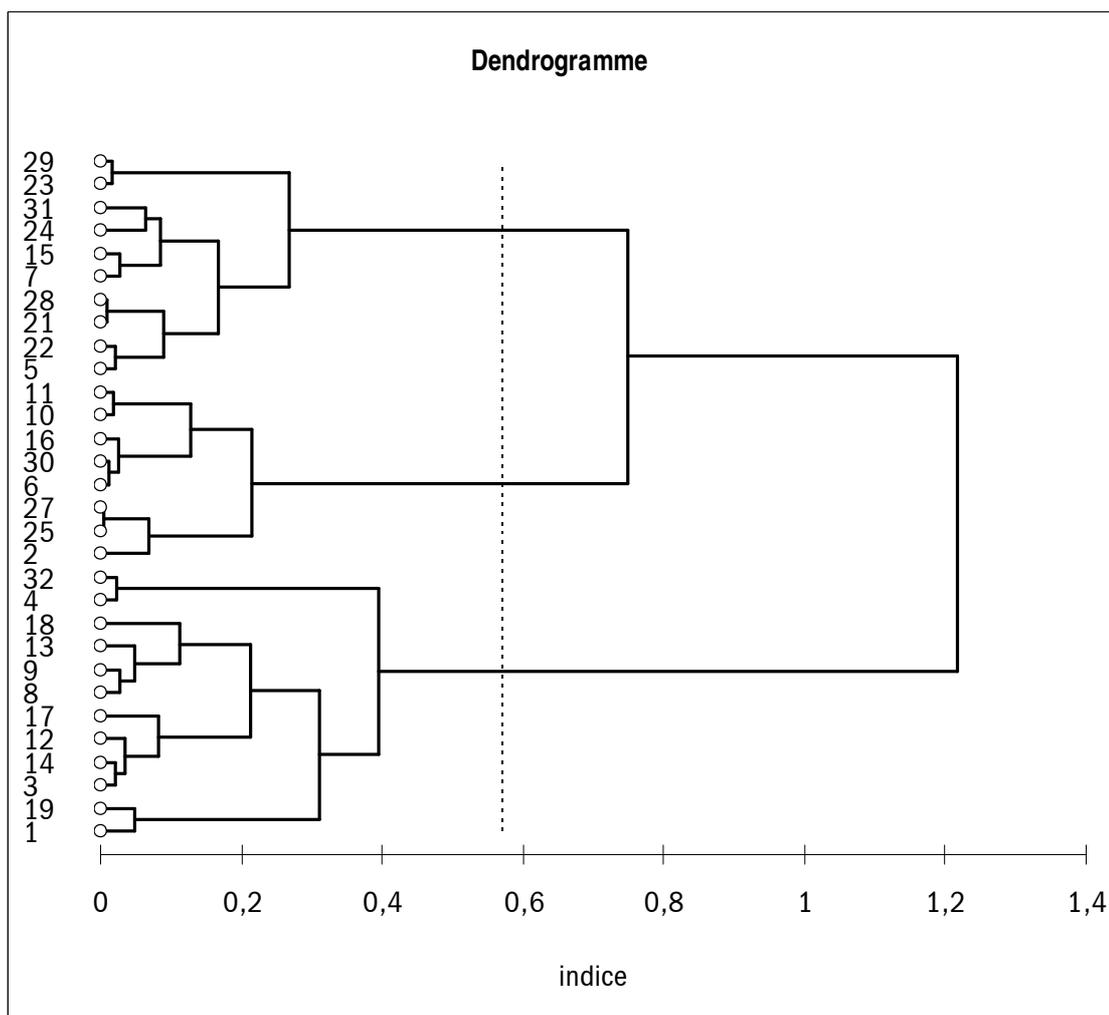


Figure 4-40: Dendrogramme de la classification sur le jeu de 30 données

Le tableau de la figure X donne le contenu des trois groupes. Nous remarquons que ceux-ci ne sont pas équilibrés. Il existe une différence de quatre stations entre le groupe 1 et le groupe 3. En revanche, nous retrouvons les structures de stations météorologiques que nous avons identifié dans l'analyse factorielle des correspondances. Le premier groupe

correspond aux stations « alpines ». Le second considère plutôt les stations de vallées profondes internes au massif et les stations de moyenne montagne qui s'orientent dans l'axe principal Nord- Sud du massif. Le dernier groupe correspond principalement aux stations de moyennes montagnes orientées Est-Ouest et aux stations de piémont.

GROUPE 1	GROUPE 2	GROUPE 3
Aussois	Hauteluce Belleville	Beaufort Arèches
Bessans	Moutiers centre ville	Lescheraines
Bour S.Maurice MN	Ugine La Savoisienne	La Rochette Les Cités
PeiseyNancroix	Annecy DDE	St.Alban des Hurtières
Pralon Les Darbelays	Chamonix Le Bouchet	Verens Arvey
Ste Foy le Miroir haut du villae	Chamonix le Tour	La Clusaz Les Verriers
St.Michel de Maurienne le Thyl	Contamine sur Arve	Combloux Le Perret
Termignon	Groisy	Rumilly
avrieux	Mégève Maison Forestière	
Valloire barrage du Ley	Samoens (La Jaysinia ?)	
Lanslebour Mont Cenis		
Thones		

Figure 4-41: Détermination des groupes de stations météorologique

- **Mesure de la qualité de la classification et validation croisée.**

Afin de confirmer la classification, nous avons mené une analyse factorielle discriminante sur notre jeu de données. Pour cela, nous avons rajouté une colonne qualitative à nos variables

de départ. Cette colonne contenait le numéro du groupe donné par la classification. L'objectif de ce travail est de corroborer le caractère discriminant des groupes établis par la classification. Le tableau ci-dessous valide la classification établie par analyse ascendante hiérarchique.

	de 1 vers :	de 2 vers :	de 3 vers :	Somme
1	13	0	0	13
	0,43	0,00	0,00	0,43
2	0	9	0	9
	0,00	0,30	0,00	0,30
3	0	0	8	8
	0,00	0,00	0,27	0,27
Somme	13	9	8	30
	0,43	0,30	0,27	1
Taux d'erreur de classification : 0.0000				

Figure 4-42: Synthèse de la reclassification proposée par analyse factorielle discriminante

Les individus sont regroupés avec une forte probabilité dans leur groupe initial. Le taux d'erreur de classification est de 0. L'analyse discriminante ne propose pas d'autres possibilités de classement. Nous pouvons donc considérer que les groupes constitués

sont pertinents d'un point de vue statistique. Cependant, la dispersion (Figure 4-43) des groupes montre une assez forte variabilité intra groupe particulièrement pour le groupe 1. Cela nous engage à aborder l'interpolation avec la plus grande vigilance.

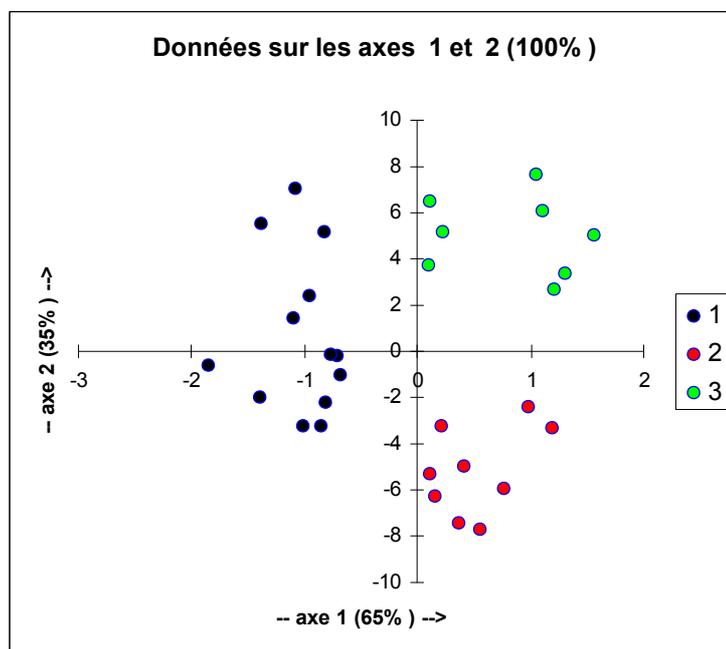


Figure 4-43: Dispersion des individus par groupe sur le plan factoriel

• **Interpolation par régression multiple :**

Le second volet de ce travail a consisté à construire des modèles linéaires de régression multiple pour chaque mois et pour chaque groupe. En procédant de la sorte, nous avons obtenu des interpolateurs spécifiques aux groupes de stations, pour chaque mois de l'année, en fonction des températures moyennes observées sur les 30 années de notre jeu de données.

Le coefficient de détermination calculé pour toutes les régressions (Figure 4-44) montre que les modèles de régression multiples pour déterminer la température mesurée aux

stations pour chaque groupe sont assez inégaux. Tous les groupes ne sont pas réguliers dans leur ensemble, c'est particulièrement le cas pour le groupe N°1 qui ne parvient à atteindre que 41% de coefficient de détermination. En revanche, les deux autres groupes sont assez corrects et similaires car ils proposent 70% de coefficient de détermination pour expliquer les températures moyennes mensuelles relevées aux stations qui les composent. Sur le plan mensuel, nous assistons à une assez grande dispersion de ce coefficient si nous considérons les groupes simultanément. Nous mesurons ici toute la portée de la faible différence de variabilité inter et intra-groupe que nous avons décelé lors de l'analyse factorielle discriminante.

	GROUPE1	GROUPE2	GROUPE3	Moyenne
JANVIER	0,23	0,38	0,68	0,43
FÉVRIER	0,26	0,52	0,76	0,51
MARS	0,39	0,66	0,7	0,58
AVRIL	0,56	0,9	0,76	0,74
MAI	0,57	0,86	0,63	0,69
JUIN	0,47	0,73	0,83	0,68
JUILLET	0,41	0,82	0,8	0,68
AOÛT	0,42	0,7	0,8	0,64
SEPTEMBRE	0,44	0,76	0,78	0,66
OCTOBRE	0,46	0,9	0,65	0,67
NOVEMBRE	0,44	0,83	0,64	0,64
DÉCEMBRE	0,27	0,64	0,58	0,50
Moyenne	0,41	0,725	0,7175	

Figure 4-44: Tableau des coefficients de détermination par groupe et par mois

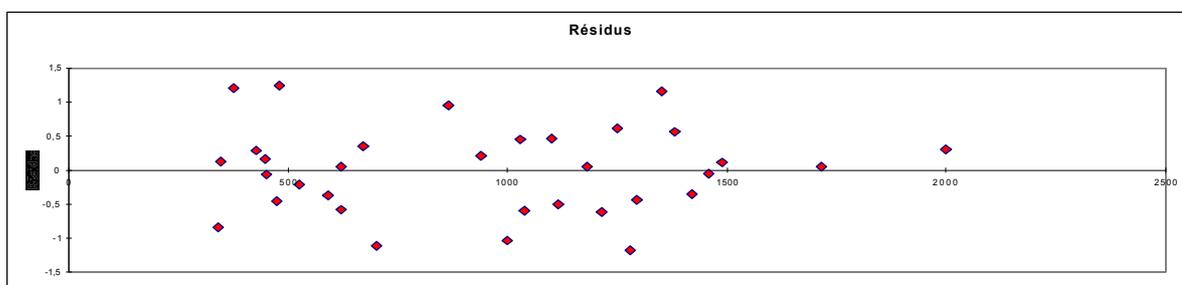
• **Interpolation et création d'une carte de températures par régression multiple**

L'exemple concerne la création de la carte des températures moyennes du mois d'avril qui est le mois le mieux représenté par nos coefficients de détermination. L'interpolation par régression multiple a été effectuée sur trois variables : l'altitude, l'orientation en degrés et la pente en degrés.

Le coefficient de détermination donne une valeur de 64.04%. La puissance d'explication du modèle est relativement correcte d'autant que le coefficient de corrélation est égal à 80%. F calculé vaut 17, ce qui avec 3 et 29 degrés de liberté est suffisant. Pour un risque d'erreur α de 5% F lu dans la table vaut 2.54, notre modèle est significatif.

	Degrés de lib.	Somme des carrés	Carrés moyens	F de Fisher	Pr > F
Modèle	3	23,5291	7,8430	17,2176	0,0001
Résidus	29	13,2102	0,4555		
Total	32	36,7393			

Les résidus sont distribués correctement autour de la valeur zéro. Les conditions de normalité et d'homoscédasticité sont respectées.



Nous pouvons créer la carte sur la base de l'équation suivante :

$$Y=2.60655568720547-0.00194896987991762*[MNT]+0.00108714856779911*[ORIENTATION]+0.00352663416391855*[PENTE]$$

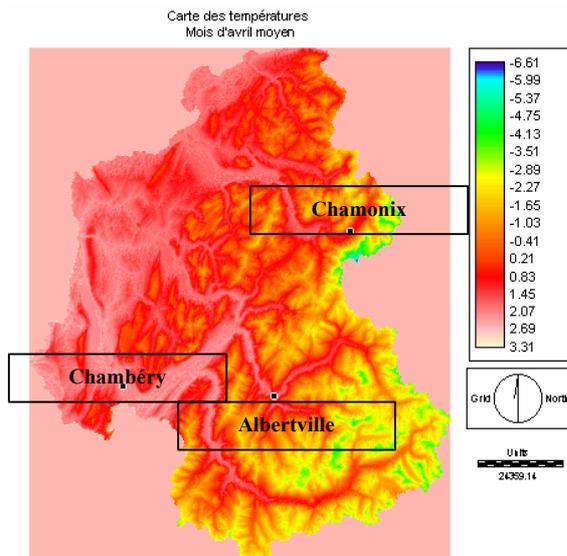


Figure 4-45: Carte des températures interpolées par régressions multiples

D'un point de vue statistique, notre modèle est satisfaisant. Nous pouvons considérer que cette carte représente le phénomène des températures du mois d'avril du point de vue de la régularité dans l'espace. L'usage de la régression multiple et des groupes pour déterminer cette carte optimise « localement » cette régularité. Par opposition, cette carte est

entachée d'erreurs locales dont nous ne pouvons connaître, ni la portée, ni la spatialisation, ni le sens, ailleurs qu'aux stations de mesures. Ce constat est particulièrement lié au fait que cet interpolateur n'est pas exact. Il est donc difficile d'estimer un comportement global des erreurs. Cela condamne, à notre sens, l'approche par régressions multiples dans un contexte opérationnel. Il existe deux raisons à cela. Nous devons éviter autant que possible, les ambiguïtés dans la spatialisation des

phénomènes du climat. Les résultats de la cartographie des phénomènes climatiques doivent obligatoirement faire l'objet du plus grand soin dans la détermination et l'examen des erreurs car celles-ci doivent être intégrées dans la concertation. Celles-ci seront, bien entendu, les plus faibles possibles mais nous devons également être capables de les situer dans notre champ d'étude. Ce dernier point est primordial pour la mise en œuvre de la concertation. Comment construire un paysage significatif sur lequel il devient possible de prendre une décision si les cartes charnières apportent des informations approximatives? Enfin, l'échelle que nous avons choisi pour l'expérimentation justifie une perception plus locale des phénomènes continus dans l'espace comme les précipitations et les températures car les enjeux des acteurs du territoire se situent à ce niveau.

La voie de production de modèles d'interpolation à partir des données semble rapide, simple et fiable. Pourtant, les résultats sont variables balayant un intervalle qui va de correct à très mauvais. Fabriquer des modèles d'interpolation des températures fondés sur la seule loi du gradient thermique ne semble pas permettre de localiser la manière dont se déploie le phénomène dans l'espace au niveau local de façon efficace pour toutes les saisons et tous les secteurs du terrain d'étude. Il est à souhaiter que, pour que cette approche soit efficace, des progrès massifs devront être accomplis sur la compréhension des lois climatiques des micro et topo-climats. L'état de l'art en la matière ne semble pas offrir d'axes prometteurs sur ce plan. Beniston

[BENISTON et al, 1994] a déjà montré que l'usage des modèles climatiques généraux pour une évaluation locale des conséquences du changement climatique était un problème très ardu et non linéaire précisément à cause du changement d'échelle qui s'opère ici (du global au méso et du méso au topo).

En conséquence, adopter une démarche géostatistique dans le cas de données échantillonnées de climat semble préférable pour définir des interpolations destinées à la constitution d'une bibliothèque SIG en vue de d'objectifs de concertation.

4.4 Une approche d'enrichissement d'informations : créer des stations virtuelles pour optimiser l'interpolation

La construction des cartes de températures n'est pas simple à traiter. Nous nous heurtons à un problème de définition de la façon dont le phénomène se déploie dans l'espace. D'un côté, nous avons une loi parfaitement connue sur laquelle beaucoup de travaux ont été produits [OZENDA 1986]. Cependant la loi adiabatique des gradients thermiques ne peut correctement s'appliquer que dans le cas de mesures annuelles. Les tentatives que nous avons faites pour contrôler la différence induite par l'amplitude thermique au niveau mensuel n'ont pas donné de résultats performants sur l'ensemble des saisons d'une année. L'approche d'interpolation par la donnée et l'étude strictement statistique n'est

finalement pas particulièrement pertinente sur nos échelles de temps.

D'un autre côté, l'approche géostatistique classique ne peut se concevoir que dans son assertion la plus faible. Le jeu de données que nous avons est assez petit et inégalement réparti dans l'espace. Cela rend extrêmement complexe la détermination d'un variogramme et, par ricochet, la détermination d'un modèle mathématique de modélisation du phénomène dans l'espace. Comment parvenir dans ces conditions à une carte de températures plus efficace ?

Nous avons tenté de raisonner sur ces deux axes pour élaborer une méthode capable de réduire suffisamment ces points d'achoppements afin de construire nos cartes. Il s'agit donc, pour nous, d'enrichir le jeu de données destiné à la détermination d'un modèle mathématique d'interpolation des températures plus performant que ceux que nous avons vu plus haut.

4.4.1 Intérêt du rajout de stations virtuelles dans un contexte d'interpolation : un moyen de réduction de l'erreur d'estimation

Notre principale difficulté concerne l'erreur relative à l'interpolation. Celle-ci est directement liée au nombre de points que nous avons sur notre champ. Plus celui-ci est couvert, moins l'erreur sera importante puisque les « trous » sans informations sont de plus en plus mités. La surface à interpoler se réduit donc, ainsi que la distance entre chaque station. Ces propriétés géométriques sont

deux facteurs importants d'influence sur l'erreur relative à l'interpolation. Dans l'absolu, si notre espace est entièrement couvert de stations alors l'erreur d'interpolation sera égale à zéro. Cette constatation explique que les courbes de qualité du tableau de Creutin (FigX) se regroupent toutes en haut à droite quand le nombre de stations devient maximal. Dans le modèle que nous avons développé pour déterminer une température X en un point quelconque du plan, notre objectif était clairement de réduire au minimum la distance entre chaque station. De cette façon, nous réduisons « mécaniquement » les erreurs d'estimation. On peut espérer alors atteindre des variogrammes plus stables vers les origines et améliorer le krigeage ou réduire la courbure de l'arc d'interpolation de la plaque si l'on se place dans une stratégie par splines de type plaque mince, voire parvenir à une interpolation acceptable à partir de méthodes purement géométriques.

- **La valeur mesurée est « locale »**

La surface à interpoler possède des caractéristiques spatiales particulières, relatives au phénomène mesuré ponctuellement dans l'espace. C'est à dire que des stations « puissantes » exerceront une influence sur une grande surface et des stations « faibles » n'auront qu'une influence spatiale limitée. Cette caractéristique sera intégrée dans notre modèle par le calcul d'un paramètre local (attaché à une station en particulier) déterminé par le profil que cette station offre en regard de toutes les autres. La

mesure que nous prédisons alors au point P est donc une mesure « locale » au sens mathématique.

4.4.1.1 Elaboration d'une méthode spécifique aux températures

Nous sommes en possession d'une série de points de mesures de températures dans un espace (x; y). Nous voulons « deviner » la température en un point (que nous nommerons P) inconnu du plan. Si l'on forme l'hypothèse que la température est un phénomène qui se retrouve dans des conditions identiques spatiale et climatique, on peut donc avancer que la valeur de la température en ce point P inconnu, est une moyenne des températures connues pondérées par des W_i . Ces derniers sont des fonctions des phénomènes physiques du plan qui interfèrent sur la température probable du point P, par exemple la distance en P et les autres points du plan.

L'équation de cette approche peut s'écrire : $T(X_p) = T(X_i)$ où X_i = Le point A ou B ou...N et X_p le point inconnu, T étant bien entendu la T° .

La forme développée donne :

$$T(X_p) = w_a T(X_a) + w_b T(X_b) + \dots + w_n T(X_n)$$

avec $\sum_I w_i = 1$

- **Définition de w_i**

Nous remarquons que le nœud du problème se résume à établir correctement le coefficient w_i pour que celui-ci fasse intervenir de façon « intelligente » la manière dont la valeur en un point influencera celle du point P plus que celle d'un autre point. Comment calculer w_i ?

Dans le cas qui nous intéresse, nous voudrions faire intervenir dans le calcul d'un w_i :

L'altitude (alt)

L'orientation/exposition (orient)

La distance avec le point de comparaison (X_i)

$X = A$ ou B ou N

$$[\text{dist}(A,P)] = \sqrt{(X_p - X_a)^2 + (Y_p - Y_a)^2}$$

Nous sommes déjà en possession d'un certain nombre d'informations concernant les points connus et inconnus de notre champ.

Pour les points connus, nous connaissons :

La température (contenue dans la base ER30)

L'orientation (dérivée de l'analyse du MNT par SIG RASTER)

L'altitude (Donnée par le MNT)

La distance inter-points (dérivée par l'analyse de la position des stations en SIG RASTER)

Pour les points inconnus, nous cherchons la T° mais nous pouvons connaître les trois autres paramètres grâce au SIG une fois que nous les avons placés sur notre espace.

Remarque : L'orientation est un angle compris entre 0° et 360° ou $[-180 ; 180]$
L'altitude est obligatoirement comprise dans l'intervalle $[\text{alt min} ; \text{alt max}]$ du champ

Dans le calcul des poids des w_i , nous voulons faire intervenir les paramètres tels que l'altitude du point P inconnu soit un rapport à l'altitude du point connu (des points de même altitude ont des chances d'avoir une température proche en soi). Nous agissons de même dans le cadre de la similarité d'orientation et la distance entre les points.

Comme nous avons $\sum w_i = 1$ nous pouvons fonctionner dans un intervalle compris entre 0 et 1 pour modéliser linéairement les actions des facteurs de w_i . Cette remarque nous aidera fortement pour la modélisation des phénomènes d'influence sur la température.

- **Modélisation linéaire des facteurs : Altitude, Orientation/Exposition et Distance**

L'altitude intervient de façon linéaire dans la détermination de la température. On peut raisonnablement penser que des points proches en altitude ont une température sensiblement équivalente en soi. Donc :

Si $A(X_p) - A(X_i) = 1$ alors la ressemblance est maximum

Si $A(X_p) - A(X_i) = 0$ alors la ressemblance est minimum

On peut donc modéliser l'action de l'altitude sur la base d'une fonction de droite de type $Y = aX + b$ où la valeur lue sur l'axe des Y au point X connu correspondra à la contribution du point réel sur le point P inconnu. La pente de la droite est donnée par deux points de coordonnées (0 ; 1) et (alti max - alti min ; 0).

Dans le cas de l'orientation, la modélisation comprend une étape de plus mais elle s'appuie également sur une équation de droite. Nous devons faire tenir toutes les valeurs d'orientation brutes en degrés dans un intervalle compris entre $[-180 > 0 < 180]$. L'équation de droite prendra donc invariablement la forme donnée par le couple de points (0 ; 1) et $(\frac{-1}{180} ; 0)$.

De la même façon que pour l'altitude, la valeur donnée sur l'axe des Y au point connu, indiquera la contribution du point connu pour la détermination de la valeur cherchée au point P.

Pour que la distance intervienne dans notre système, on utilise encore une fois la même démarche que celle qui a été décrite pour l'altitude. Cette fonction se développe dans l'intervalle $0 < \text{Dist}(X_p, X_i) < \text{Dist max}$ du champ.

La distance maximum varie en fonction de X_p mais nous pouvons la rendre indépendante de X_p en fixant une distance maximum en fonction de la distance maximum que nous jugerons pertinente.

Les fonctions pour la prise en compte de la distance peuvent être de toute nature. Dans l'exemple ci-dessous, nous montrons les effets de prise en compte des stations météo dans le cas d'une équation de droite. Comme on peut s'y attendre, il n'y a pas d'effet de prise en compte particulier d'espace proche ou lointain. Il en irait tout autrement dans le cas d'une fonction logarithmique (cette fonction favoriserait les espaces proches) ou exponentielle (ce serait alors les espaces lointains qui seraient favorisés.)

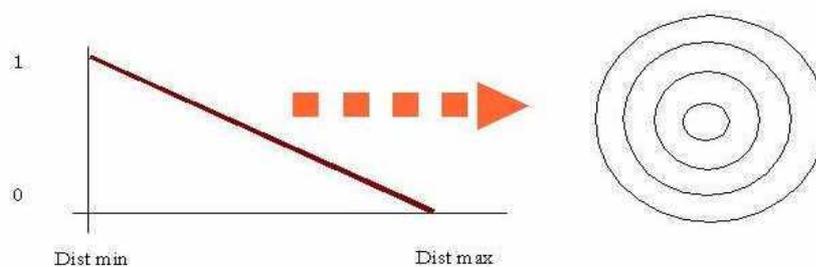


Figure 4-46: Exemple de prise en compte de la distance à l'aide d'une équation de droite

Nous pouvons, à ce moment, réintégrer les fonctions de modélisation dans chaque partie de w_i .

Notons que la liste des paramètres de w_i n'est pas finie. On peut rajouter les facteurs que l'on juge pertinents dans la mesure où l'on peut les modéliser d'un point de vue mathématique.

Un exemple avec la détermination d'un seul w (nommé w_a)

$$w_a = \frac{Alt_i * (\%a) + D * (\%d) + \alpha * (\%\alpha)}{3}$$

Avec $\%a + \%d + \%\alpha = 1$

Les % sont destinés à définir le poids de chaque facteur dans la détermination de la valeur que l'on cherche au point P. Bien entendu, il faut que la somme des pondérations [] soit égale à 1. Il faut aussi que la somme des w_i soit égale à 1 donc :

$$w_a + w_b + \dots + w_n = 1$$

$$w_a = 1 - w_b - \dots - w_n$$

$$w_b + w_c + \dots + w_z = 1 - w_a$$

Pour respecter la somme des $w_i = 1$ on écrit:

$$w_a = \frac{1}{\text{Nombrepts considérés}} \left[\%*alt + \%*orient + \frac{1}{\text{Dist}()} * \% \right]$$

Quand on a déterminé la structure mathématique des W_i , on peut réintégrer les $w_a, w_b \dots w_n$ dans la fonction **1**.

On obtient alors un système d'équations :

$$F(X_a) = T^\circ \text{ en } A$$

$$F(X_b) = T^\circ \text{ en } B$$

$$F(X_n) = T^\circ \text{ en } N$$

On peut donc calculer $T(X_p)$ température en P.

4.4.1.2 Détermination et choix judicieux de P

Maintenant, nous avons la possibilité de construire un nouveau point sur notre plan et d'en déterminer la T° en fonction de la réalisation que nous avons déjà. Nous abordons alors un autre problème qui est de choisir P de la façon la plus judicieuse qui soit pour notre objectif d'interpolation. En effet, comme nous manquons de données pour parvenir à un modèle spatial d'interpolation, la création de stations de mesures virtuelles nous permettra de franchir cet écueil.

Deux voies s'offrent à nous pour effectuer le choix de positionnement de P.

- **Solution systématique**

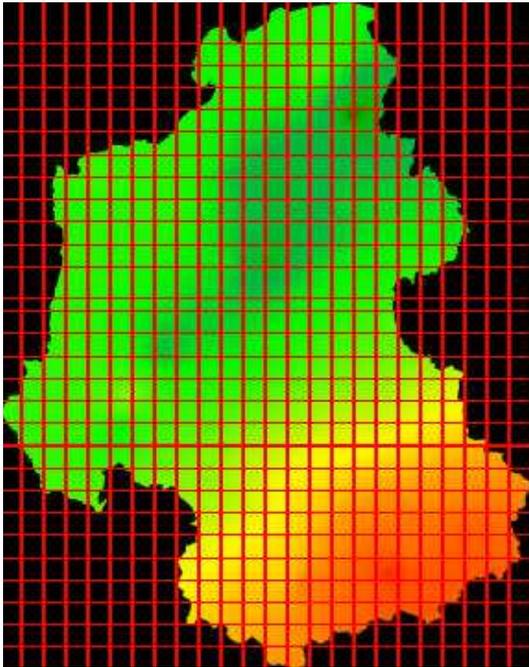


Figure 4-47: Exemple de carte de position des stations virtuelles par méthode systématique

Après avoir créé une grille régulière, nous pouvons définir un point P à toutes les intersections du maillage. Cette solution présente l'avantage de permettre une interpolation plus facile par la suite. On peut

utiliser l'arsenal des méthodes géométriques comme les surfaces de tendances (trend) ou même une simple interpolation de type moyenne pondérée par les distances aux plus proches voisins. En revanche, le coût en calculs peut s'avérer rebutant. Il faut calculer la valeur w_p et résoudre le système pour chaque point. Bien que valable sur un plan formel, une autre stratégie moins gourmande en calculs est possible. Nous verrons qu'elle apporte de surcroît des moyens d'évaluation pour la détermination du bon nombre de points

- **Solution spatiale itérative**

Plutôt que de couvrir le plan à interpoler de façon systématique, nous pouvons chercher la température en des points spatialement intéressants, par exemple, chercher le point le plus éloigné de tous les points connus et ainsi de suite.

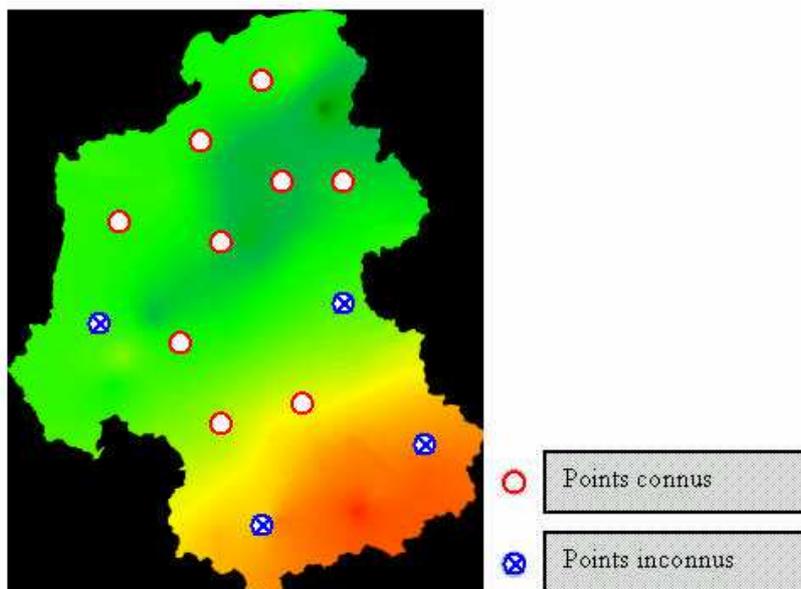


Figure 4-48: Exemple de carte de positionnement de stations virtuelles par approche itérative

On choisit N points successivement jusqu'à ce que la couverture du plan soit optimale pour que l'interpolation donne une carte correcte. Le bon nombre de points est atteint quand la variation entre deux interpolations (P et P+1) est négligeable.

Cette méthode itérative permet d'optimiser le temps de calcul et laisse le praticien seul juge de la qualité de l'interpolation. Nous pouvons aussi introduire un paramètre de forçage au niveau de l'interpolation afin d'accorder plus de poids aux véritables stations de mesures météorologiques. Nous pouvons aussi retrouver par la suite une démarche géostatistique classique et utiliser des méthodes de krigeage habituelles.

Exemple de mise en œuvre dans l'absolu

Supposons un plan sur lequel nous avons 3 points connus (A ;B ;C) et un point P inconnu.

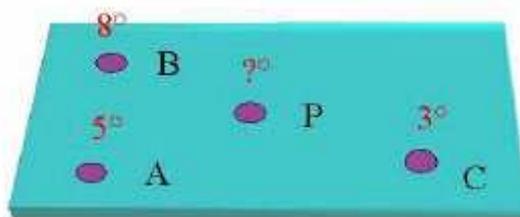


Figure 4-49: Plan d'étude

Nous pouvons récupérer les informations suivantes dans une table d'une base de données quelconques. Nous imaginons que les données : Coordonnées, Orientations et Altitudes ont été fournies par un logiciel de SIG en mode raster (puisque l'espace traité doit être modélisé dans une base SIG).

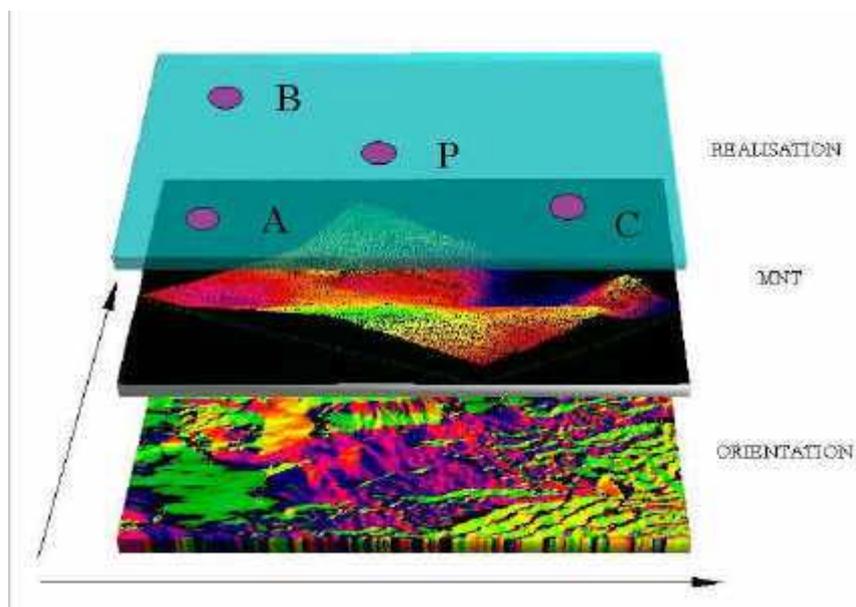


Figure 4-50: Exemple de base de données SIG

Points	Coordonnées	Altitude	Orientation	T°
A	(0;0)	10	45	5
B	(4;0)	25	210	8
C	(0;4)	14	90	3
P	(2;2)	16	50	?

L'altitude minimale de notre plan = 0

L'altitude maximale de notre plan = 30

4.4.1.3 Calcul des distances des points connus au point P

Cherchons les distances de chaque point au point P. Nous avons donc 3 couples à chercher :

$$d(A,P) = \sqrt{(X_p - X_a)^2 + (Y_p - Y_a)^2} = \sqrt{(2-0)^2 + (2-0)^2} = \sqrt{8} = \boxed{2\sqrt{2}}$$

$$d(B,P) = \boxed{2}$$

$$d(C,P) = \boxed{2}$$

4.4.1.4 Calcul des pondérateurs altitudes

Nous avons dit plus haut que l'altitude intervenait de façon linéaire dans notre plan. Nous avons décidé que cette action pouvait être exprimée quantitativement dans un intervalle compris entre 0 et 1. Il s'agit donc d'une droite qui passe par les points de coordonnées (0 ; 1) et (30 ; 0)

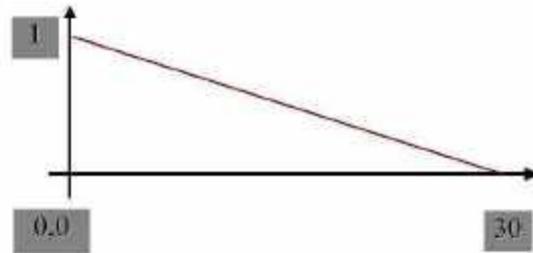


Figure 4-51: Allure de la fonction utilisée

Déterminons la fonction de droite qui définit l'action de l'altitude :

$$Y = aX + b$$

$$1 = 0X + b = b$$

$$0 = a30 + b$$

$$\begin{cases} b = 1 \\ 30a = -1 = -\frac{1}{30} \end{cases}$$

$$Y = -\frac{1}{30}x + 1$$

Nous pouvons maintenant calculer la relation d'altitude pour chaque couple de point

- Différence altitude (P ; A) = $|16 - 10| = 6$

$$Y_{PA} = -\frac{1}{30} * 6 + 1 = -\frac{1}{5} + 1 = -\frac{1}{5} + \frac{5}{5} = \frac{4}{5}$$

- Différence altitude (P ; B) = 9

$$Y_{PB} = \frac{7}{10}$$

- Différence altitude (P ;C) =2

$$Y_{PC} = \frac{14}{15}$$

4.4.1.5 Calcul des pondérateurs orientation

De la même façon que pour l'altitude, nous avons considéré que l'action de l'orientation pouvait être modélisée par une droite dans le contexte défini plus haut. Cette droite passe par les points de coordonnées (0 ;1) et (180 ;0).

L'équation de la droite est :

$$Y = \frac{-1}{180}X + 1$$

- Différence orientation (P ;A) =
|50-45| = 5

$$Y = \frac{-1}{180} * 5 + 1 = \frac{175}{180}$$

- Différence orientation (P ;B) = 160

$$Y = \frac{1}{9}$$

- Différence orientation (P ;C) = 40

$$Y = \frac{7}{9}$$

4.4.1.6 Calcul des pondérateurs distances

Encore une fois, nous considérons que la distance inter-points intervient de façon linéaire dans la détermination de la T° au point P. La distance maximale est la plus grande distance possible entre le point P et tous les autres points. Ici, ce sera $2\sqrt{2}$ qui est la distance maximale possible telle que nous l'avons calculée en premier. La distance minimale est égale à 0.

Nous avons nos deux points de coordonnées (0 ;0) et ($2\sqrt{2}$;0). Nous pouvons donc déterminer l'équation de la droite.

$$Y = \frac{-1}{2\sqrt{2}}X + 1$$

- Différence distance (P ;A)

$$Y = \frac{-1}{2\sqrt{2}} * 2\sqrt{2} + 1 = 0$$

DIFFERENCE DISTANCE (P ;B)

$$Y = \frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}}$$

DIFFERENCE DISTANCE (P ;C)

$$Y = \frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}}$$

Maintenant, nous avons toutes les informations nécessaires pour établir nos *W*. Nous pouvons choisir la manière dont nous souhaitons les faire intervenir dans la détermination de la T° en P.

Dans ce cas, nous **choisissons** de faire intervenir l'altitude pour 30%, l'orientation pour 30% et la distance pour 40%. Mais nous aurions pu choisir une tout autre pondération, 50%, 25% et 25% par exemple. Cela reste le choix du praticien. Il lui appartient donc de le justifier. Une solution de calibration possible serait d'utiliser des stations réelles comme des stations virtuelles. Il suffit de retrouver la température donnée par la mesure en testant des configurations possibles de pondération. En reproduisant l'opération sur des stations

caractéristiques (fond de vallée, plateau, sommet...), nous pourrions choisir les facteurs pondérateurs en fonction de la ressemblance spatiale des stations virtuelles par rapport aux véritables stations météorologiques.

4.4.1.7 Détermination des W_i

Nous devons calculer des pondérateurs intermédiaires en tenant compte de nos choix dans le poids des facteurs donnés comme explicatifs de la température. Nous écrivons :

$$W_a' = \frac{(4*0.3) + (\frac{175}{180}*0.3) + (0*0.4)}{3} = 0.17$$

$$W_b' = \frac{(\frac{7}{10}*0.3) + (\frac{1}{9}*0.3) + (\frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}}*0.4)}{3} = 0.12$$

$$W_c' = \frac{(\frac{14}{15}*0.3) + (\frac{7}{9}*0.3) + (\frac{\sqrt{2}-1}{\sqrt{2}}*0.4)}{3} = 0.21$$

Nous avons dit que $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ donc : $X(W_a' + W_b' + W_c') = 1 \Rightarrow \frac{1}{(W_a' + W_b' + W_c')}$

De cette façon nous sommes certains d'obtenir un nombre W sans dimension et le résultat final de notre équation indiquera directement la T° au point P.

Cela nous donne : $X=2$

$$W_a = 2W_a' = 0.34$$

$$W_b = 2W_b' = 0.24$$

$$W_c = 2W_c' = 0.42$$

Nous pouvons écrire l'équation finale :

$$T^{\circ}p = (0.34*5) + (0.24*8) + (0.42*3) = 4.88$$

Le point P à la Température de 4.88° par rapport à la réalisation donnée au départ dans le tableau. Nous sommes donc bien en mesure de prévoir une température en un point donné en fonction de la réalisation mesurée sur ce champ à un instant T.

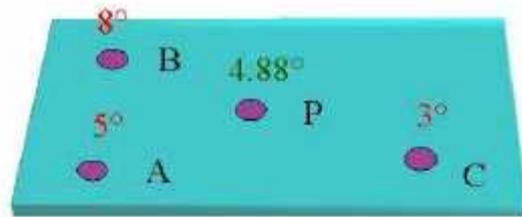


Figure 4-52: Résultat et valeur donnée par le modèle

Cette partie s'est attachée à présenter les concepts et les outils mis en œuvre dans notre travail. Nous soutenons que l'approche heuristique représente un moyen de traiter efficacement des problèmes d'aménagement dans un contexte conflictuel et contradictoire. Cette approche repose sur la valorisation de la donnée discrète et continue à partir de la perception que les acteurs en ont. Il devient alors possible de converger vers une solution de compromis par reconstruction d'un paysage commun, dans un environnement de simulation, qui serait celui de la concertation.

Ce paysage est fabriqué par les acteurs du territoire qui utilisent pour cela des objets élémentaires de la base de donnée vectorielle. Chacune de leur action d'analyse produit un événement visuel dans un moteur de réalité virtuelle. Ce dernier outil sert de générateur de fait de conscience. Il rend donc pratique l'objectif heuristique par stimulation visuelle. Le potentiel d'expérimentation est lié aux possibilités d'agencement des objets présents dans la base. Il est donc combinatoire et fini. Chacun des acteurs peut, pour agir sur le paysage en construction, puiser dans une bibliothèque d'objets élémentaires en mode objet. Trois possibilités d'action sur la base de données leur sont proposées :

- la création d'objet (dessiner une nouvelle piste de ski)
- la destruction d'objet (supprimer un bâti)
- exercer une requête topologique sur des polygones (sélectionner tous les arbres à l'intérieur du projet de piste pour les « couper » virtuellement dans l'environnement de réalité virtuelle)

Nous pensons que l'expérimentation en simulation permet d'obtenir un compromis plus facilement que par les méthodes habituelles (analyse spatiale, aide multicritère à la décision) car les acteurs du territoire restent maîtres de la situation de simulation à tout moment. De surcroît, le caractère hautement pédagogique de la réalité virtuelle oblige véritablement ceux dont les usages du territoire sont différents à comprendre les enjeux spatiaux de leurs contradicteurs. Une solution de compromis peut donc émerger plus facilement.

Bien entendu, la valeur du résultat est conditionnée par la qualité et la définition des données de départ. Cela pose le problème de l'intentionnalité. De quelles données doit-on doter le système pour qu'une solution de compromis apparaisse ? Nous avons cherché à éclaircir ce point par un positionnement philosophique sur la conscience du fait spatial.

Nous avons également établi une distinction pour le rôle joué par la donnée dans l'environnement. La donnée discrète contrôle l'aspect heuristique de notre environnement tandis que la donnée continue joue un rôle stratégique dans la représentation finale de la solution envisagée. Pour cette dernière catégorie de données, nous avons montré que la confiance accordée par les acteurs du territoire à l'environnement était directement dérivée des méthodes d'interpolation mises en œuvre pour la création des bibliothèques de phénomènes continus. Cette question de la qualité de la représentation se révèle

particulièrement aiguë dans le cas des phénomènes climatiques.

La dernière partie que nous allons aborder maintenant présente une mise en œuvre réelle de tous ces concepts au sein d'un prototype d'environnement d'aide à la concertation que nous avons baptisé SIMUL-IMAGE.

Nous verrons que, pour une mise en œuvre pleinement opérationnelle sur notre champ d'étude, certains aménagements des méthodes développées ci-dessus doivent être envisagés. Ces aménagements concernent principalement la mise en action de notre modèle de rajout de stations météorologiques virtuelles.

5 Exemple de mise en œuvre : la Savoie et la Haute Savoie.

Nous avons vu, plus haut, tout l'enjeu économique et écologique que les questions relatives au changement climatique soulèvent en montagne. La Savoie et la Haute Savoie sont les deux départements de France où l'économie liée au ski est la plus développée. L'ampleur des massifs et leur position dans la chaîne alpine leur permettent également de proposer une richesse floristique et faunistique très importante. Cette somme de facteurs favorables nous a paru opportune pour tenter la mise en œuvre de l'environnement d'aide à la concertation Simul-Image, dont nous avons décrit les rouages en seconde partie, sur ce terrain. Il est probable que, sur un tel terrain, nous parviendrons aisément à mettre en évidence des zones de conflits d'intérêts. L'outil sera configuré, ici, pour autoriser une simulation localisée des effets du changement climatique en vue d'identifier les espaces de conflits entre l'économie du ski et la préservation de la biodiversité. Ceux-ci seront définis par l'intersection d'une double probabilité : celle de la persistance de la couverture neigeuse tout au long de la saison de ski (conjugée à la présence d'un domaine skiable) et celle du potentiel de repli de niches écologiques.

Nous tenons à indiquer, d'emblée, que les résultats cartographiques proposés par notre simulation demandent à être affinés dès qu'on les considère avec l'œil du spécialiste (ce qui correspond à une échelle fine du territoire). Par exemple, dans le cas de l'établissement des zones de probabilités écologiques, nous devrions tenir compte de facteurs de pente, d'exposition et de sol qui réduisent encore le potentiel que nous proposons. Notre travail n'est pas purement écologique ou purement économique mais consiste à montrer l'étendue et les limites d'une méthode globale pour prendre conscience de la portée spatiale d'un phénomène sur un territoire (ici le changement climatique sur un territoire montagnard). Le niveau de qualité de l'analyse que nous proposons dans les pages qui suivent nous semble suffisant pour exprimer correctement l'idée heuristique d'un point de vue opérationnel. Cette dernière partie s'attache donc principalement à montrer que les idées et les méthodes que nous avons décrites en seconde partie peuvent réellement être mises en œuvre.

Cependant, ces résultats ne doivent pas être considérés comme simplement illustratifs. Dans l'intervalle de précision que nous avons

choisi, ils ont une véritable signification. Il convient pour nous de préciser cet intervalle.

L'échelle de concertation choisie pour tester notre environnement, correspond à un niveau global interdépartemental. Simul-Image est donc structuré ici pour autoriser un dialogue entre des acteurs « généralistes » (Conseil Généraux) et des acteurs proches de l'échelon local (directeurs de domaines skiables et associations de protection de la nature). La base de données intégrée se montre capable de traiter de problèmes spatiaux sur une échelle comprise entre le 1/500 000 et le 1/50 000. Elle permet de dresser les contours généraux d'une politique d'aménagement à l'échelle des massifs. Il faudra donc, pour traduire cette politique au niveau local, constituer une nouvelle base de données plus fine.

Sur le plan des simulations interactives, cela implique une altitude minimale de survol des scènes en dessous de laquelle l'image construite par les différents acteurs n'apporte plus d'informations. Cette remarque est importante pour l'aspect interactif du projet.

5.1 Le tourisme hivernal de la Savoie et de la Haute Savoie

La Savoie et la Haute Savoie représentent à elles deux la plus grande part du tourisme de montagne hivernal. Ces deux départements concentrent les plus grands domaines de France. Les Alpes du Nord ont constitué 80% du chiffre d'affaires national pendant la saison 2000 / 2001. La Savoie représentait à elle seule 49.4% du chiffre d'affaires avec un total

de 380.3 M euros¹²⁸. La Haute Savoie a produit un chiffre d'affaires de 168.4 M euros, soit 21.8% de l'ensemble.

5.1.1 Un poids économique très important

Dans le classement 2001, sur les 5 premières places 3 sont captées par la seule vallée de la Tarentaise avec, par ordre décroissant, la Société des Trois Vallées (S3V) (Courchevel, Méribel, Mottaret) N°1, la société d'Aménagement de la Plagne (SAP) N°2, la Société Mixte des Arcs (SMA) N°4. Le premier domaine, qui ne se situe ni en Savoie ni en Haute Savoie, apparaît en 9^{ème} position dans le classement (L'Alpe d'Huez).

Le nombre de journées-skieurs établi en Savoie en 2001 se stabilise à 18 534 236 et 10 300 279 en Haute-Savoie, sur un total de 53,5 Millions pour l'ensemble de la saison. Cependant, des disparités existent. La Savoie perd 16,4% de ses journées sur les trois dernières années alors que, dans le même temps, la Haute Savoie montre un accroissement accéléré de 69,3%.

En matière d'emplois, la Savoie compte 1091 permanents et 3686 saisonniers. La Haute Savoie parvient au nombre de 615 permanents pour 2386 saisonniers. Les quatre premières places du classement national pour ces deux types d'emplois sont occupées par un domaine de Savoie ou de Haute Savoie (Figure 5-1)

¹²⁸ Les données sont issues de l'enquête permanente menée par la société Montagne Expansion publiée chaque année. La population (N) s'est stabilisée pour l'année 2001 à 166 domaines skiables.

REPARTITION DES EMPLOIS "NEIGE"

Massif des Alpes du Nord - Saison 2001 - 2002

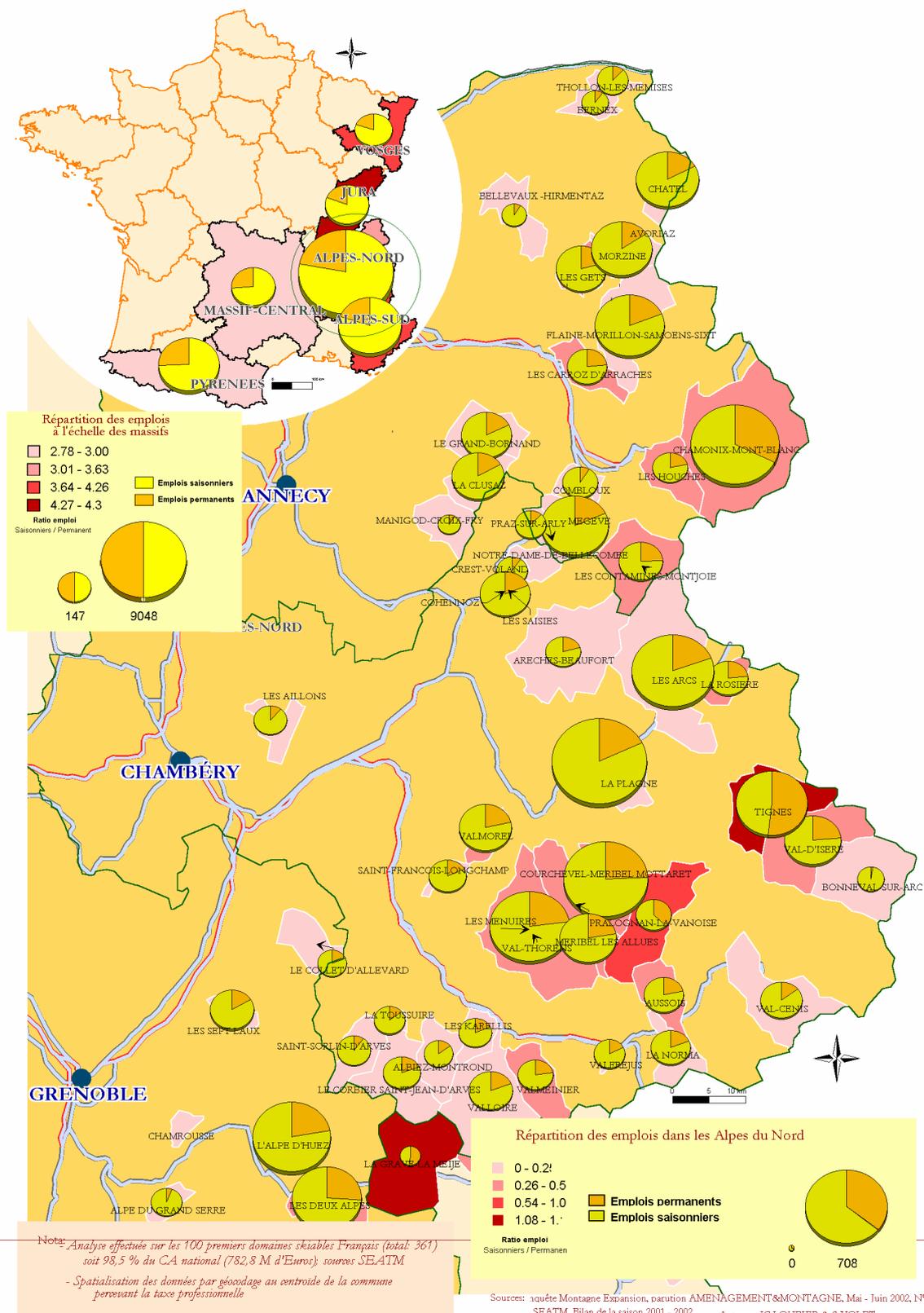


Figure 5-1: Les emplois des domaines skiables en Savoie et haute Savoie

5.1.1.1 Une offre maximale...

Pour le nombre de lits proposés, les valeurs sont également très importantes. Les deux départements offrent 710 654 lits qui se décomposent de la façon suivante. La Savoie s'appuie sur un parc de 404 378 lits et devance largement la Haute Savoie qui ne propose « que » 306 276 lits (Carte en annexe).

Le parc de remontées mécaniques montre que l'espace skiable est très bien couvert. La Savoie possède un parc de 831 remontées. La Haute Savoie se stabilise à la valeur 522 (Carte en annexe).

Le nombre de pistes proposées par les deux départements promet au touriste l'assurance de la découverte de nouveaux espaces sans que celui-ci n'ait à changer de massif pendant de nombreuses années. La Savoie fournit à l'amateur de pentes damées 1405 pistes, la Haute Savoie 999.

5.1.1.2 Fortement mise en valeur

D'une façon générale, l'activité liée à la neige est un des grands moteurs de développement économique des hautes vallées. L'étude du moment de puissance¹²⁹ des remontées

mécaniques détermine l'efficacité de l'équipement. Le ratio chiffre d'affaires / moment de puissance donne un indicateur de rentabilité du parc (Figure 5-2). La Savoie se distingue en présentant le plus fort équipement ainsi que le meilleur taux de rentabilité. La Haute Savoie arrive en seconde position. La durée moyenne de l'ouverture des domaines traduit l'effet attractif d'une garantie de couverture neigeuse suffisante. Avec 133 jours d'ouverture moyenne, la saison de la Haute Savoie est la plus longue de l'année 2002/2003.

Cette présentation rapide de l'économie du ski dans ces deux départements montre les enjeux que fait peser le changement climatique sur le tissu socio-économique des hautes vallées, où cette activité exerce un fort effet de fixation de population comme nous allons le voir maintenant.

¹²⁹ Le moment de puissance est un ratio entre le débit de la remontée mécanique et le dénivelé qu'elle propose (Formule du SEATM). Ce calcul permet d'obtenir une valeur destinée à évaluer le niveau de rentabilité économique exigé pour que le domaine skiable soit viable. Ce calcul est cependant, relatif. Sa généralisation doit être observée avec rigueur car il ne tient pas compte de la configuration des domaines. Il a été montré que le calcul du moment de puissance, dans le cas d'un domaine avec un seul point d'accès pour accéder aux pistes, n'était pas particulièrement fondé. Malgré ces limites, cet indicateur reste à ce jour le seul utilisé

pour caractériser le potentiel économique d'un domaine skiable.

EFFICACITE DES DOMAINES SKIABLES

Massif des Alpes du Nord - Saison 2001 - 2002

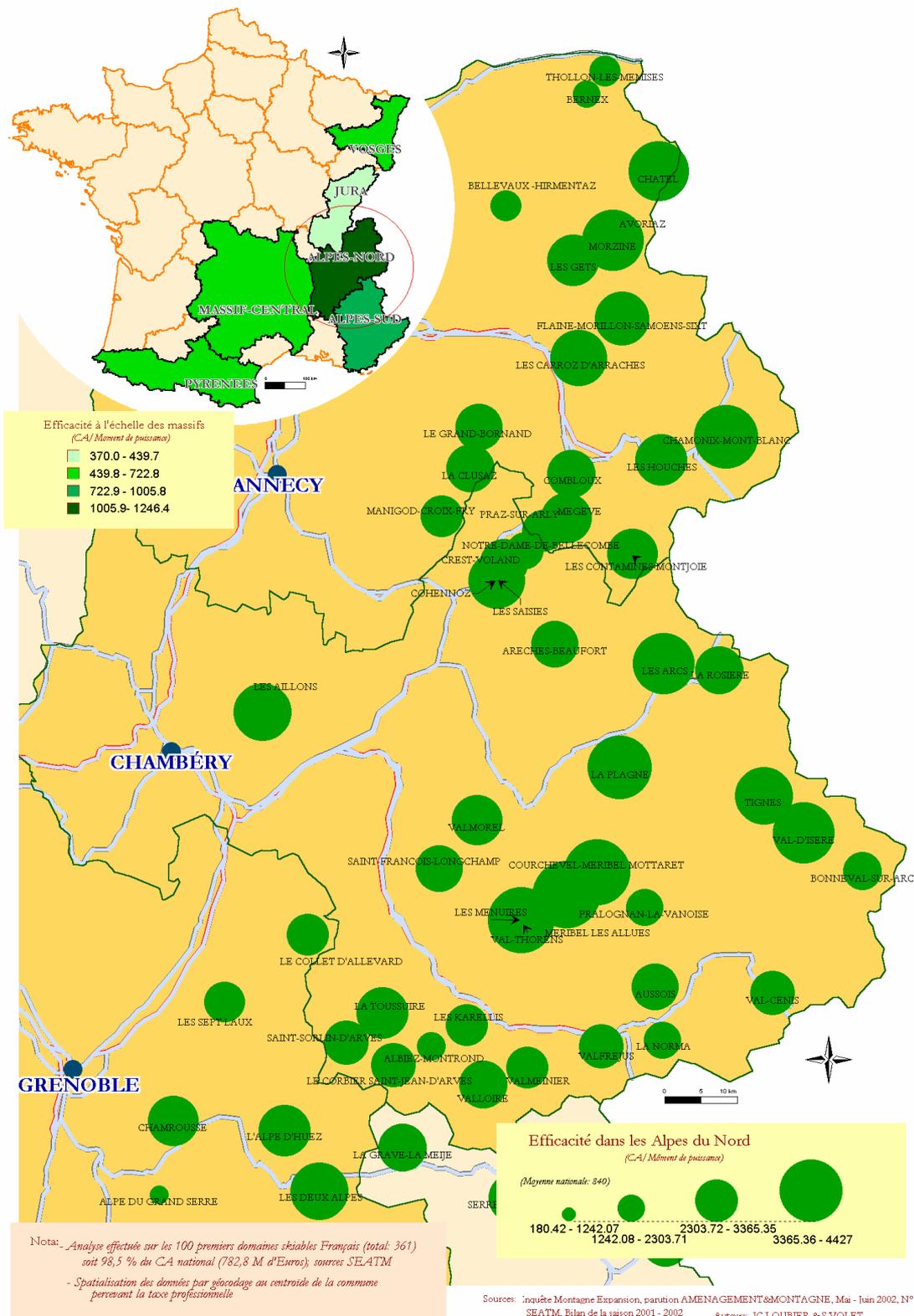


Figure 5-2: Carte de l'efficacité des Domaines skiables en Savoie et Haute Savoie

5.1.2 Profil du tissu social

Nous avons perçu, dans ce travail, le rôle majeur joué par les domaines skiables en tant qu'éléments structurants du tissu social. Cependant, nous appréhenderons mieux les enjeux socio-économiques futurs pour la Savoie et la Haute Savoie après un examen plus précis du tissu social présent dans ces deux départements. Les données que nous utilisons sont toutes extraites du recensement de 1999 et des archives départementales.

5.1.2.1 Populations des deux départements

La Savoie a, de tout temps, été moins peuplée que la Haute Savoie. Jusqu'au début des années 30, l'évolution de la population des deux départements a suivi une tendance quasi parallèle de perte de population (Figure 5-4). Cette réduction du nombre d'habitants a été assez forte pendant la période 1911/1920.

Il convient de souligner, que ces départements n'ont tout de même pas été « vidés » de leur population car le différentiel entre la population totale initiale (525 662 personnes) et celle de 1920 (460 702 personnes) n'a été « que » de 64 960 habitants¹³⁰. L'exode rural a toutefois été plus marqué dans les hautes vallées. Il s'est donc exercé de façon intra départementale. L'évolution, pendant la même période, du nombre d'habitants des deux principales villes, Chambéry et Annecy, vient confirmer ce phénomène (Figure 5-3). La population urbaine s'accroît, sauf pendant la période 1911-1921. Sans doute est-ce là un

effet visible de la saignée opérée par la guerre de 14/18 sur la population de ces deux départements ?

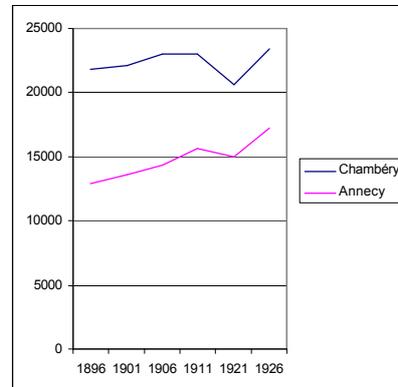


Figure 5-3: Evolution de la population d'Annecy et de Chambéry entre 1896 et 1931

Depuis 1931, les recensements montrent une remontée de la population plus forte en Haute Savoie qu'en Savoie (Figure 5-4). Les raisons de cette différence sont à rechercher dans les secteurs professionnels. La Haute Savoie est beaucoup plus industrialisée (60 600 emplois) que la Savoie (23 000 emplois). En revanche, le secteur tertiaire domine en Savoie à cause du poids important du tourisme. Cette disparité entre départements peut s'expliquer par le milieu naturel et l'histoire. La Haute Savoie n'a que 9% de son territoire en haute montagne contre 67% en Savoie. Le potentiel de développement touristique hivernal est donc très inégal. L'histoire apporte également quelques explications. La proximité de Genève a joué un rôle important dans l'établissement d'une mentalité d'entrepreneurs en Haute Savoie. (sous-traitance horlogère de la vallée de l'Arve et autour de Cluses au XIX^{ème} siècle). Le choix de Chambéry comme capitale par les puissants ducs de Savoie, ainsi que sa position de carrefour, a favorisé, en revanche, un tissu fondé sur le service.

¹³⁰ L'équivalent, tout de même, de la population de l'actuelle ville de Chambéry

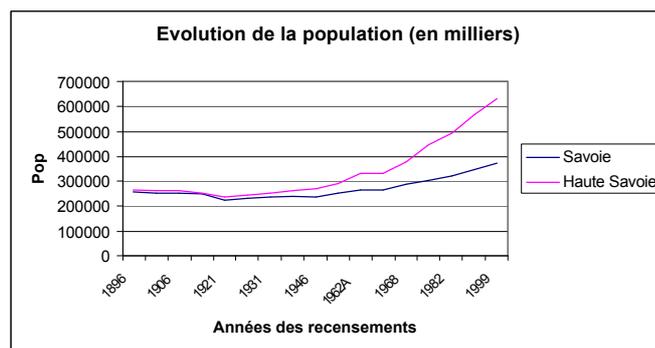


Figure 5-4: Evolution de la population en Savoie et Haute Savoie entre 1896 et 1999

Ces considérations nous permettent de formuler l'hypothèse que les domaines skiables ont exercé un effet de développement local plus prégnant sur le territoire savoyard

que sur le haut savoyard. L'étude de la répartition de la population par commune de ces deux départements confirme notre idée. (Figure 5-5)

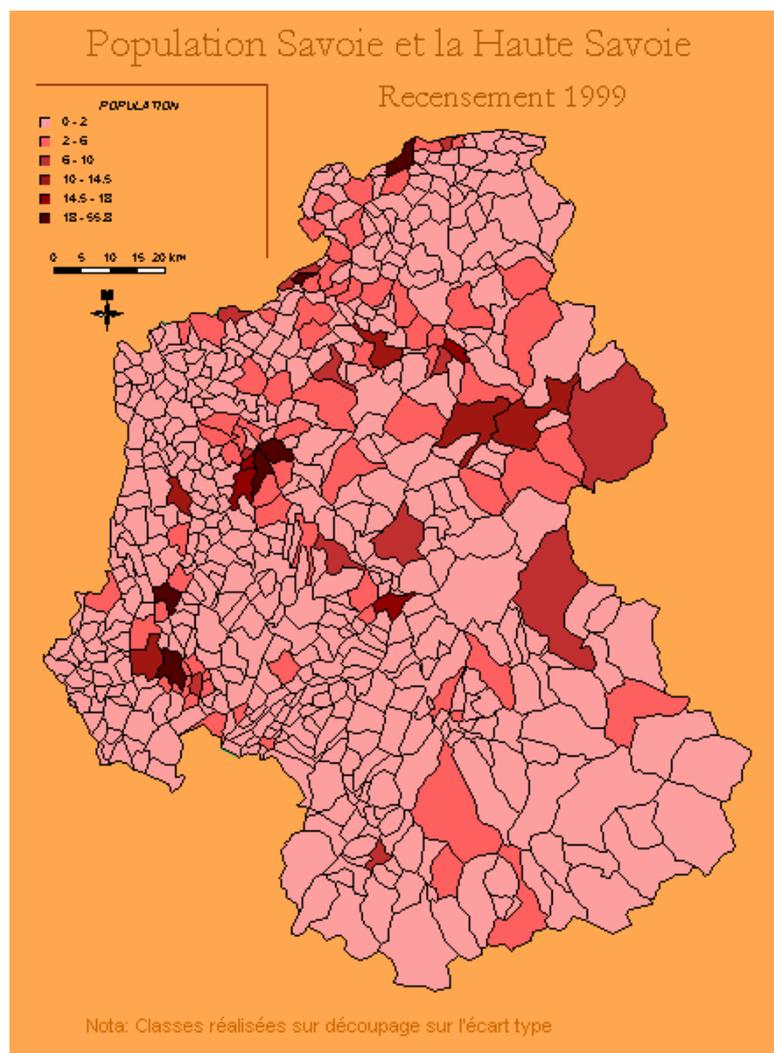


Figure 5-5: Carte de la population par commune pour la Savoie et la Haute Savoie

Source : Recensement 1999

Cette carte montre le profil et la spatialisation de la population en fonction des informations du recensement de 1999. Les classes ont été définies par découpage sur l'écart type de la distribution. La valeur séparant les deux classes les plus faibles correspond à la moyenne. L'histogramme de la distribution (population par commune) est largement asymétrique (Mode =0.4 ; Médiane =0.6 ; Moyenne =1.68). Nous remarquons le poids important des deux villes préfectorales qui se comportent comme des îles dans un océan de communes faiblement peuplées¹³¹. Chambéry structure un axe de population grossièrement Nord-Sud (le long du sillon alpin). L'agglomération d'Annecy offre un rayonnement en étoile. Nous remarquons également que la plus grande part des communes « peuplées » est située en Haute Savoie. Elles forment une écharpe de direction Nord-ouest / Sud-est qui prendrait naissance à Chamonix et qui se termine sur les rives du lac Léman. Cette écharpe suit un axe centré sur la rivière Arve. Nous retrouvons ici la trace de l'industrialisation précoce de la Haute Savoie.

Nous remarquons également quelques communes qui se dégagent, situées complètement à l'Est (c'est à dire dans de hautes vallées). C'est notamment le cas de Bourg-Saint-Maurice, Tignes, Chamonix, Samoëns, Morzine, Megève, Le Grand Bornand. Toutes ces communes sont également connues pour le domaine skiable éponyme présent sur leur territoire. Ces

domaines skiables font ici mieux que maintenir une population, ils constituent un véritable moteur de développement local. Pour ces communes, et compte tenu de leur éloignement des pôles de développement industriel situés plus à l'ouest, il ne semble pas exister d'alternative à l'activité touristique des sports d'hiver. La disparition de ces domaines skiables sonnerait sans doute le glas du développement de ces communes.

5.1.3 Le milieu « naturel » en Savoie et Haute Savoie

Il ne s'agit pas pour nous de brosser une analyse fine du milieu naturel montagnard savoyard et haut savoyard. Il existe déjà de nombreux ouvrages sur ce sujet [OZENDA 1986];[BEDECARRATS A et DINGER 1994]. Nous nous bornerons à rappeler ici certains points que nous avons décrits en première partie sur l'analyse spatiale en écologie. La démarche que nous proposons est un compromis entre celle qui est proposée par GOSSEN et celle de la théorie des facteurs limitant d'OZENDA. Nous avons expliqué en première partie qu'il n'était pas possible pour nous d'atteindre une précision à l'échelle de l'espèce. Avec cette technique, nous pouvons seulement identifier des espaces sujets à un déplacement potentiel des types d'occupation du sol. L'intérêt de cette identification se déploie à deux niveaux dans le contexte de simulation.

Pour le premier niveau, nous chercherons à proposer, dans un premier temps, une image du milieu naturel de la Savoie et la Haute

¹³¹ Ce qui nous permet de remarquer que ces deux départements ont la plus grande partie de leur territoire constitué de communes plutôt faiblement peuplées par rapport à la population totale qu'ils contiennent.

Savoie fondée sur la détermination statistique des types d'occupation du sol proposés par la base de données « Corine Land Cover » en occurrence par rapport à une maille. Cette façon de procéder se justifie par le désir de mesurer les impacts possibles sur les grands types d'occupation du sol, les seuls accessibles à notre échelle de précision. La maille que nous avons choisie pour déterminer cette valeur statistique est la commune. Nous établirons donc une première analyse du milieu par pourcentage d'occupation de la surface de la commune au regard d'un grand type d'occupation du sol. Cette agrégation se révèle efficace pour comprendre les enjeux spatiaux des impacts sur le milieu naturel à petite échelle.

Le second niveau propose une reconstitution du paysage avec une précision maximale de l'ordre du 1/50 000^{ème}. Cette reconstitution

permet la concertation entre plusieurs acteurs aux perceptions et aux usages différents du territoire. Les types d'occupation du sol pris en compte par la simulation peuvent être considérés dans un contexte assez large, comme des micro-écosystèmes (par exemple, les pelouses de l'étage subalpin.) C'est le niveau de précision le plus fin que nous puissions utiliser pour l'étude des impacts sur le milieu naturel sans courir de grands risques d'apparition de biais importants. En revanche, spatialiser ces types d'occupation du sol autorise l'optimisation du travail systématique d'observation taxinomique. Il suffit de se rendre sur les espaces sélectionnés et d'implanter des parcelles témoins. L'étude de ces dernières permettrait d'atteindre une précision à l'échelle du taxon.

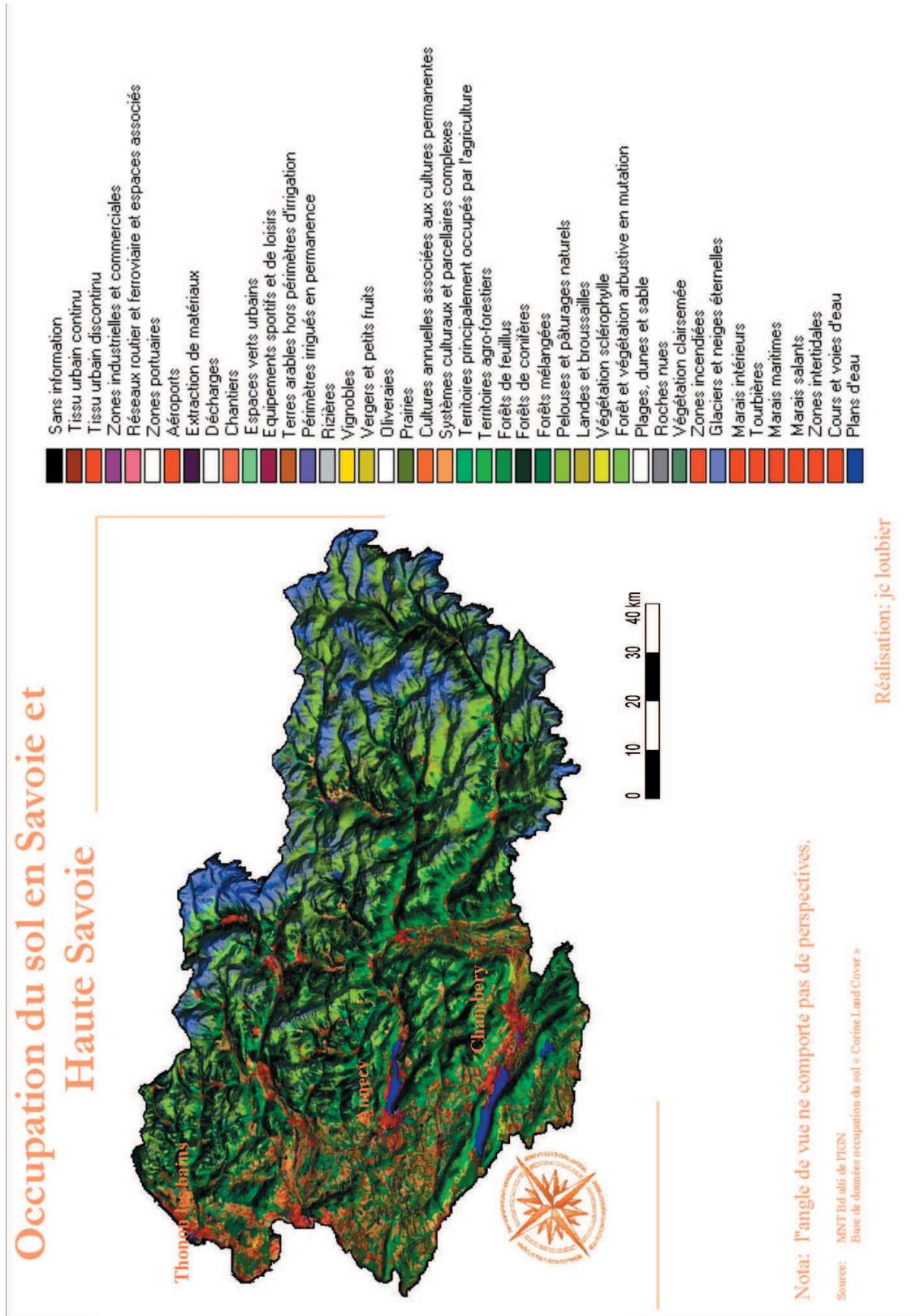


Figure 5-6 : Aperçu de l'occupation du sol en Savoie et Haute-Savoie

5.1.3.1 Analyse de la répartition spatiale de l'occupation du sol

La figure 5-6 (en 3D) met en évidence les deux grandes structures d'occupation du sol :

- l'espace, principalement agricole, situé sur les collines, en avant des premiers massifs et en fond de vallée, où l'homme exerce une action forte,

- les versants occupés par les forêts et alpages. Nous remarquons que c'est cette dernière structure qui occupe la plus grande part du territoire.

Le pourcentage d'occupation du sol pour ces deux structures s'établit de la façon suivante :

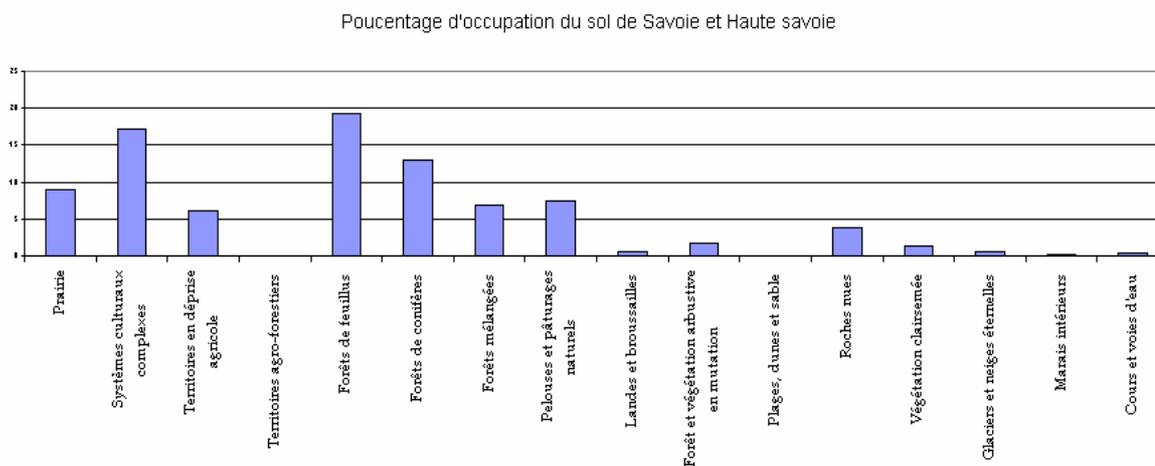


Figure 5-7: Structure globale de l'occupation du sol en Savoie et Haute Savoie

Source : Traitement Sig sur Base de données d'occupation du sol Corine Land Cover (IFEN)

Les ensembles agricoles et forestiers sont les plus représentés, respectivement 32, 4% et 39,3% de l'occupation totale du sol. De façon plus détaillée, les glaciers et neiges éternelles, type d'occupation du sol célèbre s'il en est dans un contexte de changement climatique, occupent 0,5% de la surface totale, les forêts de feuillus 19,3%, les forêts mélangées 6,9%, les forêts de conifères 13% et les prairies et pelouses naturelles 7,4%.

la succession des types d'occupation du sol : forêts de feuillus, forêts mélangées, conifères et pelouses. Ces quatre grands types d'occupation du sol se suivent dans l'espace de l'Ouest vers l'Est dans le sens de l'élévation de l'altitude.

L'étude des cartes agrégées sur la maille communale (Figure 5-8) met en évidence l'effet fortement structurant de l'altitude dans

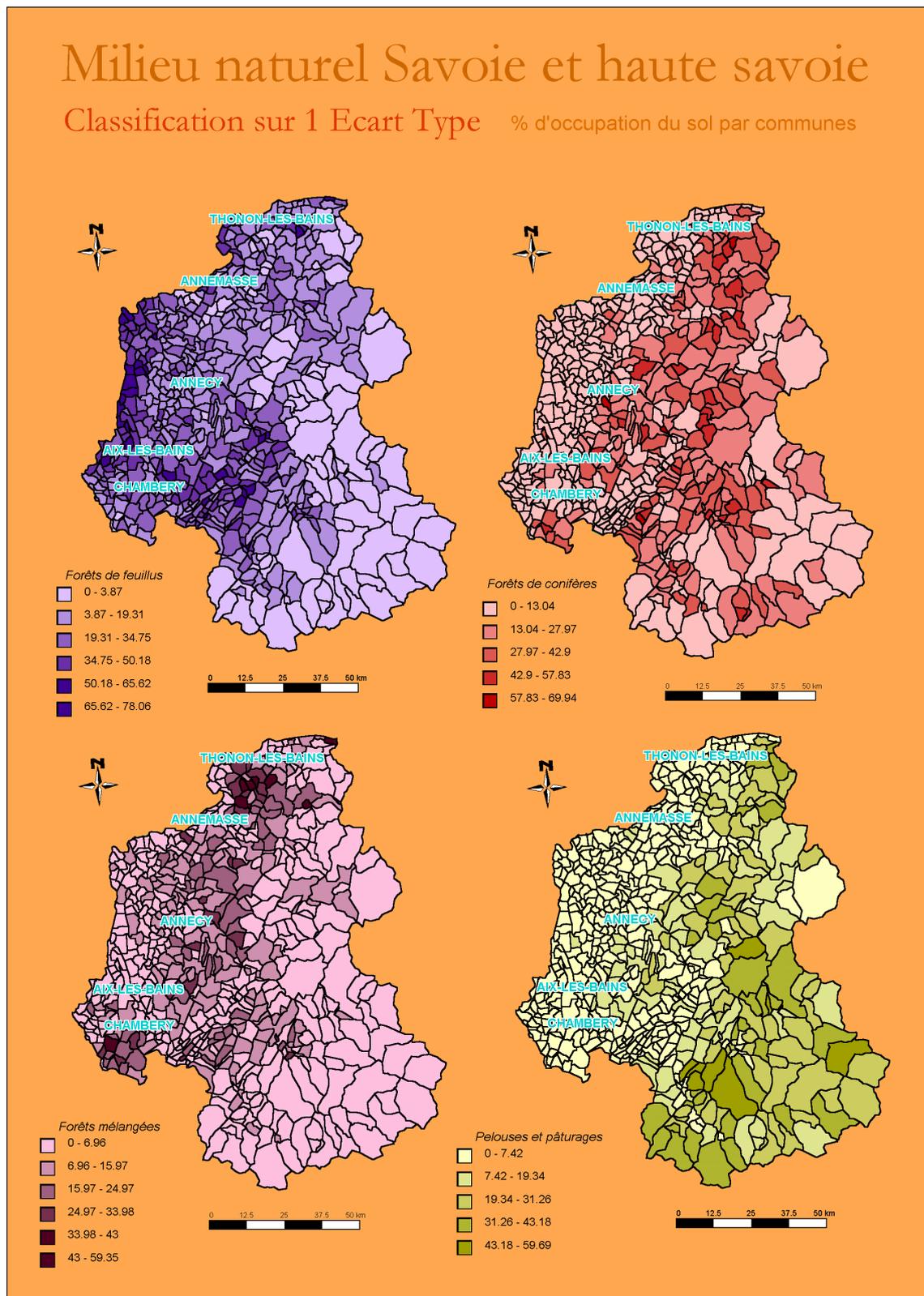


Figure 5-8: Occupation du sol pour le milieu naturel faiblement traité par l'Homme

5.1.4 Définition du contexte de simulation

Notre objectif est de prendre la mesure :

- Du potentiel d'impact du changement climatique sur le milieu économique de ski hivernal pour la Savoie et la Haute Savoie ;
- Du potentiel d'évolution du paysage pour les micro-écosystèmes ;
- D'identifier et de restituer, dans un environnement en temps réel, ces deux perceptions du territoire.

La concertation s'établit dans un intervalle à méso échelle [1/ 50 000 <> 1/500 000]. La donnée intégrée dans l'environnement de simulation sera donc optimisée pour des décideurs intéressés par ces échelles. Les grandes échelles permettront aux directeurs de domaines skiables (services des pistes et remontées mécaniques) et aux associations écologistes de comprendre et visualiser les espaces à enjeux à l'échelle du versant, de l'enveloppe générale du domaine skiable et du micro écosystème. Les petites échelles intéresseront le niveau institutionnel (Conseil Général, Maires, SEATM).

Compte tenu de la précision de l'échelle la plus fine (1/50 000ème), il n'est pas nécessaire d'alourdir la scène en réalité virtuelle avec la représentation des espèces dominantes dans la construction du paysage, par exemple, les arbres d'une forêt. L'altitude minimale de survol ne permettrait pas de les visualiser. En revanche, les remontées mécaniques et les bâtiments des fronts de neige seront modélisés et légèrement agrandis par rapport à leur taille réelle car elles

déterminent visuellement l'enveloppe du domaine skiable.

5.2 La construction de la base de données

Notre objectif principal étant de produire des cartes qui vont alimenter une réflexion sur une conduite à tenir, nous chercherons à obtenir une estimation globale de l'ampleur d'un phénomène. C'est le cas, par exemple, de l'évolution des températures dans le cadre du changement climatique sur une région donnée. Dans un second temps, la carte que nous produisons sert à alimenter une stratégie d'aménagement, il nous faut donc essayer de connaître du mieux que l'on peut l'erreur liée à l'interpolation, et, par force, à la représentation spatiale du phénomène. Cette information sera précieuse pour évaluer le degré de confiance que le décideur peut accorder au modèle cartographique sur lequel il s'appuie pour le choix décisionnel.

La création des cartes de températures et de précipitations revêt un caractère particulier au sein de notre environnement Simul-Image. Ces cartes représentent le niveau initial de l'information cherchée. Elles sont cependant le fruit d'un traitement déjà très complexe. Elles représentent une transcription spatiale des résultats de traitement des modèles de circulation climatique. En conséquence, elles influenceront de fait les décisions tactiques et opérationnelles dans la communauté des décideurs. Devant un tel niveau d'engagement, il convenait d'éclaircir les avantages et les inconvénients des méthodes d'interpolation qui permettent de concevoir

ces cartes. C'est la raison principale pour laquelle nous avons cherché à évaluer dans la partie II les qualités et les inconvénients des principales méthodes d'interpolations disponibles à ce jour en les considérant dans un contexte opérationnel.

5.2.1 Les Données de la base ER30 : historique et présentation

Toutes les mesures (températures et précipitations) que nous utilisons pour l'expérimentation de Simul-Image proviennent de la BD ER30. Cette base a été réalisée par

l'Equipe de Recherche n°30: **Recherches Cartographiques appliquées au Climat et à l'Hydrologie** du CNRS pendant une période de 25 ans qui s'étale de 1967 à 1992. Il s'agit là d'un patrimoine exceptionnel en matière de mesures climatiques sur le territoire français, particulièrement sur l'arc alpin. Nous avons extrait de la BD ER30 les données Précipitations (fichier Pdep) et Températures (fichier Tdep) au pas de temps mensuel qui concernent les départements de la Savoie et de la Haute Savoie. La base balaie une période totale de 56 ans (1936-1992) mais la quantité de stations et de mesures est très inégale en fonction des années (figure 5-9).

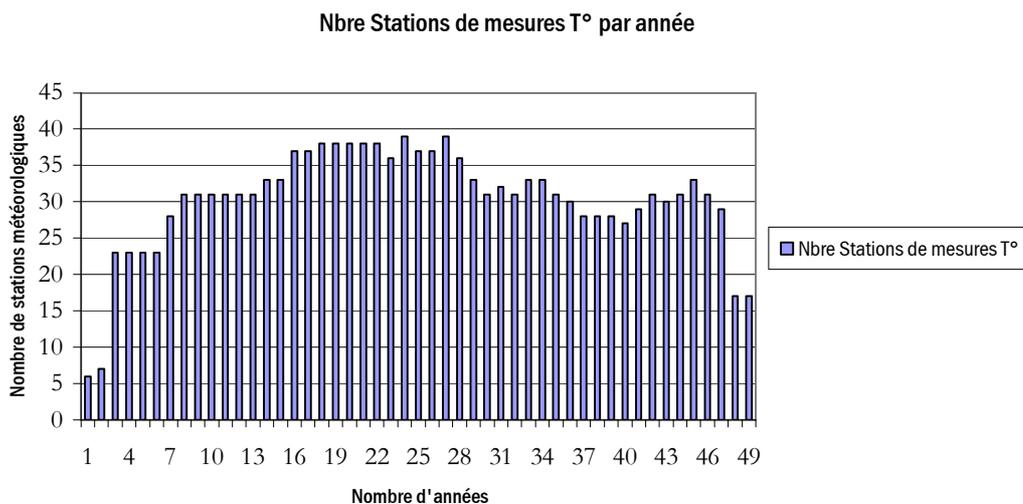


Figure 5-9: Tableau du Nombre de stations de la bd ER30 de 1944 à 1992

En outre, il existe des lacunes temporelles dans les mesures des stations. Ces variations dans le nombre, la qualité et la durée de « vie » des stations nous ont conduit à réduire considérablement l'amplitude de la période temporelle, ainsi que le nombre de stations météorologiques utilisables pour notre travail de spatialisation de la température et des précipitations. Pour produire une analyse

statistique correcte, il est important de disposer d'un panel de données le plus homogène possible. Dans notre cas, il s'agissait surtout de trouver une période d'au moins 30 ans (telle que le préconise l'Organisation Mondiale de la Météorologie) partagée par un ensemble de stations de mesures et sans lacunes. Après analyse des fichiers de précipitations et de températures

mensuelles, nous avons trouvé une période de 30 ans (1949-1990), répartie sur 38 stations pour les précipitations et 33 pour les températures, qui correspondait à nos exigences. Nous avons décidé de travailler sur ces nouvelles chroniques pour construire nos cartes.

Comme il s'agissait de travailler sur le plan de la tendance climatique de répartition des

précipitations et des températures, nous avons transformé les fichiers de chaque station disponibles dans la base ER30, par un seul tableau contenant en lignes les stations météorologiques, en colonnes les mois et en cellule la moyenne des mesures mensuelles minimales sur les 30 ans (Figure 5-10). Ce sont ces moyennes qui nous serviront de données d'entrée pour la création de nos cartes.

NOM Station	ID Idrisi	Z	X	Y	T°janv	fev	mars	avr	mai	juin	juillet	aout	sept	oct	nov	dec
Aussois	1	1490	946100	2035800	-0.34	-0.30	-0.45	-0.03	0.50	0.87	1.34	1.30	0.99	0.65	0.00	0.00
Beaufort Arèches	2	1030	929400	2084900	-5.18	-4.72	-2.86	1.16	5.05	8.39	10.74	10.39	8.10	4.31	-0.65	-3.61
Bessans	3	1715	965023.12	2047180.8	-1.91	-1.65	-1.18	-0.46	0.41	0.53	0.90	0.92	0.45	-0.06	-1.16	-1.81
Bourg S.Maurice MN	4	865	944700	2077200	-4.93	-3.62	-0.60	2.11	6.57	9.64	11.75	11.27	8.96	4.61	0.03	-3.27
Hauteluze Belleville	5	1215	934800	2095400	-6.25	-5.85	-3.42	-0.18	3.71	7.01	9.23	8.78	6.52	3.25	-2.73	-4.53
Lescheraines	6	590	893100	2085800	-6.32	-5.32	-2.91	1.16	4.39	7.94	9.54	9.27	7.00	3.86	-0.07	-4.15

Figure 5-10: Exemple de structure du tableau de données pour la température

La base ER30 fournit également des indications très précieuses sur les sites de mesure. Nous avons pu retrouver les positions des sites en coordonnées Lambert 2 étendu ainsi que des réflexions autour de la qualité des mesures au fil des années. Cette finesse d'information nous a permis de créer une carte des stations dans un système d'information géographique.

Les données de chaque station ont été introduites dans la base de données relationnelles de Simul-Image. Un lien

d'import permanent avec le SIG a été créé. De cette façon, nous pouvons repérer automatiquement dans notre champ toutes les mesures de températures et de précipitations que nous souhaitons, celles de la base ER30 comme celles qui sont simulées. L'analyse spatiale des phénomènes du climat devient alors possible.

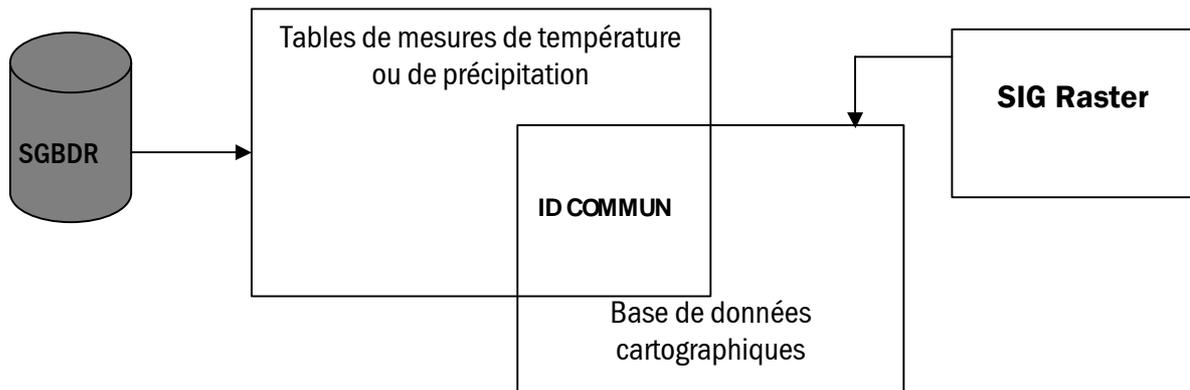


Figure 5-11 : Modèle d'échange de données climatiques vers le SIG raster

5.2.2 Interpolations opérationnelles : une bibliothèque de cartes de températures et de précipitations

Nous avons montré, dans la seconde partie de ce travail de thèse, les différentes méthodes d'interpolation à notre disposition pour nos données climatiques. Parmi ces méthodes et indépendamment de l'interpolation elle-même, l'analyse variographique nous apporte de nombreuses informations sur le comportement spatial des températures et des précipitations sur notre champ d'étude. Nous pouvons mieux comprendre la manière dont se déploient ces phénomènes et porter cette information à la connaissance des décideurs, apportant une valeur supplémentaire aux cartes climatiques.

Dans ce but, l'analyse spatiale que nous ferons des phénomènes de températures et précipitations se fera en deux temps pour chacun des deux types de données. Le premier temps sera une analyse structurale simple à l'aide des variogrammes. La seconde partie du travail portera sur l'étude du phénomène après interpolation sur un plan temporel (le comportement global annuel). Pour cela, nous

produirons une analyse en composante principale (ACP) spatiale en SIG raster.

5.2.2.1 Les cartes de précipitations : analyse du phénomène

Le premier temps de notre analyse est fondé sur l'étude variographique des données. Comme nous avons conduit cette analyse pour l'ensemble des mois de l'année, nous pouvons décrire un comportement global du phénomène dans l'espace.

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons décrit l'allure générale des variogrammes (pas et portée maximale). L'analyse structurale que nous présentons ici est donc liée à des variogrammes définis sur un pas de 5000 mètres et de portée maximale 52 000 mètres

• Analyse globale du jeu de variogrammes

Les 12 variogrammes (un pour chaque mois de l'année) proposent deux directions principales. La première concerne la direction de plus faible variance (où le phénomène est

le plus homogène dans l'espace). Cette direction s'oriente Sud Ouest/ Nord Est. Le phénomène de précipitations le plus régulier coupe donc le massif alpin selon un axe grossièrement orthogonal. Cette direction correspond au flux principal des masses d'airs qui balayent la Savoie et la Haute Savoie en régime habituel.

La direction de plus grande variance suit un axe presque parallèle aux grandes lignes de crêtes qui délimitent les massifs. Nous voyons apparaître ici l'effet bien connu de la quantité de précipitations reçues par les différents massifs en fonction de leur disposition dans l'espace. D'une façon générale, les massifs internes des Alpes (les plus à l'Est) reçoivent moins de précipitations que les massifs externes (à l'Ouest) qui sont touchés en premiers par les masses d'air chargées en vapeur d'eau car le flux habituel est orienté Sud sud-ouest.

Ceci correspond au modèle dominant de déploiement des précipitations sur notre champ d'étude. Cependant, cette organisation n'est pas détectable de façon identique tout le long de l'année. Elle se révèle particulièrement vraie au printemps, en été et en automne. Le reste du temps, les variogrammes indiquent que d'autres structures, moins fortes, viennent perturber ce modèle.

Nous avons cherché à mettre en évidence ces structures au travers d'une analyse par ACP spatiale.

• ACP spatiale pour le phénomène des précipitations

La fonction TSA proposée par le logiciel IDRISI (SIG Raster) permet l'analyse d'une série temporelle basée sur un ensemble d'images. Elle propose deux types d'informations : temporelles et spatiales.

Le résultat spatial de l'analyse consiste à affecter une image à chacun des axes de composantes principales standardisées. Chaque cellule qui compose cette image est affectée d'une valeur qui exprime sa position sur le plan factoriel.

Le résultat temporel correspond à un tableau de poids qui indique la contribution de chacune des images à l'information totale. L'intérêt d'une telle démarche est évident. En considérant simultanément les images et leurs poids, nous pouvons apprécier les écarts au modèle dominant déjà perçu par variographie sur un plan spatial et temporel. Par définition, le modèle dominant correspond au premier axe dans notre ACP. Les images suivantes expriment un changement. Il s'agit donc des résidus de l'image précédente. Outre le fait que ces images peuvent être associées aux poids temporels (exprimés par le tableau proposé également par la fonction TSA) dans l'information totale, elles permettent surtout l'identification de structures spatiales d'écart au modèle dominant.

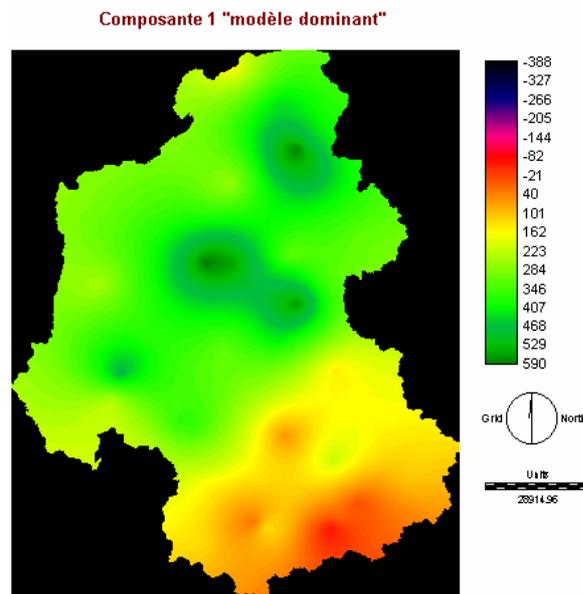


Figure 5-12 : Carte attachée à l'axe 1 de l'ACP spatiale

La figure 5-12 montre le modèle dominant de notre ACP spatio-temporelle. Cette carte est liée à l'axe 1 de notre ACP et les valeurs exprimées par l'échelle représentent les coordonnées des cellules le long de l'axe.

L'information totale de notre jeu de données (les 12 cartes interpolées de précipitations) est exprimée à 98% par cette première carte (Figure 5-12). C'est à dire que la structure spatiale habituelle des précipitations pour la Savoie et la Haute Savoie (moyenne minimale sur 30 ans) s'établit à 98% de cette façon. Si l'on observe la contribution de chacune des variables mensuelles à cette image, on remarque que tous les mois se situent entre 95% et 99% de corrélation. Janvier et février sont les deux mois qui sont les moins bien corrélés à cette image. Les valeurs données par la légende indiquent la conformité des cellules au modèle dominant. Comme dans toutes les ACP, les valeurs proches de 0 sont mal représentées. Il est donc très complexe d'interpréter l'information qui leur est

attachée. Nous remarquons que ces cellules se situent toutes dans des zones de transition entre deux grandes structures spatiales. L'opposition de signe est l'expression des quantités de précipitations reçues par les cellules d'un point de vue temporel.

L'allure générale de ce modèle est très ressemblante à la plupart des cartes mensuelles de précipitation de notre champ. Seule la carte du mois de décembre est très différente. Cette dernière se rapproche fortement de la carte liée à l'axe n°2. L'anisotropie globale détectée par variographie est donc confirmée.

La figure 5-13 représente la seconde composante de notre ACP. Son poids n'est que de 1.19%. L'étude de la contribution des variables (Figure 5-14) montre que cette carte décrit les écarts au modèle dominant pour l'hiver et l'été. Les mois de janvier, février et juin sont les plus corrélés à cette carte.

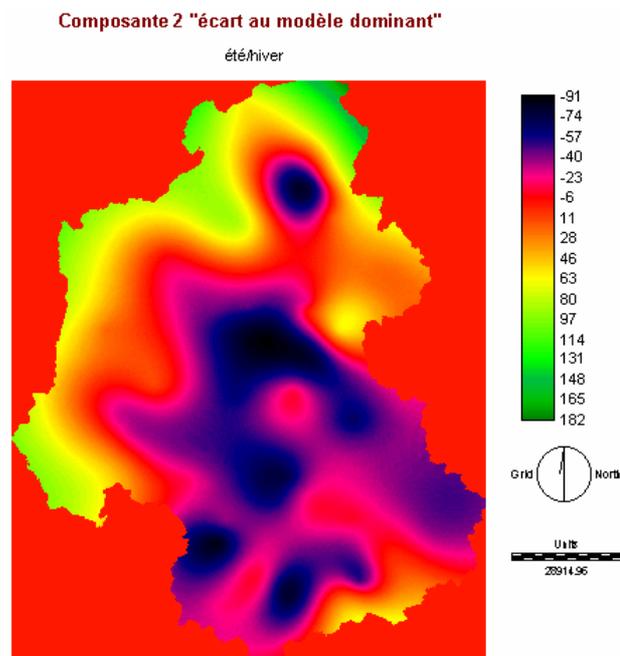


Figure 5-13 : Carte attachée à l'axe n° 2 de l'ACP spatiale

Nous remarquons que cette carte s'oppose pratiquement de façon symétrique au modèle dominant dans les directions de faible et forte variabilité. La forte corrélation spatiale des cellules, ici, n'apporte pas d'informations particulières car elle représente simplement un complément du modèle dominant. En revanche, l'opposition de direction est assez intéressante. Elle indique que les phénomènes non conformes au modèle dominant semblent obéir à une structure cachée. Tout se passe comme si les masses d'air qui génèrent ces phénomènes suivaient un chemin opposé au flux habituel. Cela nous autorise à formuler l'hypothèse qu'il existe une relation entre des précipitations localement inhabituelles (en quantité ou en période) et la position de champs de hautes pressions en hiver et en été. Ces derniers organiseraient alors un flux de Sud sud-est en direction de notre terrain d'étude. Cette situation existe en météorologie. En hiver, nous voyons parfois apparaître un anticyclone centré sur les îles anglo-irlandaises. En été, l'anticyclone centré sur le golfe de Gênes, est connu pour produire de l'instabilité en montagne. Il est probable que notre carte d'écart au modèle dominant montre les conséquences de cette inversion de flux mais nous n'avons pas de preuve pour l'affirmer.

	CMP 1	CMP 2	CMP 3
% Var	98.025487	1.192285	0.30217
	CMP 1	CMP 2	CMP 3
janvier	0.953746	-0.284366	0.07039
février	0.987598	-0.133064	-0.028596
mars	0.994815	0.009676	-0.091463
avril	0.996737	0.013348	-0.02022
mai	0.99505	0.075529	-0.017047
juin	0.992166	0.111647	0.028069
juillet	0.989435	0.099796	0.064393
août	0.991348	0.055219	0.089357
septembre	0.993078	0.091844	0.027155
octobre	0.996429	0.022962	-0.07029
novembre	0.996673	-0.011321	0.004736
décembre	0.993095	-0.062955	-0.052947

Figure 5-14 : Score des variables sur les trois premières composantes de l'ACP

Les deux cartes que nous avons produites ci-dessus regroupent 99,19% de l'information totale contenue dans nos 12 cartes de « base » des précipitations en Savoie et Haute Savoie. La composante n°3 ne contient que 0.30% de l'information totale. Nous avons considéré qu'elle n'était pas suffisamment importante pour une prise en compte dans notre analyse.

• Interpolation

Nous avons déjà longuement décrit les procédés d'interpolation dans la seconde partie de la thèse. Toutes les cartes de précipitations interpolées sont représentées en annexe, accompagnées d'un tableau de comparaison de qualité en validation croisée.

5.2.2.2 Les cartes de températures : amélioration du semis

Nous avons vu plus haut que notre semis de stations météorologiques rendait difficile la conduite d'une analyse variographique sur les températures. Les variogrammes sont assez erratiques et rendent assez complexe, l'ajustement d'un modèle mathématique. La

raison principale de cette situation est relative à la faiblesse de notre jeu de données.

- **Mise en œuvre du modèle d'ajout de stations virtuelles**

Nous avons décrit plus haut le formalisme développé pour l'ajout de stations virtuelles dans le cadre de la fabrication des cartes de températures. En application à nos données, le modèle révèle un comportement extrêmement stable¹³². Les tests que nous avons effectués sur les stations météorologiques réelles montrent que le modèle ne tient que faiblement compte des particularités spatiales locales, que nous avons pourtant introduites avec le calcul du *Wi* de chaque station. Les températures prévues sont plus fortement corrélées à l'allure globale de la distribution. La conséquence directe est que les stations de mesure au profil thermique éloigné de la moyenne de la distribution ne sont pas bien rendues par le modèle de création de stations virtuelles. D'un point de vue opérationnel, cela nous conduit à mener une étude supplémentaire, d'identification des espaces où nous pouvons ajouter des stations virtuelles pour que le modèle propose des prévisions correctes. Nous avons donc cherché à déterminer des cellules dont le modèle pouvait proposer une température qui varierait le moins possible par rapport à celle qui serait réellement mesurée. Cet objectif est rendu possible par l'étude du comportement du modèle pour chaque station connue.

¹³² Il fluctue autour de la moyenne générale de la distribution.

- **Calibrage et comportement du modèle avec les données réelles**

Afin de connaître le comportement de notre modèle d'ajout de stations virtuelles, nous avons conduit une analyse pour chacune des stations météorologiques en la considérant comme une station virtuelle. Pour cela, nous avons extrait de notre jeu de données de températures la station météorologique concernée par la simulation, et nous avons réintroduit dans le modèle ses seules caractéristiques spatiales. Nous avons donc pour déterminer la température un jeu permanent de 32 stations sur 33. Dans un second temps, nous avons comparé les deux matrices de résultats (réels et prévus).¹³³

Le résultat considéré dans son ensemble est très satisfaisant à la fois sur le plan global et au niveau mensuel. Le modèle montre un comportement stable dans la manière dont se présentent les valeurs dans le temps puisque nous obtenons un coefficient de détermination de 0.76 entre les deux matrices. Cela signifie que les saisons sont bien rendues par notre modèle puisque aux valeurs basses réelles correspondent des valeurs basses prévues, avec la même constatation pour les valeurs hautes. Cette observation est encore confirmée par l'étude des moyennes mensuelles totales (Figure 5-15).

¹³³ Les calculs et tableaux sont donnés en annexe.

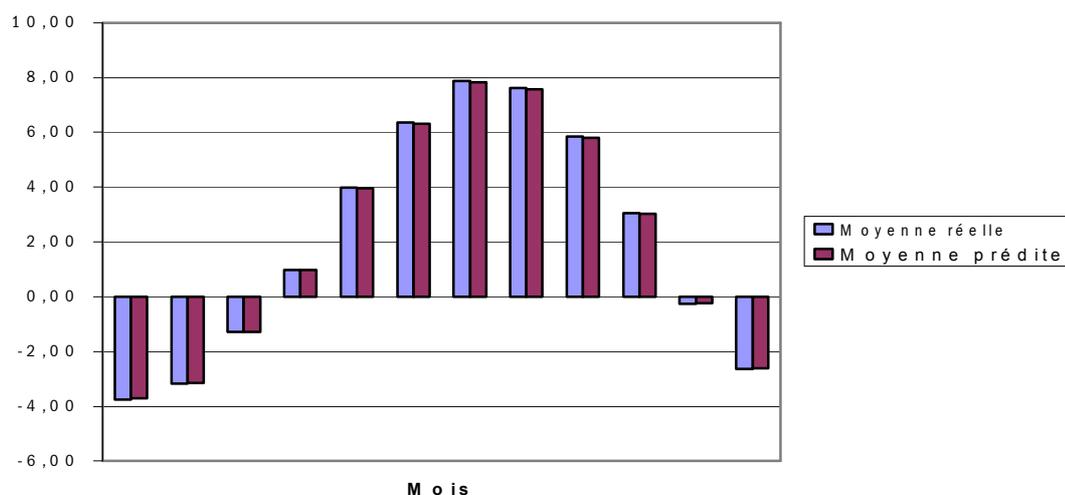


Figure 5-15 : Comparaison des moyennes mensuelles réelles et prévues

Cependant, les valeurs données au niveau des individus sont très disparates. Certaines stations météorologiques sont très bien rendues par le modèle tandis que d'autres, avec les même choix de calibration (40% du poids du W_i donné par l'altitude, et 30% pour la distance et l'orientation), sont très mal représentées. Ces dernières sont toutes dans des situations thermiques particulières. L'étude de la covariance entre les valeurs mesurées et prévues pour chaque station nous apporte des informations supplémentaires sur le modèle quant à sa pertinence locale¹³⁴.

Nous pouvons identifier les stations météorologiques où notre modèle n'est pas validé car la covariance est faible. C'est le cas par exemple pour les stations d'Aussois, Bessans (figure 5-16), la Rochette-les cités, Abondance, Chamonix le tour et Samoëns. Le fait que la fiabilité des prévisions du modèle ne soit pas indépendante de la position des stations virtuelles dans la champ d'étude nous oblige à modifier la stratégie d'implantation des ces dernières par rapport à ce que nous avons proposé en seconde partie.

¹³⁴ Le tableau de covariance de chaque station est présenté en annexe.

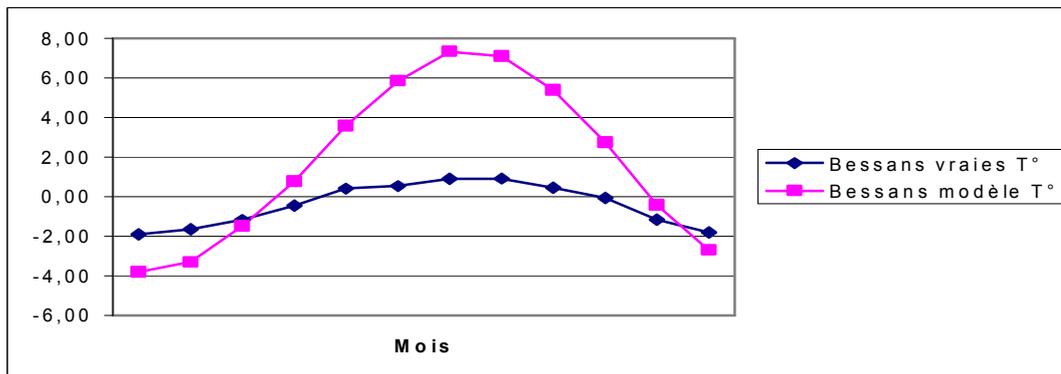


Figure 5-16 : Allure d'une station de mauvaise qualité de prévision (Bessans)

D'autres stations sont, en revanche, bien représentées par notre modèle. Il s'agit de stations au profil thermique proche de la moyenne de l'ensemble de notre jeu de données.

Selon le principe de ressemblance spatiale qui sert de postulat dans notre modèle, nous pouvons retrouver les caractéristiques topographiques de ces stations bien représentées et déterminer les espaces favorables à l'ajout d'une station virtuelle par une analyse en SIG raster. Les stations intéressantes pour notre projet, qui

remplissent l'objectif de minimiser l'erreur de prévision locale sont représentées avec une covariance comprise entre 14 et 20. On retrouve dans cette catégorie les stations d'Avrieux, Verrens Arvey, La Clusaz...

La fourchette d'estimation est d'environ 0.7° autour de la vraie valeur de température. Cette valeur est une conséquence du besoin d'un minimum de situations spatiales différentes réparties sur l'ensemble de notre champ. Nous avons sélectionné les meilleures stations jusqu'à ce que nous ayons un panel spatial suffisamment hétérogène.

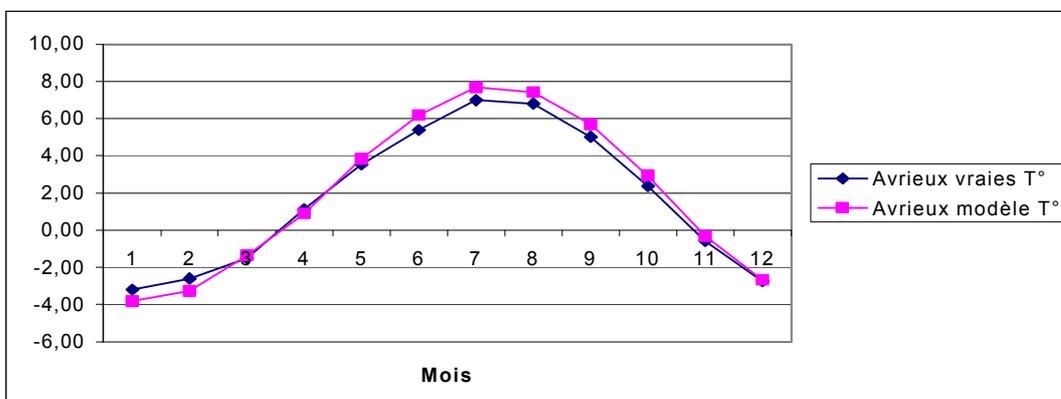


Figure 5-17 : Allure d'une station de bonne qualité de prédiction (Avrieux)

Nous avons poursuivi l'analyse de qualité de prédiction à l'aide des indicateurs simples de statistique descriptive, moyenne, médiane, écart type. Une liste de stations où le modèle de prédiction est en relation avec nos objectifs¹³⁵ a été réalisée. Le travail d'analyse en SIG raster nous permettra d'identifier des cellules où nous savons que notre modèle d'ajout de stations virtuelles sera correct.

5.2.2.3 Identification des espaces favorables à l'ajout de stations virtuelles

Nous avons choisi de considérer uniquement les stations les mieux simulées par le modèle dans le contexte que nous nous sommes fixé. Nous avons donc défini onze stations météorologiques qui répondent à ce critère. Ces stations offrent un panel de situations spatiales (altitudes, orientation et distances aux autres stations) que nous allons chercher à retrouver en effectuant une analyse de notre champ par SIG raster. L'approche que nous utiliserons pour la détermination des espaces favorables au positionnement d'une station virtuelle est fondée sur les concepts d'analyse multicritère en logique floue. L'intérêt de l'usage de la logique floue dans cette analyse, consiste à augmenter nos chances de déterminer des espaces favorables au positionnement d'une station virtuelle. Le SIG IDRISI est l'un des seuls instruments du marché à posséder des fonctionnalités qui

permettent de mettre en œuvre cette approche¹³⁶.

L'objectif est de déterminer des cellules (pixels) qui entreront dans une ou plusieurs combinaisons des différents cas spatiaux possibles. Ces solutions spatiales seront évaluées dans leur pertinence en fonction de leur correspondance avec des critères choisis par l'analyste. Deux types de critères spatiaux influencent la détermination du « meilleur » espace possible : les contraintes et les facteurs. Leurs déterminations correspondent aux choix du praticien en fonction du but à atteindre. Nous allons donc commencer par créer les cartes correspondantes à ces critères.

• Les contraintes

Les contraintes concernent les critères d'obligations ou d'exclusions. Il est obligatoire que les cellules sélectionnées soient (ou ne soient pas) comprises dans l'intervalle donné par l'établissement de ces contraintes. La carte résultant de ce choix comprend deux espaces de valeur booléenne : les espaces affectés de la valeur zéro exclus du projet et ceux affectés de la valeur 1 sélectionnés pour le projet.

Dans notre projet, les deux critères altitude et orientation, relatifs aux stations correctement rendues par le modèle correspondent à des

¹³⁵ Le tableau de comparaison est donné en annexe.

¹³⁶ Eastman, J.R., 1996. Uncertainty and Decision Risk in Multi-Criteria Evaluation: Implications for GIS Software Design, Proceedings, UN University International Institute for Software Technology Expert Group Workshop on Software Technology for Agenda 21: Decision Support Systems, 26 février – 8 mars.

contraintes. Nous savons que le modèle d'ajout de stations météorologiques virtuelles est valable à des altitudes et des orientations précises, celles des véritables stations météorologiques. Ces situations spatiales doivent donc être intégrées dans notre

analyse. Cette opération se définit par reclassement et nous obtenons au final une carte booléenne de toutes les cellules altitudes et orientations possibles sur notre champ (Figures 5-18 et 5-19). Cette carte représente des contraintes d'obligations.

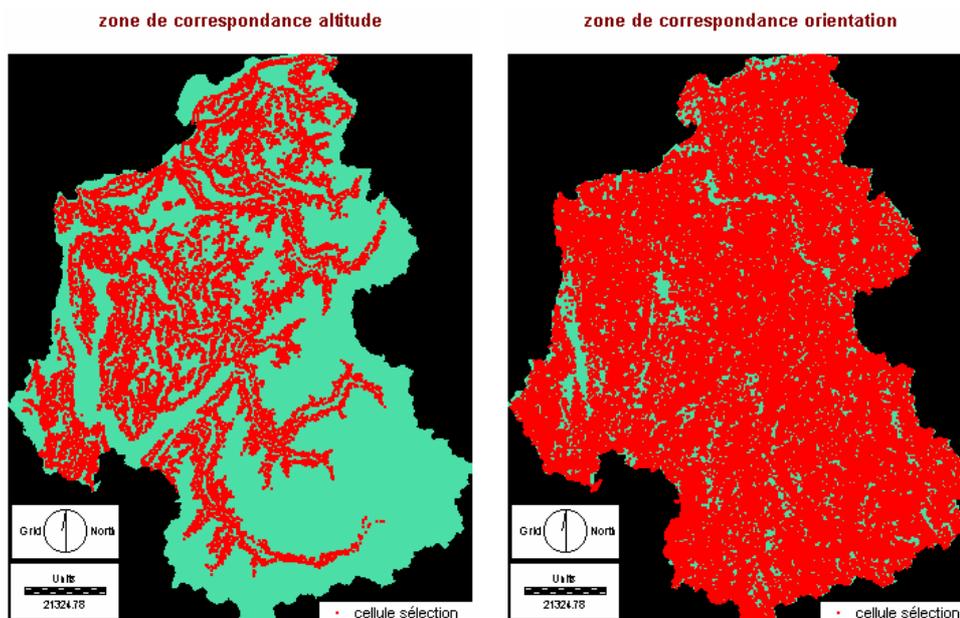


Figure 5-18 : Carte booléenne des correspondances altitudinale et orientation

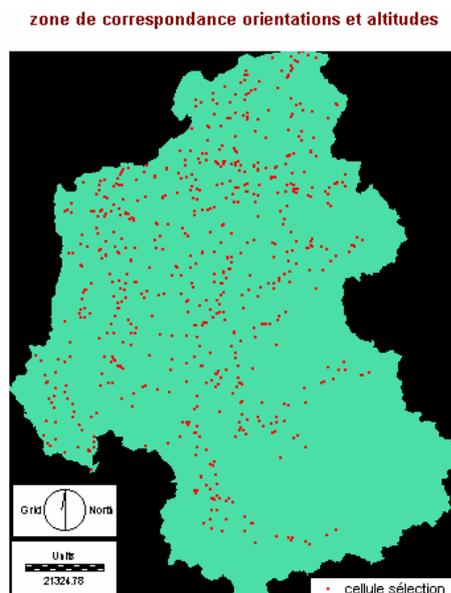


Figure 5-19 : Carte booléenne des contraintes

• Les facteurs

Les facteurs exercent une influence plus lissée dans la démarche multicritère que nous avons choisi. La distance inter-stations, le relief et l'orientation entrent dans la catégorie des facteurs. L'idée que nous poursuivons ici est de réduire le caractère booléen des contraintes que nous avons déterminées plus haut. Par exemple, l'altitude 1215 peut être considérée comme pertinente car elle correspond à une station au profil thermique bien traduit par le modèle d'ajout de stations météorologiques virtuelles. Compte tenu de la démarche linéaire que nous avons suivie pour la construction de nos W^{137} , il y a fort à parier que l'altitude 1214 sera également acceptable, l'erreur engendrée par la dérive de l'optimum (l'altitude 1215) restant dans des proportions satisfaisantes. Pour le cas des orientations, le raisonnement est identique.

L'approche par ensemble flou permet de mettre en œuvre l'idée que nous venons d'exprimer ci-dessus. La théorie des ensembles flous autorise des classifications moins tranchées pour la détermination de classes entre ce qui sera accepté comme valable et ce qui sera obligatoirement rejeté [ZADEH 1965]; [TONG TONG 1995]. Cette théorie est fondée sur la détermination d'une fonction d'appartenance. L'allure de cette fonction comprise entre 0 et 1 permet de donner une valeur indiquant le degré de correspondance de chaque cellule avec l'idée

¹³⁷ Voir le chapitre détaillant la construction du modèle de prévision des températures.

poursuivie. Par exemple, l'usage d'une fonction sigmoïde, dans le cas de la spécification de l'appartenance de toutes les valeurs d'altitude, va permettre de donner un intervalle continu entre les altitudes bien gérées par notre modèle de prévision spatiale de température et celles qui ne le sont pas¹³⁸. Les valeurs des cellules ne sont donc plus des altitudes mais des degrés d'appartenance. (Figure 5-23). Le point délicat pour la définition des appartenances se situe au moment de la création de la fonction. Celle-ci doit représenter un concept, par exemple les altitudes valables et celles qui ne le sont pas. Cette idée est traduite par l'allure de la courbe sur un repère orthonormé avec en X, les valeurs des cellules, en Y, la valeur d'appartenance comprise entre 0 et 1 (Figure 5-20).

¹³⁸ D'ailleurs, notre modèle d'ajout de stations de températures ne fait pas autre chose que de déterminer un poids d'appartenance du point visé avec toutes les autres stations présentes sur notre champ.

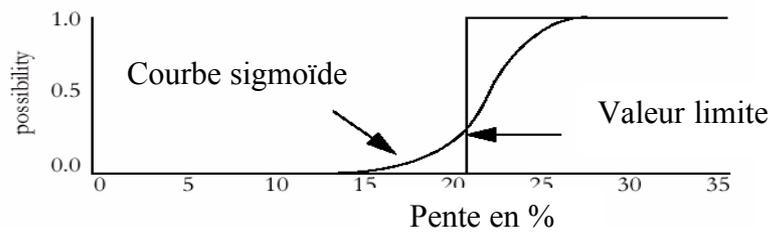


Figure 5-20 : Modèle d'appartenance en ensemble flou pour la pente

Le logiciel IDRISI permet de réaliser des ensembles flous avec la fonction FUZZY. Cette fonction offre trois types de fonction d'appartenance : sigmoïde, en J, linéaire. La modélisation de l'allure de la fonction passe par le positionnement de quatre points

d'inflexion que nous plaçons sur l'axe des X. Le positionnement de ces points doit traduire le concept d'appartenance au phénomène que l'opérateur cherche à représenter. (Figure 5-21)

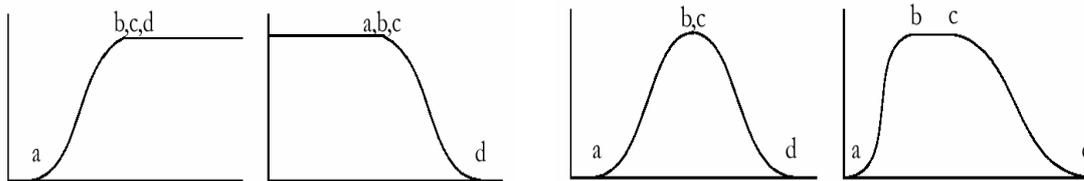


Figure 5-21 : Quatre exemples d'utilisation de la fonction sigmoïde.

Les points a ; b ; c ; d donnent l'allure de la courbe.

• La question de l'incertitude et du risque d'erreur

Dans ce processus d'identification des espaces favorables, la modélisation des facteurs est déterminante. Cette dernière s'établit sur la base des informations disponibles pour cette modélisation¹³⁹. Les

règles de décision, celles qui sont prises pour la modélisation du phénomène dans l'environnement peuvent donc faire l'objet d'incertitudes. La forme la plus courante de cette incertitude concerne l'assignation des valeurs aux points d'inflexion car il s'agit d'un choix qui reste tranché. Il nécessite donc un étayage conceptuel. Dès lors que cette incertitude prend corps, elle doit être prise en compte dans le processus, de façon à évaluer le risque que le résultat donné en fin d'analyse soit faux. Cette évaluation est une estimation

¹³⁹ L'information discutée ici concerne le niveau de connaissance de la façon dont le phénomène étudié se comporte du point de vue de l'objectif. Cela revient à poser le problème de la limite dans le choix des valeurs (la prise en compte de la distance dans notre processus représente bien cette idée) en relation avec la qualité des données disponibles (la mesure rapportée par notre base n'est qu'une

mesure approchée avec le réel, cela est particulièrement évident dans le cas d'un MNT).

de la combinaison des deux types d'incertitudes, celle qui est relative à la qualité de la donnée et celle qui est liée aux règles de décisions. L'objectif de cette prise en compte consiste clairement à mesurer la propagation de l'erreur dans le processus de combinaisons.

Dans le cas de notre analyse, nous allons chercher à évaluer l'erreur en fonction d'un couple confiance/hypothèse. La partie confiance de ce couple peut se résumer par la phrase suivante : les informations spatiales relatives à nos stations météorologiques bien restituées par le modèle sont l'explication de la température mesurée à ce point. La seconde partie, le volet hypothèse se définit de la façon suivante : la température prévue en des points aux caractéristiques spatiales équivalentes sera d'aussi bonne qualité qu'aux points pourvus d'une station réelle. Pour simplifier, ce couple confiance/hypothèse forme une règle de décision de type postulat. Si nous acceptons pour vrai ce que nous croyons et qui est indémontrable en l'état, alors le raisonnement suivant sera vrai également. La loi de Bayes propose un instrument pour évaluer la vraisemblance de notre hypothèse. Par définition, nous sommes en présence de deux possibilités :

- Notre hypothèse est vraie
- Notre hypothèse est fausse

On peut, en toute première approximation, les considérer comme équiprobables. En conséquence, le résultat spatial final sera la sélection des meilleurs espaces en fonction des critères retenus dans l'hypothèse de

vraisemblance. Cette probabilité, appelée probabilité conditionnelle, devra être considérée comme une vérité de terrain.

5.2.2.4 Mise en œuvre et construction des facteurs flous

Nous avons constitué, plus haut, la carte des contraintes (Figure 5-19). Il s'agit d'une carte booléenne. En revanche, deux étapes seront nécessaires pour la constitution des cartes représentant les facteurs : la modélisation du caractère continu au travers de la fonction floue d'appartenance et la standardisation en combinaison linéaire pondérée

• Le facteur flou altitude

La courbe pertinente pour la définition du concept d'appartenance dans le cas de l'altitude est la fonction sigmoïde. Les quatre points d'insertion devront être positionnés de telle façon que les points B et C se confondent avec la valeur d'altitude de la station météorologique. Les points A et D donneront respectivement les bornes inférieure (altitudes minimales) et supérieure (altitudes maximales) de notre champ d'étude. De cette façon nous traduisons parfaitement cette idée de ressemblance au phénomène pour les altitudes proches de celle de la station météorologique

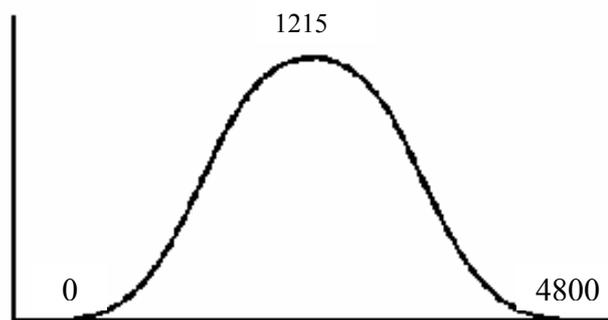


Figure 5-22 : Modèle de définition du facteur altitude

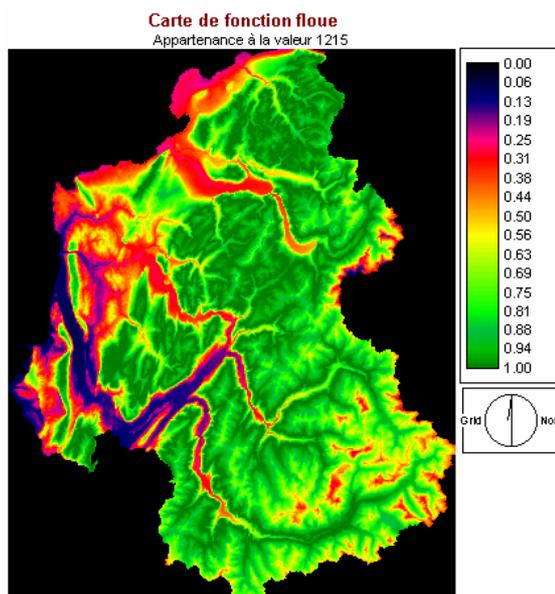


Figure 5-23 : Carte de fonction floue et fonction sigmoïde associée

Onze stations météorologiques véritables ont été retenues pour l'analyse multicritère car l'étude de leur comportement dans notre modèle a montré qu'elles étaient modélisées avec suffisamment de pertinence en fonction de notre objectif. Leurs caractéristiques topographiques, altitudes, orientation et distances aux autres stations serviront de données d'entrées pour déterminer les points d'inflexion. Nous ne pouvons pas, dans IDRISI, placer plus de 4 points d'inflexion pour définir la notion d'appartenance. Pour cette raison, nous devons répéter l'opération du calcul de l'appartenance pour chacune des onze

stations. Le facteur flou altitude sera donc composé d'une série de onze cartes prises en compte simultanément dans le traitement multicritère.

• Le facteur flou distance

Nous utiliserons également la fonction sigmoïde pour la traduction du phénomène d'appartenance en fonction de la distance. En revanche, sa présentation sera différente. Nous pouvons considérer que la distance est de moins en moins importante pour

l'établissement de la température à mesure que l'on s'éloigne du point de position de la station météorologique. Le facteur flou distance a été constitué à partir de deux opérations. La première a été de réaliser une carte de calcul de distance à partir du semis de stations vraies.

Dans un second temps, nous avons réalisé la carte du facteur flou distance sur cette première carte. La fonction utilisée pour cela a été une sigmoïde inversée avec les valeurs suivantes aux points d'inflexion : (Toutes les valeurs données ci-dessous sont en mètres.)

- A= 0 (cette valeur indique le point de départ de notre fonction. Les cellules de la carte affectées de cette valeur sont celles des positions des stations météorologiques).
- B= 100 (cette valeur indique la portée du palier de la fonction. C'est à dire la distance en mètre où nous considérons que les conditions climatiques responsables de la température mesurée exercent encore une influence pertinente dans l'établissement d'une mesure prévue correcte).
- C= 1000 (cette valeur indique la rapidité avec laquelle la fonction décroît, traduisant l'effet rapide de l'indépendance des conditions climatiques à des échelles plus petites).
- D=38398 (cette valeur indique la distance maximale possible du champ).

• Le facteur flou orientation

Le facteur flou orientation est très ressemblant dans sa mise en oeuvre au facteur flou altitude pour la définition des espaces favorables à la mise en place d'une station virtuelle. Le raisonnement que nous avons tenu pour la question de l'altitude est également valable dans le cas de l'orientation.

• La question de la standardisation et de la pondération des facteurs

La standardisation de nos facteurs est assez simple puisqu'elle suit une loi continue. Il s'agit simplement d'opérer un étalonnage linéaire dans un intervalle commun compris entre 0 et 255. Cet étalonnage s'établit à partir des limites minimales et maximales. C'est à dire 0% d'appartenance et 100% d'appartenance.

En revanche, la question de la pondération est critique. Deux stratégies sont possibles.

- La première se fonde sur le respect de l'hypothèse d'équiprobabilité que nous avons défini plus haut :
 1. le couple confiance/hypothèse que nous avons déterminé est vrai,
 2. le couple confiance/hypothèse que nous avons déterminé est faux.

A ce moment-là, nous devons considérer que chaque facteur exerce un poids équivalent dans le processus d'identification des meilleurs espaces pour

le positionnement de nos stations virtuelles.

- La seconde consiste à reprendre les poids donnés aux facteurs spatiaux pour calibrer le modèle de prévision de la température que nous avons développé. La somme de ces poids devra être égale à 1. En effet, chaque facteur contient une part de l'information totale nécessaire pour la sélection des cellules satisfaisant à l'hypothèse de vraisemblance. L'addition de l'ensemble de ces poids dans l'établissement du résultat doit donc représenter 100% de l'information totale. Notre choix s'est porté sur cette dernière voie. Il nous semble logique de conserver au maximum les caractéristiques de calibrage de notre modèle pour le champ sur lequel il produit des résultats. Les poids retenus dans ce modèle sont les suivants et

correspondent à ceux que nous avons choisi pour le modèle d'ajout de stations météorologiques virtuelles :

- ✓ Altitude = 0,4
- ✓ Orientation = 0,3
- ✓ Distance = 0,3

- **Mise en évidence des meilleures cellules pour le positionnement de stations météorologiques virtuelles**

La question du poids des critères constituait véritablement la phase la plus critique de notre démarche. La suite du travail se révèle plus simple. Notre objectif est unique et son accomplissement revient simplement à établir une combinaison linéaire pondérée de nos facteurs et contraintes. IDRISI propose une fonction baptisée MCE (Multi Criteria Evaluation) qui permet de construire assez facilement cette combinaison.

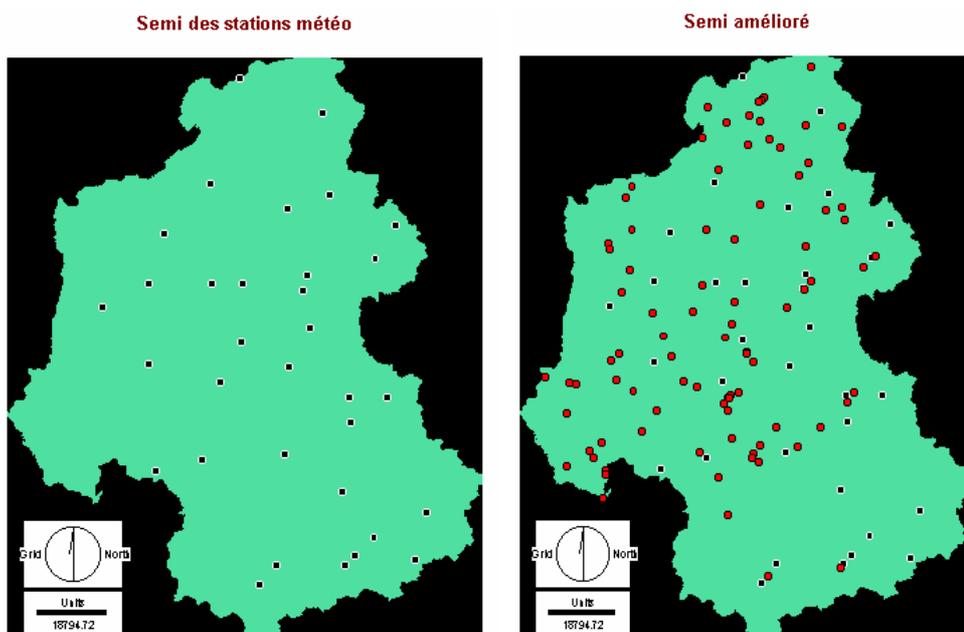


Figure 5-24 : Cartes des semis du champ (initial et amélioré)

Le résultat de l'analyse montre que nous pouvons ajouter un nombre non négligeable de stations virtuelles sur notre champ d'étude en fonction des stratégies que nous avons choisies au départ (figure 5-24). Ces cellules représentent les espaces où le risque de non-conformité locale de prévision de la température donné par le modèle est le plus faible. Le semis pourra donc être améliorée.

Le nombre de points supplémentaires choisis pour améliorer le semis dépend de l'efficacité de l'amélioration de l'interpolation. Nous pouvons retrouver maintenant la démarche itérative que nous avons décrite plus haut pour l'optimisation du semis. Il s'agit donc pour nous de choisir la station virtuelle la plus éloignée de toutes les stations réelles (dans l'intervalle des cellules sélectionnées par notre analyse préalable), d'interpoler par la méthode la plus judicieuse, de comparer l'amélioration de la qualité de l'interpolation et de recommencer l'opération jusqu'à ce que l'ajout d'un point n'améliore pas l'interpolation de façon significative.

5.2.3 Interpolation sur la base du semis amélioré : exemple du mois de janvier type

Nous disposons au départ de 33 stations météorologiques. Le semis a été enrichi des 15 premières¹⁴⁰ stations virtuelles proposées par l'analyse. Notre panel de stations se porte donc à 48 stations sur l'ensemble du champ d'étude.

¹⁴⁰ La fonction MCE affecte un score aux espaces sélectionnés.

5.2.3.1 Interpolation : krigeage déconseillé

L'interpolation par krigeage nécessite un jeu de données où une valeur en particulier ne doit pas être surreprésentée ou sous représentée. Habituellement l'analyse statistique classique permet d'identifier ces valeurs aberrantes et de les extraire avant le travail d'analyse structurale. En effet, le krigeage produit une estimation locale à partir de l'ensemble, une mesure fortement représentée (de surcroît artificiellement) introduirait une forme de biais autour des valeurs situées au delà de troisième quartile.

Or, notre modèle calibré ne permet que le positionnement de stations virtuelles dont le comportement thermique est proche de la moyenne de la réalisation. Nos 15 stations virtuelles, bien que positionnées dans des lieux différents donnent donc une valeur de température proche entre elles. Cet effet est suffisant pour rendre la stratégie du krigeage risquée dans ce cas précis¹⁴¹. Mais la véritable raison de ne pas employer les méthodes de krigeage concerne la philosophie de notre modèle. Le krigeage est déconseillé comme moyen d'interpolation couplé à notre modèle car la philosophie de l'ajout de stations virtuelles est justement contraire à celle du krigeage. C'est la position de la station dans le plan qui détermine sa température dans notre modèle, alors que le krigeage insiste justement sur le fait que les valeurs mesurées aux points ne doivent pas dépendre de la position de ces derniers, seulement de leur

¹⁴¹ Car la température « mesurée » à ces stations virtuelles est conditionnée par la position de la station dans le champ d'étude.

distance. C'est le principe de stationnarité. [GRATTON 2002]

En revanche, nous pouvons utiliser la méthode des splines bi-cubiques. Cette fonction appartient à la famille des fonctions de base radiales. Nous en avons développé la théorie dans la seconde partie. Elle représente l'une des méthodes d'interpolation les plus efficaces à ce jour et peut être appliquées comme une fonction d'interpolation géométrique puisqu'il s'agit de polynômes d'un genre particulier. Sa relative désaffection tient principalement au coût en calcul dans le cas d'un ensemble important de points de mesure, ce qui n'est pas notre cas. Il est probable qu'avec l'augmentation fulgurante des moyens de calculs, ces méthodes d'interpolations investiront rapidement le champ de la géographie.

- **Interpolation du semis amélioré par fonction base radiale de type plaque mince**

La réalisation « janvier habituel » a été interpolée par la méthode des splines bi-cubiques sur la base du semis amélioré par l'ajout de 15 stations virtuelles. Cette méthode peut être considérée comme purement géométrique. En conjuguant l'ajout de stations virtuelles, elle permet d'obtenir une qualité d'interpolation très efficace en s'épargnant

l'analyse structurale et l'ajustement de modèles mathématiques sur les variogrammes.

Interpolation T° janvier avec stations virtuelles

Rajout de 15 stations virtuelles

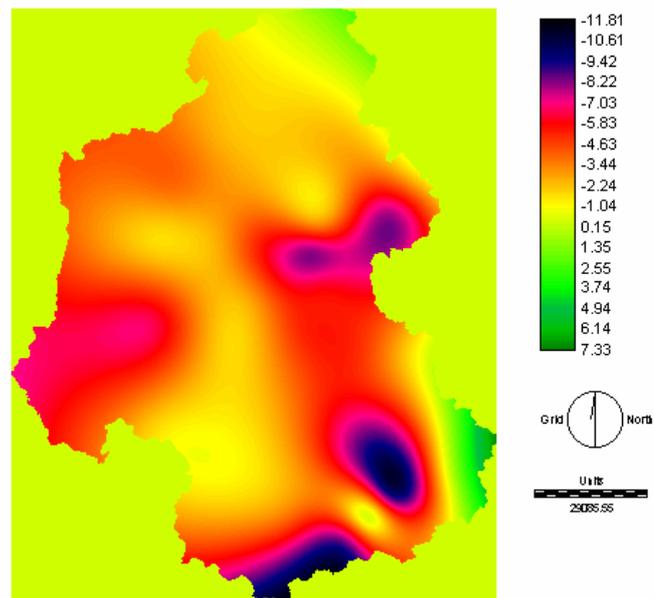


Figure 5-25 : Exemple d'interpolation par spline de type plaque mince

L'étude des résidus en validation croisée (Figure 5-26) montre que cette interpolation est sans biais. Elle est donc adaptée pour une mise en œuvre opérationnelle.

Cependant, la carte de la figure 5-25 montre des limites aux bordures. Dès que le champ est plus grand que la couverture maximale autorisée par le semis, nous sortons du cadre de l'interpolation pour passer dans celui de l'extrapolation. Dans ce cas, la fonction spline dérive fortement comme tous les polynômes. C'est la raison de l'effet de bord que nous observons en partie basse droite de la figure 5-25.

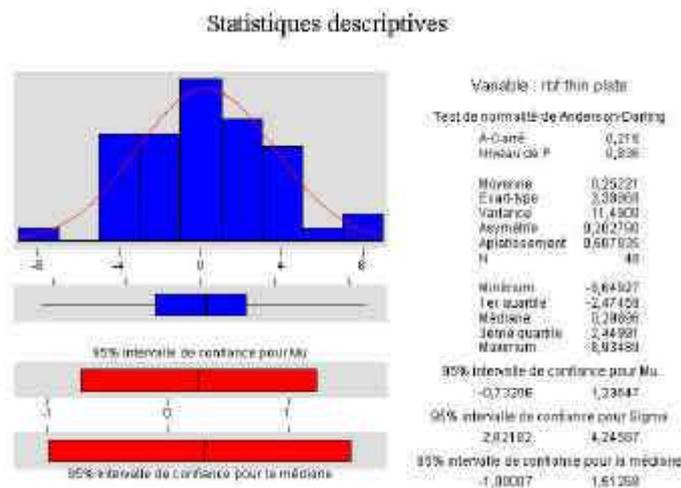


Figure 5-26 : Validation croisée pour l'interpolation par spline de type plaque mince

Cette méthode possède toutefois certains avantages dans un contexte d'aide à la concertation. Son caractère « mécanique » réduit fortement la part d'arbitraire propre au krigeage. Pour la construction de bibliothèques de cartes climatiques, cet avantage se révèle déterminant quand l'opérateur n'est pas un spécialiste de la question de l'interpolation.

5.2.3.2 Etude du déploiement du phénomène des températures

Comme pour l'analyse des précipitations, nous allons chercher à préciser les structures spatiales du phénomène des températures sur notre champ d'étude. Nous utiliserons la même démarche que celle que nous avons proposée pour les précipitations. Dans un premier temps, nous chercherons les grandes structures communes dégagées par une analyse variographique transversale des 12 réalisations mensuelles de notre phénomène. Dans un second temps, nous produirons une ACP spatiale pour établir un modèle dominant et identifier les structures latentes.

• Etude structurale des températures

Comparativement au phénomène des précipitations, l'étude simultanée des variogrammes ne propose pas de direction fondamentalement tranchée pour l'ensemble des mois de l'année. Cela montre que la tendance mensuelle est bien plus influencée par des conditions locales du climat que les précipitations. Une direction très grossièrement Sud-est Nord-est semble toutefois émerger à l'étude des variogrammes. Nous pouvons également regrouper des mois par « affinité de structures variographiques », dessinant comme des pulsations de structures.

• ACP spatiale pour les températures

Le modèle dominant regroupe 72.43% de l'information totale sur 12 mois. Nous remarquons que cette valeur est plus faible que pour les précipitations. Cela est probablement dû au caractère « volatile » des

températures qui sont fortement influencées par les conditions locales. L'analyse du score de chaque mois par rapport au modèle

dominant révèle que mars (50%) mais surtout novembre (-0.01%) sont les plus faiblement corrélés (Figure 5-27)

	CMP 1	CMP 2	CMP 3
% Var	72.432063	26.684944	0.410597
	CMP 1	CMP 2	CMP 3
Janvier	0.881911	0.465017	-0.045055
Février	0.834456	0.546627	-0.043167
Mars	0.503351	0.853888	-0.099494
Avril	-0.785305	0.609018	-0.000277
Mai	-0.954923	0.291245	-0.046779
Juin	-0.979688	0.195711	-0.020187
Juillet	-0.987443	0.151607	-0.026
Août	-0.987682	0.150959	-0.023182
Septembre	-0.981405	0.187606	-0.025937
Octobre	-0.943628	0.324857	-0.005753
Novembre	-0.01424	0.984139	0.174908
Décembre	0.819561	0.555847	-0.019269

Figure 5-27 : Contribution des variables sur les trois premières composantes de l'ACP

La figure 5-28 du modèle dominant dégage les structures principales liées à la température en Savoie et en Haute Savoie. Contrairement au phénomène de précipitations, ces structures n'étaient pas toutes détectables au premier abord.

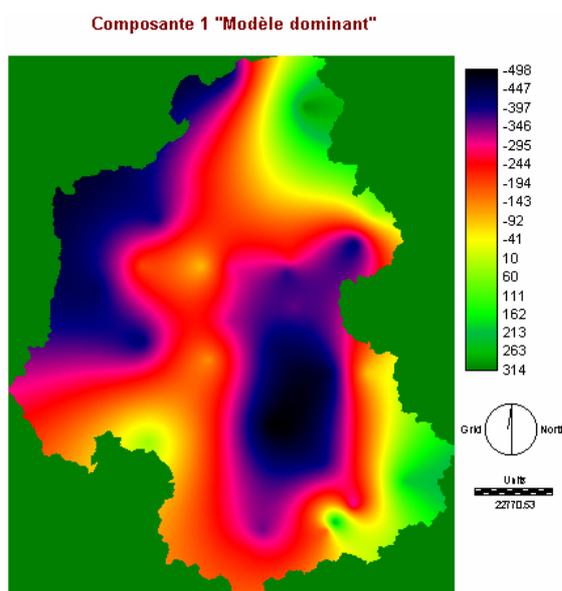


Figure 5-28 : Carte attachée à l'axe n° 1 de l'ACP spatiale des Températures

La direction sud-ouest / nord-est, est ici évidente mais elle n'a pas d'autre sens que celui de l'effet conjugué altitude latitude. La structure la plus intéressante concerne l'alternance entre les valeurs fortement négatives et les valeurs fortement positives que l'on constate dans le sens nord-ouest sud-est. Il est difficile d'interpréter cette structure. Les espaces concernés sont différents. L'un correspond à la zone de collines en piémont, l'autre concerne des massifs internes élevés. Comme cet axe montre l'opposition été/hiver, il est envisageable de considérer cette corrélation comme le résultat d'une action climatique qui s'exerce différemment selon la période mais qui, sur l'année, donne des structures équivalentes. Il est cependant risqué, en l'état, d'interpréter ces structures sur la seule base de l'interpolation et de cette ACP spatiale. Nous manquons d'informations pour aller plus avant dans l'interprétation.

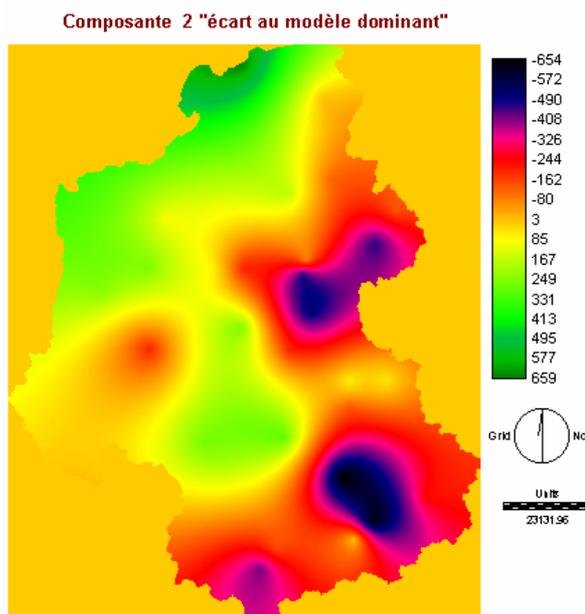


Figure 5-29 : Carte attachée à l'axe n° 2 de l'ACP spatiale des Températures

La figure 5-27 montre que les mois de mars et de novembre sont ceux qui possèdent les scores les plus importants par rapport à cet axe. La figure 5-29 représente un écart au modèle dominant qui se met en place pendant ces périodes. On remarque ici que c'est principalement la configuration locale du terrain qui détermine le modèle spatial de température. L'effet structurant de l'altitude est particulièrement présent sur cette carte ainsi que « l'insularité thermique » de certaines zones. C'est particulièrement le cas pour les environs d'Aussois et la vallée de Chamonix

L'étude de la seconde composante de l'ACP spatiale concerne les mois de transition climatique du printemps et de l'automne.

6 Analyse spatiale : Détermination des espaces de conflit économie/ environnement

La constitution de bibliothèques de cartes climatiques mensuelles par interpolation va nous permettre d'identifier les espaces de conflits potentiels entre l'économie du ski et le milieu naturel. L'idée que nous poursuivons pour cette mise en évidence est proche des concepts relatifs aux risques naturels, entre risque et aléa. Ces espaces de risques ne peuvent émerger que dans les lieux où, par comparaison, s'opposent nature et tourisme hivernal de masse. Dans les autres secteurs alpins, il ne peut s'agir que d'aléas dans le contexte de cette simulation. Nous avons suffisamment développé les mécanismes en œuvre à ce niveau dans notre seconde partie pour ne pas y revenir maintenant. Aussi, nous allons nous attacher maintenant à situer ces espaces par analyse. Deux points seront abordés pour ce travail.

Le premier concerne la mise en évidence de l'évolution de la limite basse de l'isotherme zéro tout au long de la saison d'hiver. Nous pourrons de cette façon dresser un panorama qualitatif des domaines skiables en fonction du changement climatique. Il sera possible de visualiser les domaines sujets à un risque

élevé de découverte neigeuse soit sur l'ensemble du site, soit sur les fronts de neige.

Le second point s'attachera à évaluer les effets spatiaux du changement climatique sur les grands types d'occupation du sol. Pour ce dernier point, nous verrons qu'il ne s'agit pas de proposer une nouvelle spatialisation de cette occupation mais plutôt de visualiser les espaces actuels sujets à une pression de changement forte. Sur ces derniers, les conditions habituelles de climat ne sont plus remplies. On peut donc formuler l'idée que l'occupation du sol (et par voie de conséquence, les espèces) habituelle rencontrée à ces endroits se trouvera en difficulté. Les espaces de conflits qui émergeront alors seront ceux qui se situent dans l'enveloppe du domaine skiable et qui sont connus comme des espaces à forte valeur en biodiversité. C'est généralement le cas pour les pelouses de l'étage subalpin.

Du point de vue technique, cette opération n'est pas la plus complexe, à condition de connaître les bases de l'algèbre.

6.1 Méthode d'analyse spatiale pour l'évolution de l'isotherme zéro mensuel.

Notre objectif est la mise en évidence des espaces où la température minimale moyenne

mensuelle soit égale à 0° . Bien entendu, cette température doit s'accompagner d'une probabilité de 100%. Le modèle d'analyse raster que nous avons développé est le suivant.

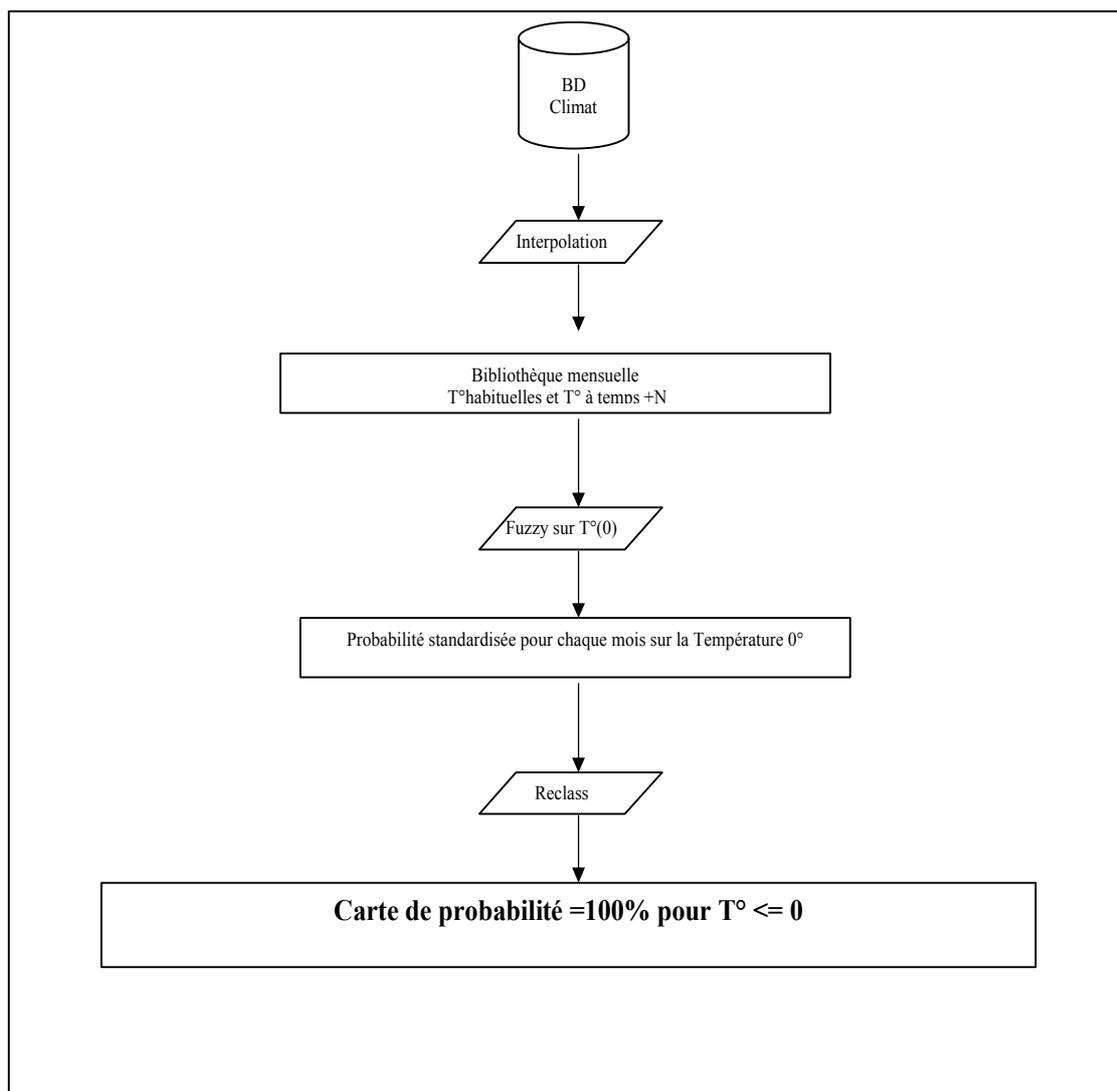


Figure 6-1 : Modèle d'analyse raster pour la détermination des zones de $T^{\circ} 0$

Les résultats de cette analyse mettent en évidence en premier lieu une limite technique. Celle-ci est liée à la structure de notre réseau de stations météorologiques et au souci de construire une estimation locale pour

l'interpolation. Dans certains secteurs particuliers comme la zone de Chamonix, où l'on conjugue, sur des faibles distances, d'importantes formes de reliefs avec des

stations basses (situées en fond de vallée), l'interpolation n'est plus pertinente

En effet, le meilleur ajustement possible ne peut pas rendre compte de l'effet d'une dénivellation importante sur des courtes distances quand les températures mesurées aux stations météorologiques sont élevées. Cette limite devient évidente quand on calcule la probabilité de température égale ou inférieure à zéro pour le mois de juin par exemple aux alentours du Mont Blanc alors que toutes les stations météorologiques proches du sommet (à vol d'oiseau) sont disposées en fond de vallée.

6.1.1 Résultats cartographiques : des situations à 15 ans

L'étude longitudinale des cartes montre bien évidemment une réduction des espaces soumis, à 100% de probabilité, à une température égale ou inférieure à zéro. La figure 6-2 donne pour chaque mois une mesure de la différence entre mois habituel et mois identique à +15 ans. Nous remarquons que deux mois, mai et octobre, perdent la totalité de ces espaces. D'autres mois, avril et novembre sont très érodés.

	différence entre habituel et T° + 15 ans	Surface habituelle	% de territoire
Janvier	34030.36616	1088848.328	3.125354127
Février	49719.24318	1088848.328	4.566223034
Mars	154292.3574	865254.8552	17.8320129
Avril	36628.27755	102186.7624	35.84444472
Mai	1428.96366	1428.96366	100
Juin	X	X	X
Juillet	X	X	X
Août	X	X	X
Septembre	X	X	X
Octobre	10343.93848	10343.93848	100
Novembre	226915.7325	490148.5226	46.29530071
Décembre	47024.41903	1051806.173	4.47082554

Figure 6-2 : Nombre d'ha où la température par mois est égale à zéro et pourcentage de terrain perdu sur 15 ans

Sur le plan spatial, cette érosion n'est pas uniforme. Pour décembre, janvier et février, elle s'exerce fortement en haute Savoie sur le massif du Chablais mais ne semble pas

toucher les autres massifs et les fond de vallées. Pour ces dernières zones, l'érosion s'exerce principalement en novembre et mars. C'est à dire au tout début et à la fin de l'hiver.

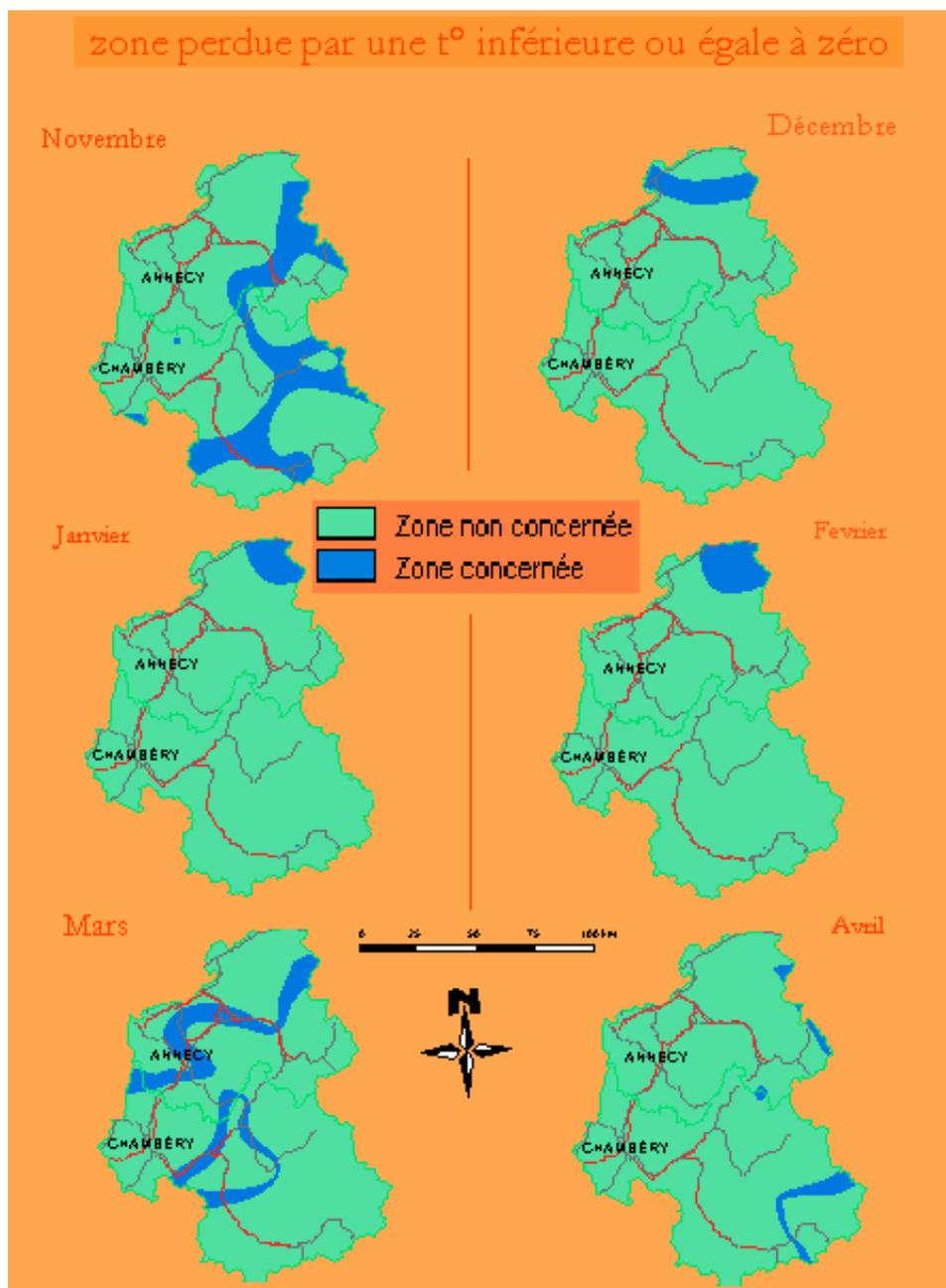


Figure 6-3 : Cartes des zones concernées par l'évolution de l'isotherme zéro en 2015

6.1.2 Etude comparée des domaines skiables dans un scénario à 15 ans

Il s'agit dans un premier temps de comprendre comment les domaines skiables s'organisent dans une situation thermique habituelle. Nous pourrons, par la suite comparer l'évolution de

cette organisation en fonction d'un scénario du changement climatique.

6.1.2.1 Organisation des domaines skiables en situation thermique 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 Haute Savoie¹⁴².

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 Chatel et Bellevaux suivent, avec une probabilité autour de 40%. La tranche suivante concerne Les Gets, Avoriaz, Morzine avec 55 à 65% de chances d'obtenir de la 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.

La carte pour le mois de décembre habituel est à ce titre assez représentative.

Fondamentalement, l'enjeu principal pour les domaines skiables se situe en début et en fin de saison. Dans le cœur de la saison (janvier, février), le risque d'absence de neige est assez faible et cela correspond à des situations climatiques particulières qui ne sont pas envisagées ici.

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%) d'obtenir de la neige 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 mitiger un peu ce résultat. Compte tenu de leur développement en altitude, cette situation n'est probablement pas équivalente partout sur les sites et concerne plutôt les parties basses de ces domaines.

¹⁴² Les domaines représentés dans l'étude font partie des cent premiers domaines de France en Chiffre d'affaires.

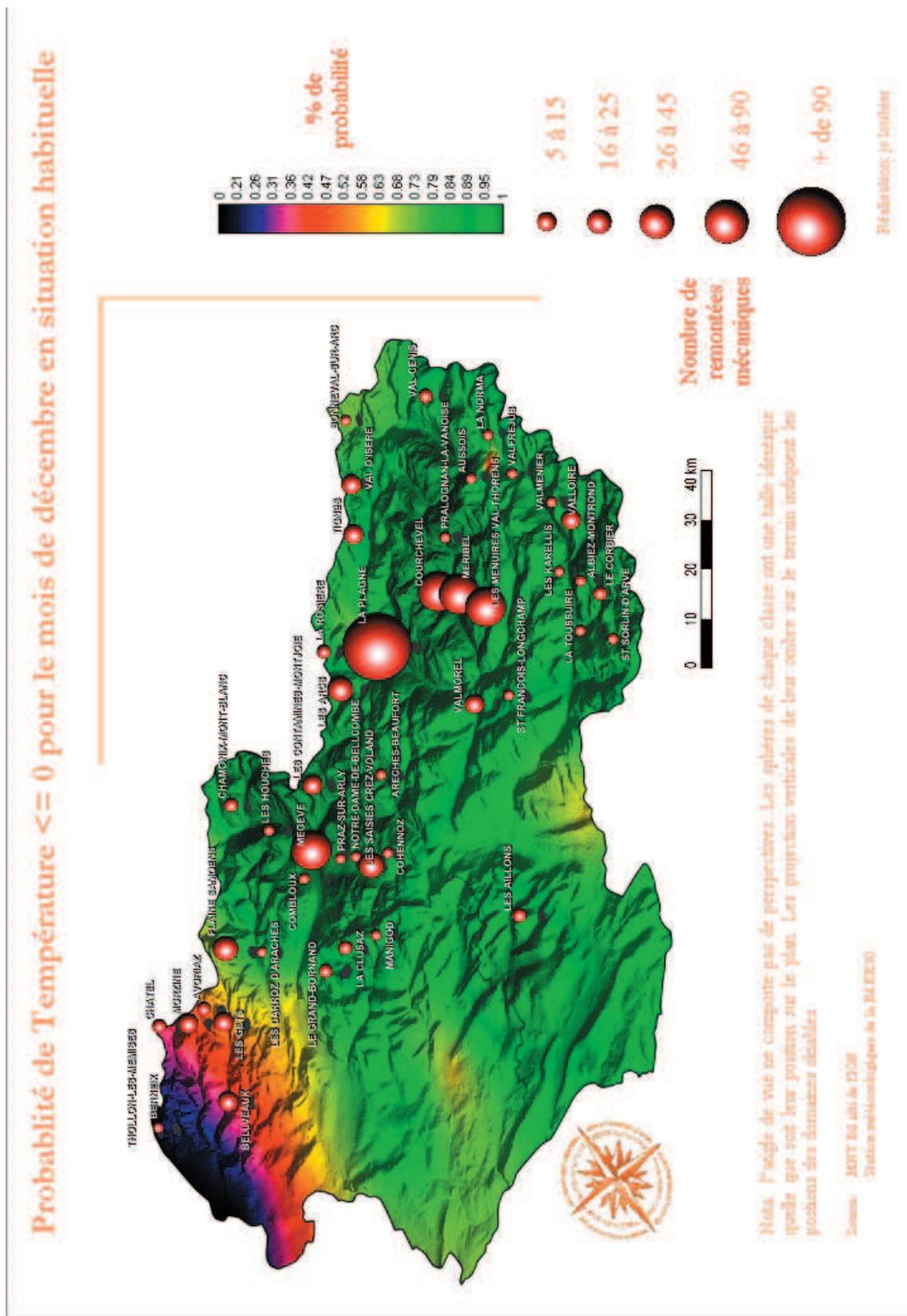


Figure 6-4 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute-Savoie

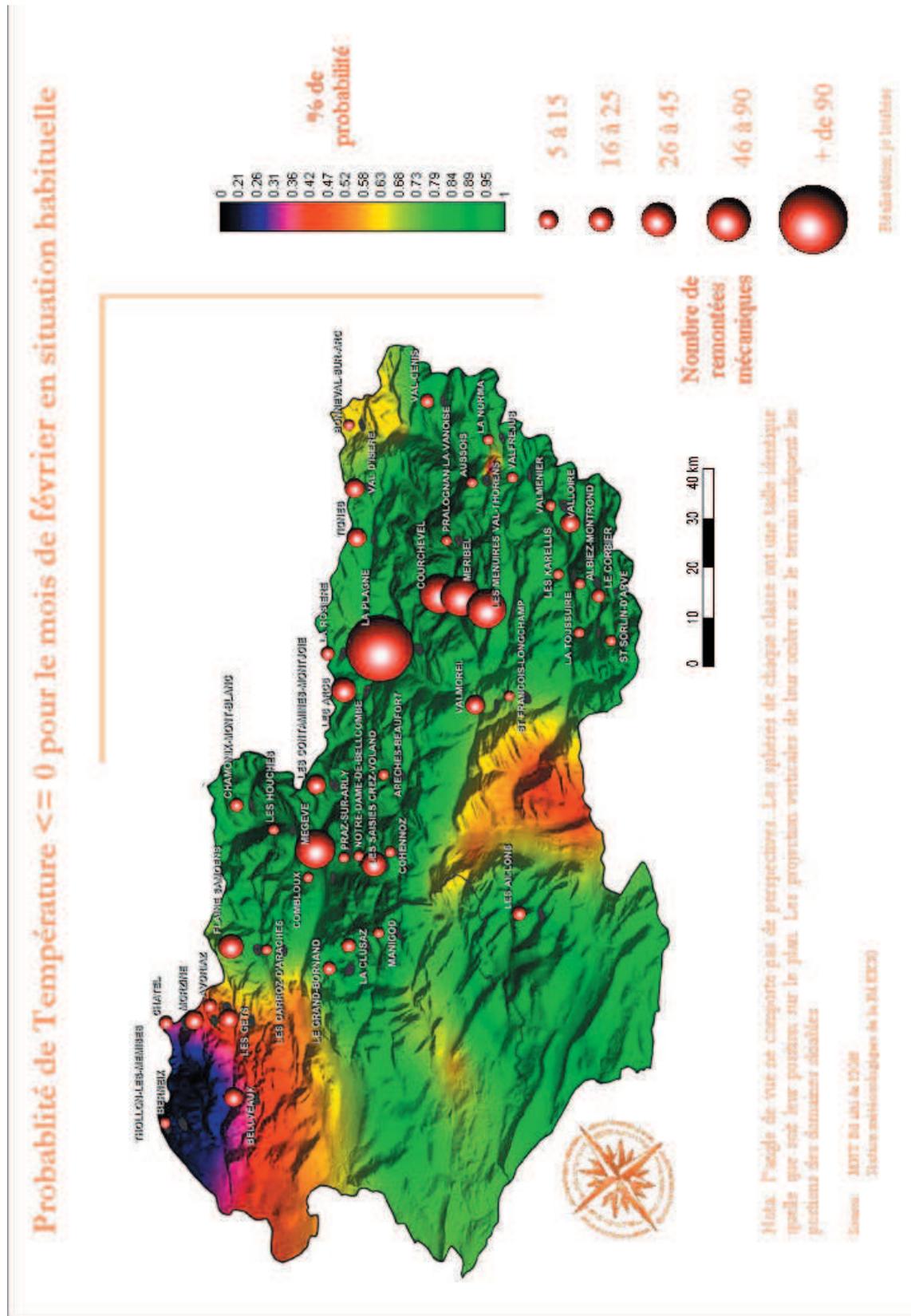


Figure 6-5 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute-Savoie (février)

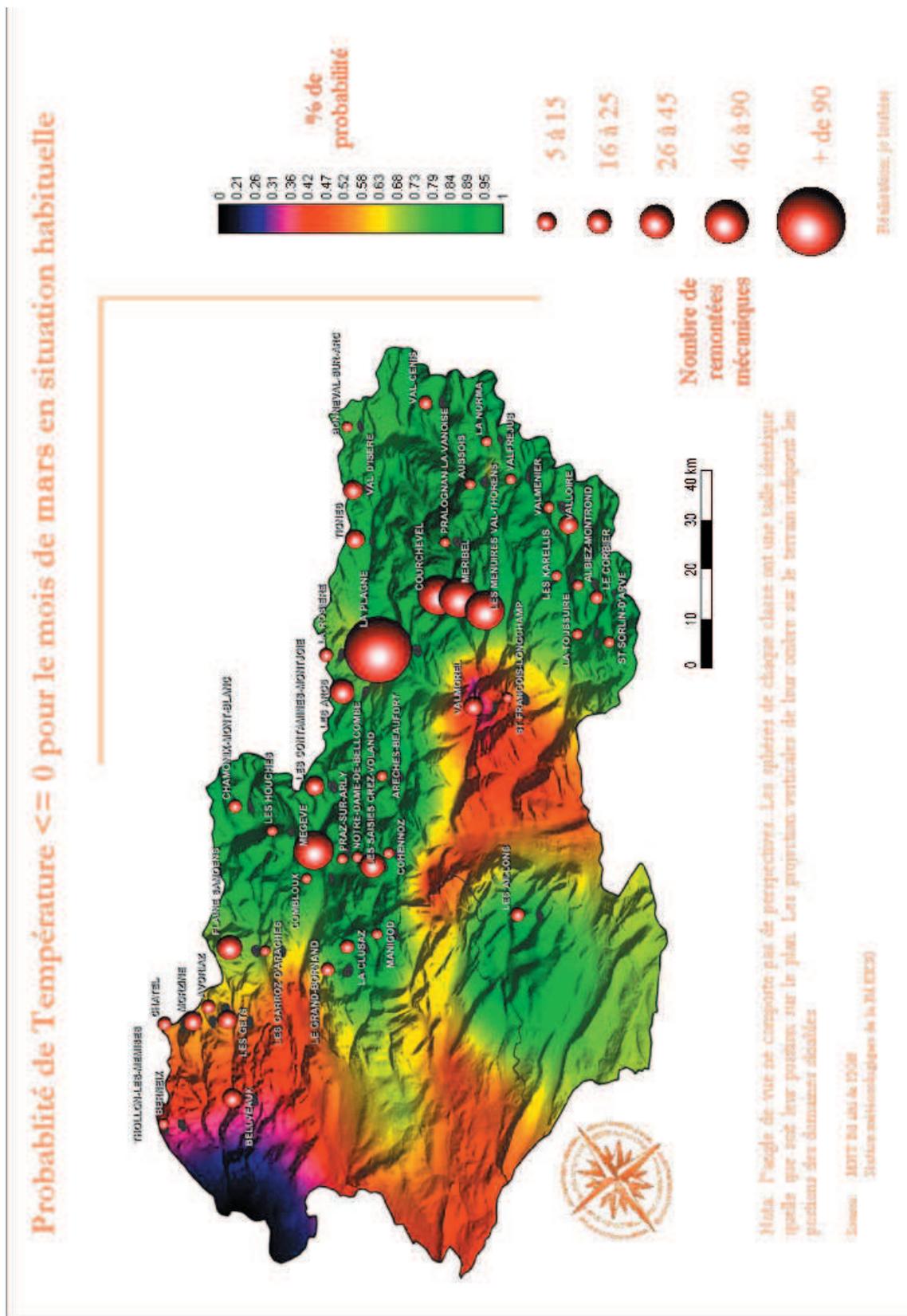


Figure 6-6 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute-Savoie (mars)

6.1.2.2 Simulation et tendance dans le cadre duscénario A1b

L'analyse de tendance que nous proposons maintenant s'appuie sur le scénario A1b avec une perspective de stabilisation du CO₂ atmosphérique à 550 ppm en 2150. Les conclusions que nous développons ci-dessous ne concernent donc que ce cas de figure. Le temps nous a manqué pour proposer d'autres simulations.

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, concernaient les zones de piémont et de préalpes. Pour décembre, l'impact pour les domaines skiables est faible.

La réduction de probabilité la plus importante concerne le petit domaine de Bonneval sur Arc avec une réduction de 85% à 65% de chance de recevoir de la neige en cas de précipitation. Les autres domaines skiables restent dans des situations qu'ils rencontrent habituellement malgré la réduction des probabilités. L'étude longitudinale des probabilités dans le cœur de saison (janvier février) met en évidence la faiblesse potentielle de domaines comme Thollon les Maimises 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 chance. C'est le cas de Morzine, Bellevaux et Châtel. Dans un autre registre, 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.

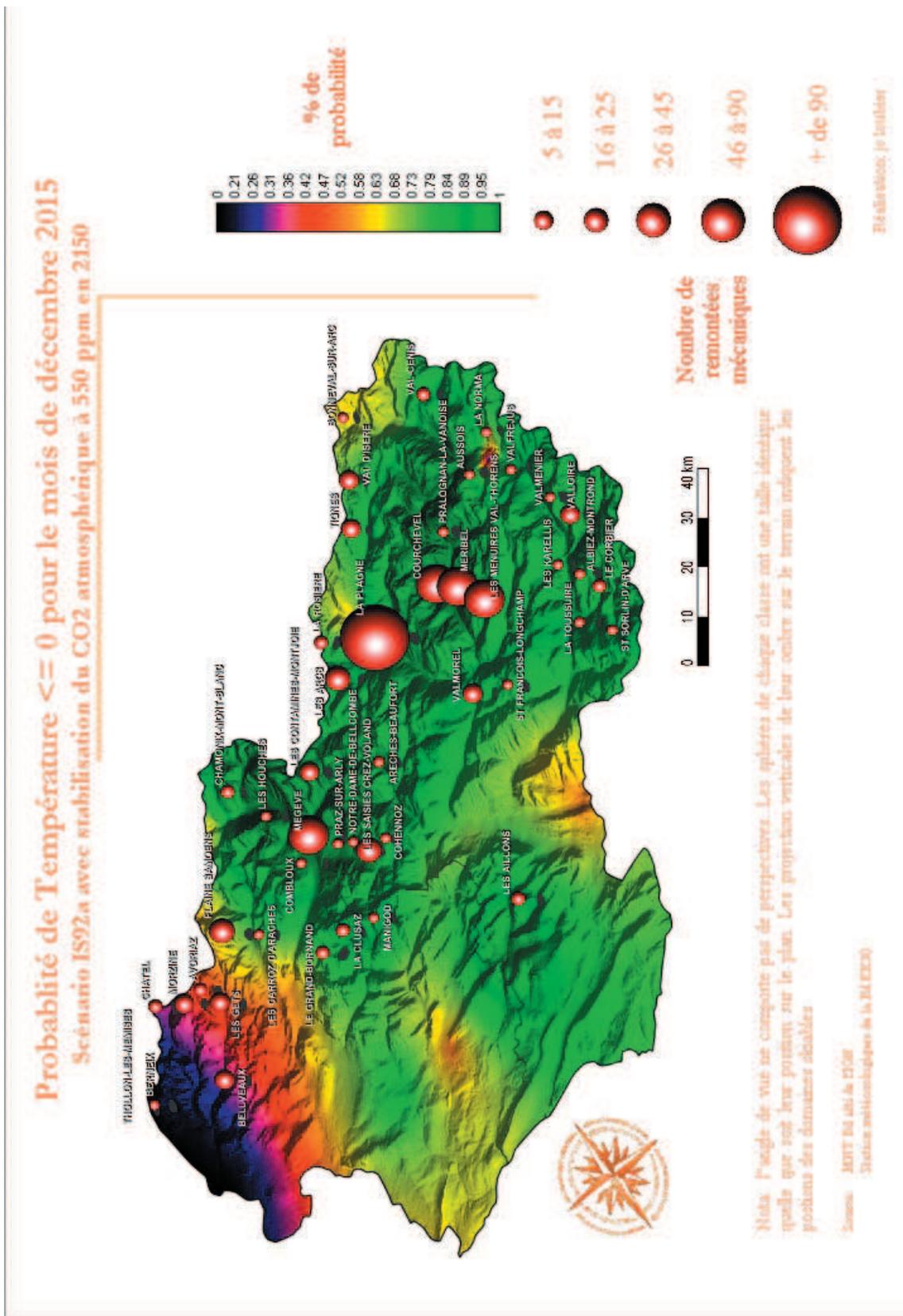


Figure 6-7 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute-Savoie (décembre)

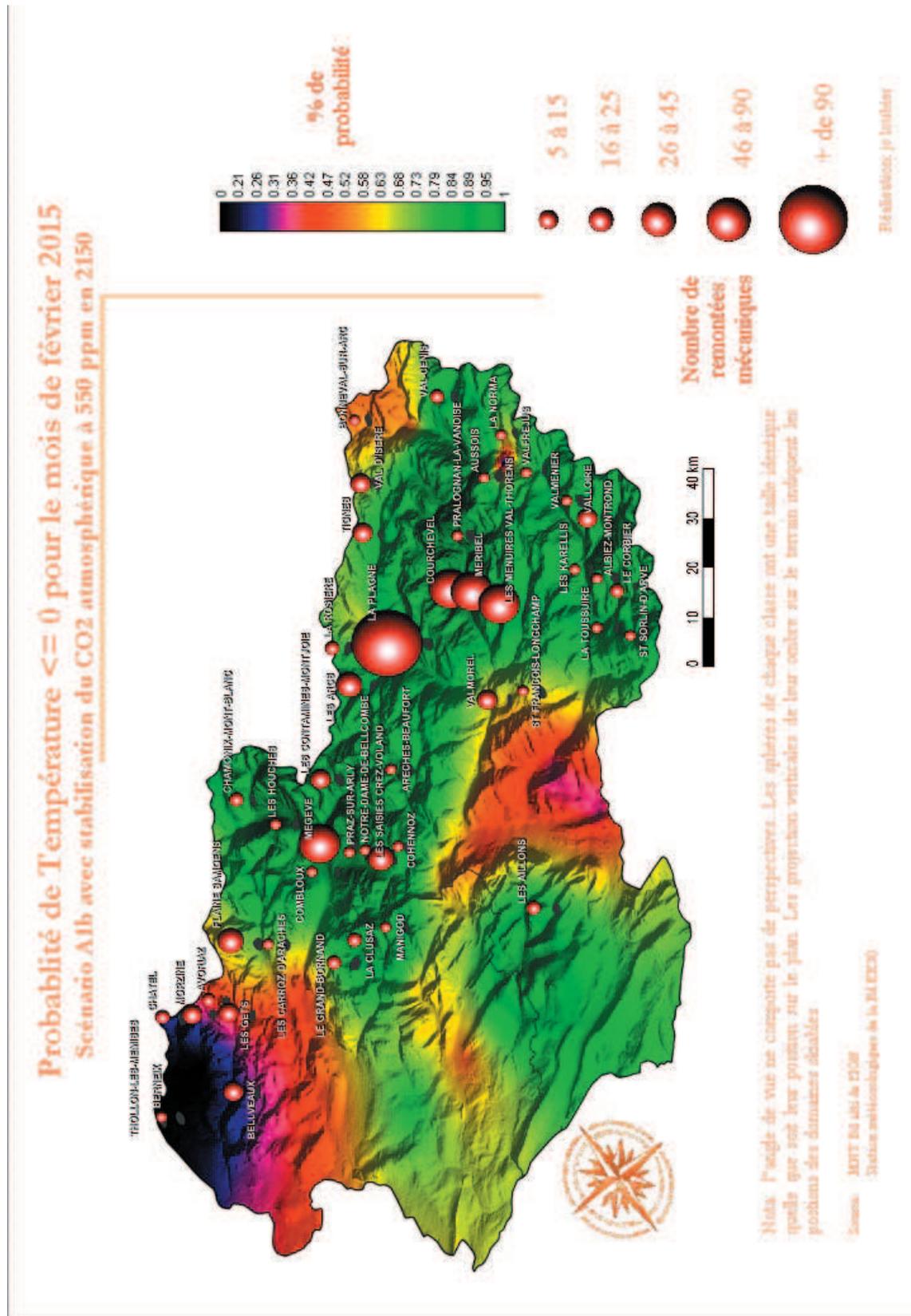


Figure 6-8 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute-Savoie (février)

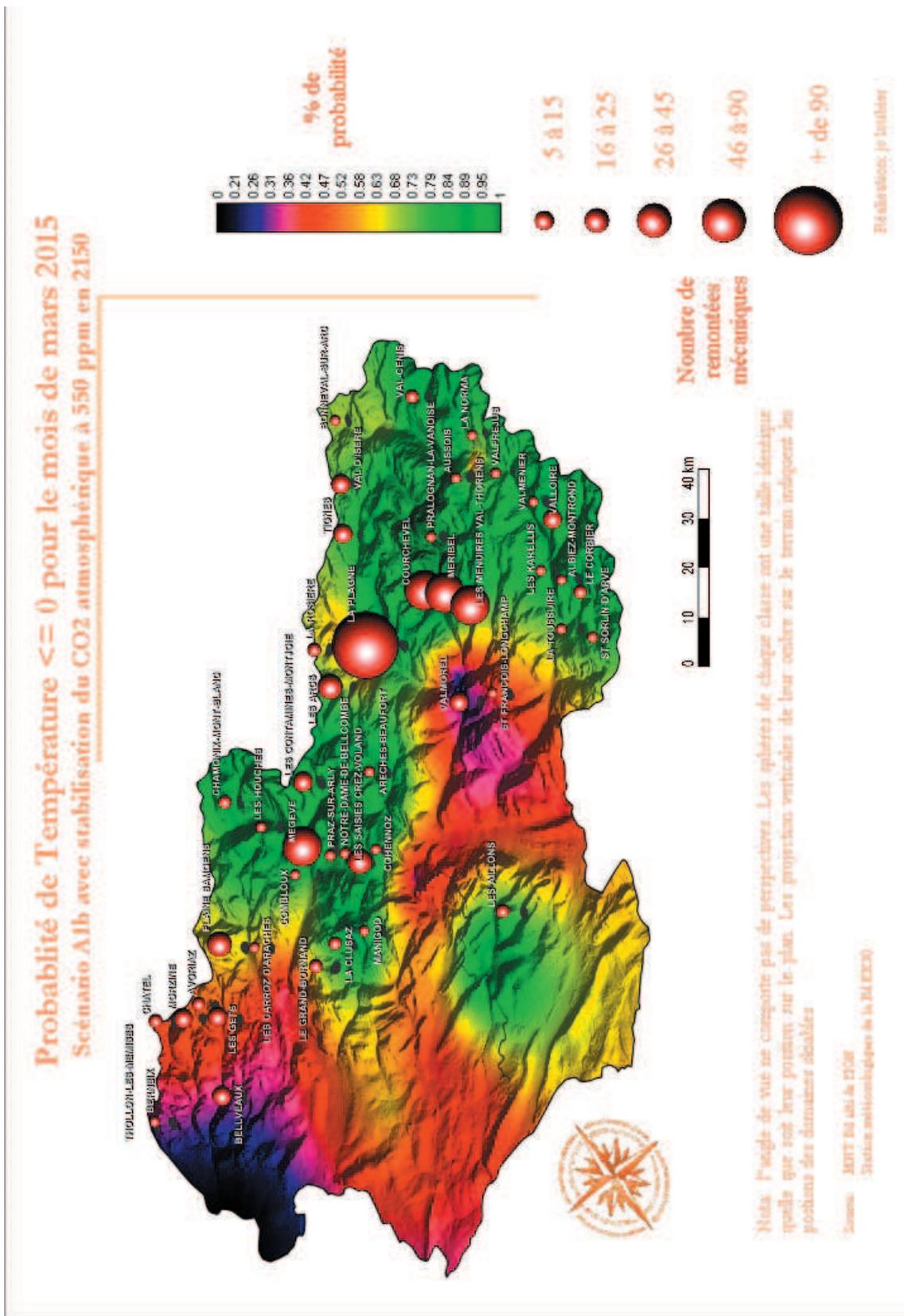


Figure 6-9 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute-Savoie (mars)

La fin de saison (mars avril) montre que beaucoup de domaines skiables (Valmorel, Saint François Lonchamp, Les Gets, Morzine, Châtel, Bellevaux) devront recourir aux systèmes d'enneigement artificiel à partir de mars pour maintenir leur manteau neigeux. En revanche, la fin de saison est moins agressive que le début pour les domaines de Thollon et Bernex. Dans le cadre de cette simulation, nous voyons qu'un espace est particulièrement en difficulté. Il s'agit du Chablais. Les domaines skiables de Thollon, Bernex et dans une moindre mesure Bellevaux ne sont plus assurés de compter sur des températures suffisamment basses pour garantir la saison d'hiver à l'horizon de 2015. Dans une simulation de type scénario A1b, ces domaines devraient, dès maintenant, envisager un déplacement de leur activité vers la saison estivale.

Nous ne sommes pas en mesure ici de prévoir une fin du ski dans ces domaines et cette analyse ne doit pas conduire le lecteur vers des conclusions hâtives. Il ne s'agit que d'une tendance liée à une probabilité d'atteindre une température favorable à la survenue de neige en cas de précipitations. Cette probabilité n'est pas égale à zéro, donc il peut tout à fait tomber de la neige sur ces domaines skiables dans le contexte d'expérimentation que nous avons développé. Dans un autre registre, la variabilité météorologique peut contredire cette tendance pour chacun des hivers à venir jusqu'en 2015. Les résultats que nous proposons ne sont donc, pour l'instant, que des mesures assez probables dans un contexte déterminé par le choix du scénario A1b pour cette simulation.

Pour finir cette analyse globale, les domaines de moyenne montagne (la Clusaz, Les Aillons, Manigaux, les Gets) conservent un potentiel presque intact en matière de saison d'hiver. La Tarentaise et ses grands domaines devront sans doute recourir de façon plus massive à la neige de culture en fin de saison.

6.2 Occupation du sol : simulation pour les micros écosystèmes

Nous abordons ici le volet consacré à l'analyse des effets du changement climatique sur les micro-écosystèmes. Ces derniers correspondent au niveau spatial décrit par la base de données d'occupation du sol Corine Land Cover de l'IFEN. C'est véritablement dans ces pages que nous mettrons en évidence les espaces de conflits potentiels entre économie du ski et gestion de la biodiversité. Pour parvenir à notre objectif, nous nous appuyons sur la théorie des facteurs limitants et de la niche écologique dont nous avons expliqué les fondements en première partie. Notre simulation se borne, ici, à étudier un seul type d'occupation du sol (les pelouses et prairie naturelles de l'étage subalpin) mais cette méthode est, bien entendu, reproductible. Le temps nous a manqué pour conduire la simulation pour d'autres types d'occupation du sol. Le choix de faire porter l'analyse sur les pelouses et prairies naturelles de l'étage subalpin n'est cependant pas innocent. Dans le contexte du changement climatique, les enjeux principaux concernant la biodiversité se concentrent sur cet étage de végétation et ce type d'occupation du sol.

La démarche d'analyse raster que nous effectuons est expliquée par le diagramme suivant :

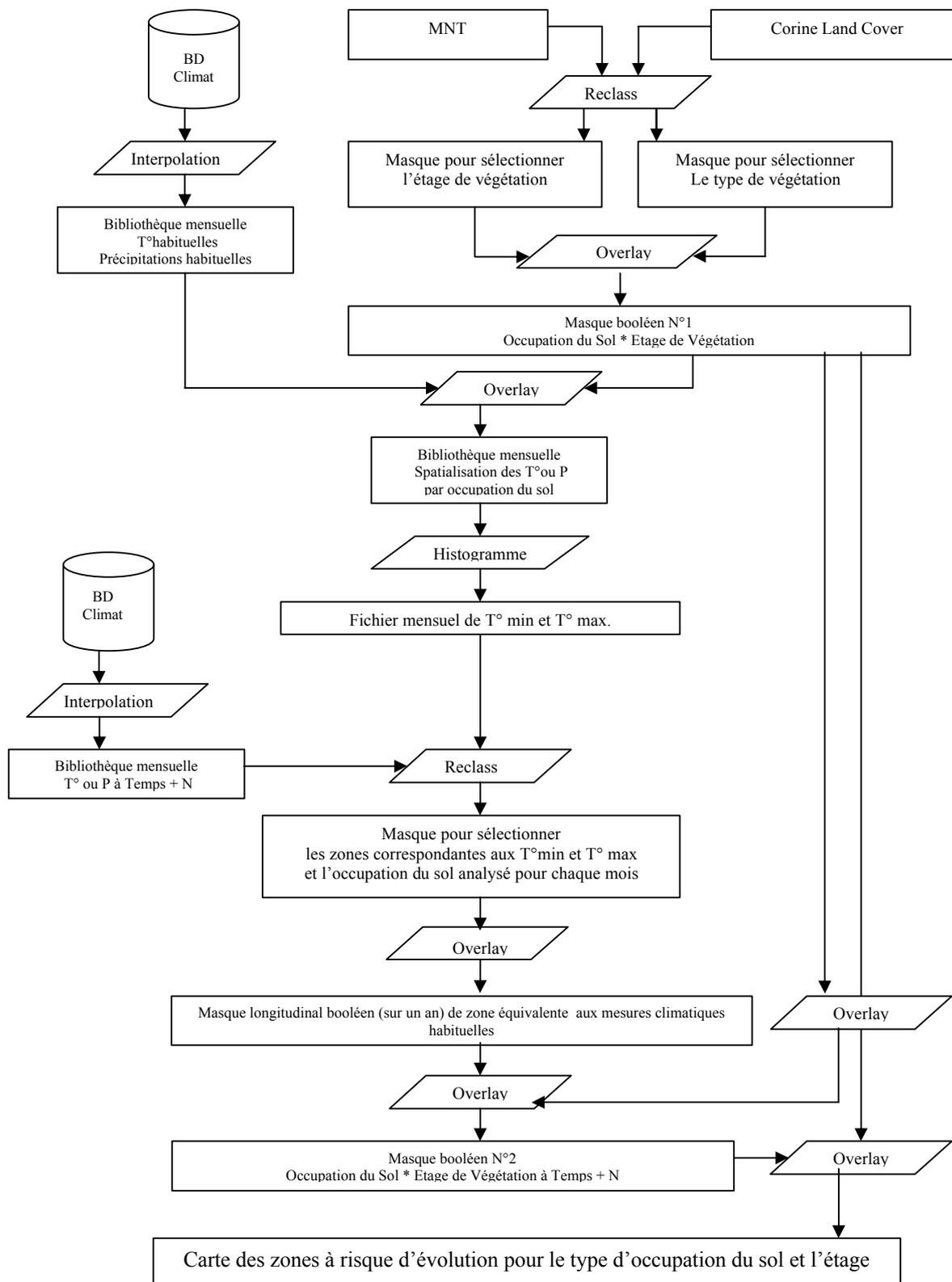


Figure 6-10: Modèle d'analyse Raster pour la détermination des écosystèmes soumis à une évolution des facteurs température et précipitation

Le premier niveau d'analyse correspond au facteur température défini dans le même contexte que celui des domaines skiables.

6.2.1 Mise en évidence des zones à risque élevé pour les pelouses et prairies subalpines en fonction du facteur température

La figure 6-11 ci-dessous montre que deux secteurs de Savoie et Haute Savoie sont concernés par un risque d'évolution potentielle de la pelouse subalpine : le Chablais et la Tarentaise. La mise en évidence de ces espaces repose sur une idée simple. Il s'agit de déterminer les espaces où les conditions habituelles de températures mensuelles ne sont plus remplies. Compte tenu du comportement de ce facteur t° dans le temps et l'espace, nous pouvons penser que les risques d'impact sont plus importants pour le Chablais que pour la Tarentaise car les différences de condition climatiques se répètent sur des périodes plus grandes (la quasi totalité des mois ne remplissent plus les conditions habituelles en Chablais).

Pour la Tarentaise, le changement s'exprime de façon forte au printemps et en été (qui sont des périodes stratégiques pour la végétation montagnarde) mais, les autres mois continuent de remplir les conditions de température habituelles.

La mise en évidence de ces espaces n'indique pas forcément que les pelouses visées seront dégradées en 2015. Ces résultats montrent seulement des zones qui devraient faire l'objet d'une surveillance particulière afin de détecter des effets éventuels du changement climatique sur ce type d'occupation du sol. Dans le contexte de simulation que nous avons choisi (toutes choses égales par ailleurs et un scénario A1b), ces zones de pelouses représentent la plus forte probabilité d'impact pour le facteur température.

Certaines de ces zones sont situées dans l'enveloppe de domaines skiables. En superposant les pelouses à risques avec les infrastructures de ces domaines, nous pouvons mettre en évidence des espaces de conflits d'intérêts potentiels élevés. Le contexte de ces conflits s'exprime sur l'opposition entre travaux de pistes et reverdissement pour les domaines et soucis d'accompagnement des milieux naturels pour la préservation de la biodiversité. Ce dernier point est une obligation contractuelle de la France, signataire de la convention de Rio. Le mouvement écologiste ne manquera pas d'exploiter ce point si des concertations entre interlocuteurs ne sont pas engagées et si leur point de vue n'est pas pris sérieusement en compte. Simul-Image serait employé ici à bon escient.

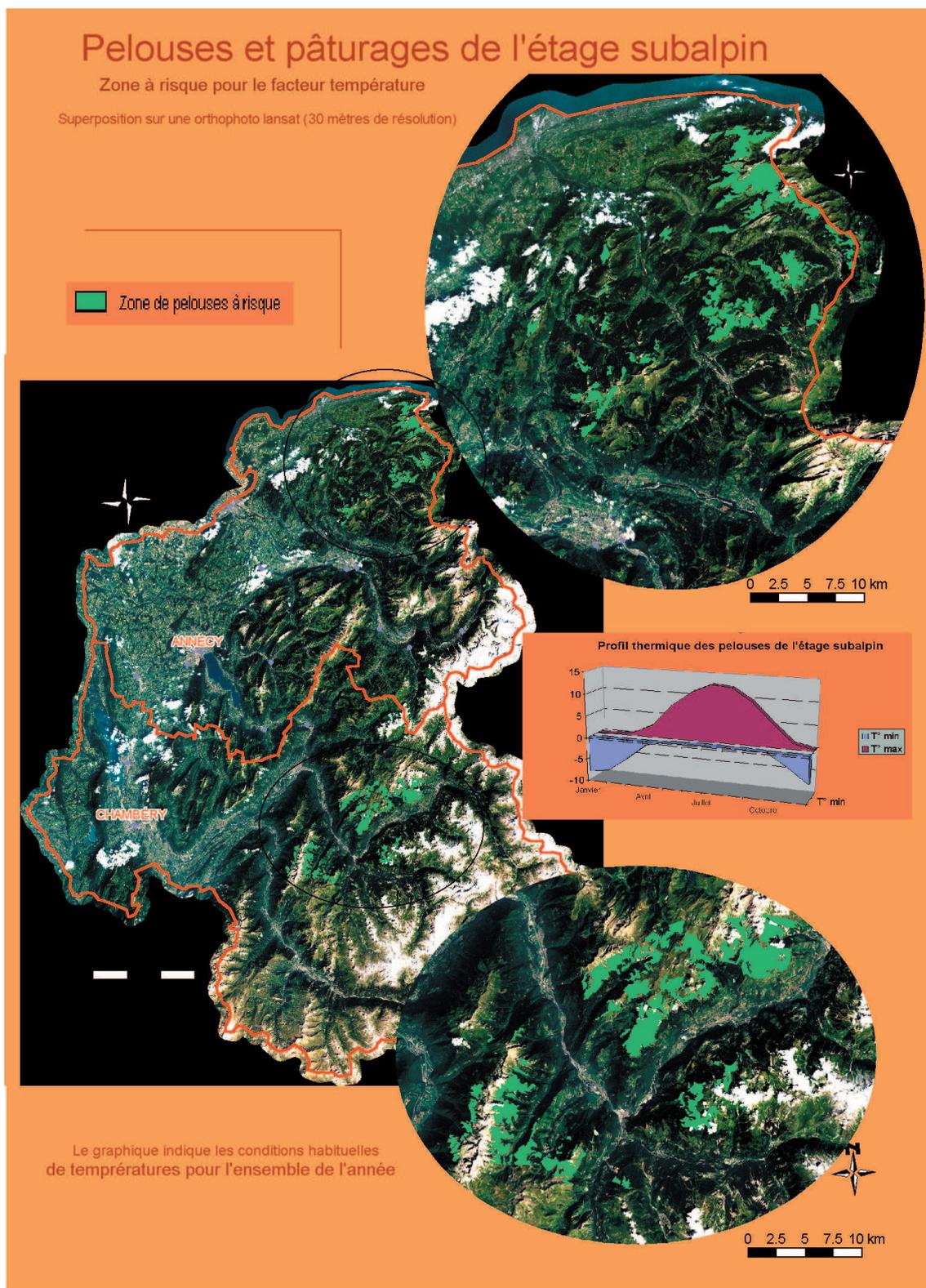


Figure 6-11 : Carte des zones de pelouse de l'étage subalpin soumises à une évolution du facteur température

6.2.2 Mise en évidence des zones à risque élevé pour la pelouse et prairie subalpine en fonction du facteur précipitation

Nous avons conduit la même analyse avec le facteur précipitation que pour le cas des températures. La carte ci-dessous (figure 6-11) montre que les zones de prairies et pâturages naturels de l'étage subalpin concernés par une évolution de ce facteur sont bien plus importantes que pour le cas de la

température. Les deux Savoies sont coupées en deux. Toute la Maurienne serait largement touchée par l'évolution de ce facteur ainsi qu'une large zone autour du lac d'Annecy, à cheval sur les massifs des Bauges, des Bornes et des Aravis. En revanche, le Chablais, fortement desservi en ce qui concerne le facteur température ne semble pas atteint. C'est le cas également des pelouses du massif du Beaufortin, qui ne sont pas touchées.

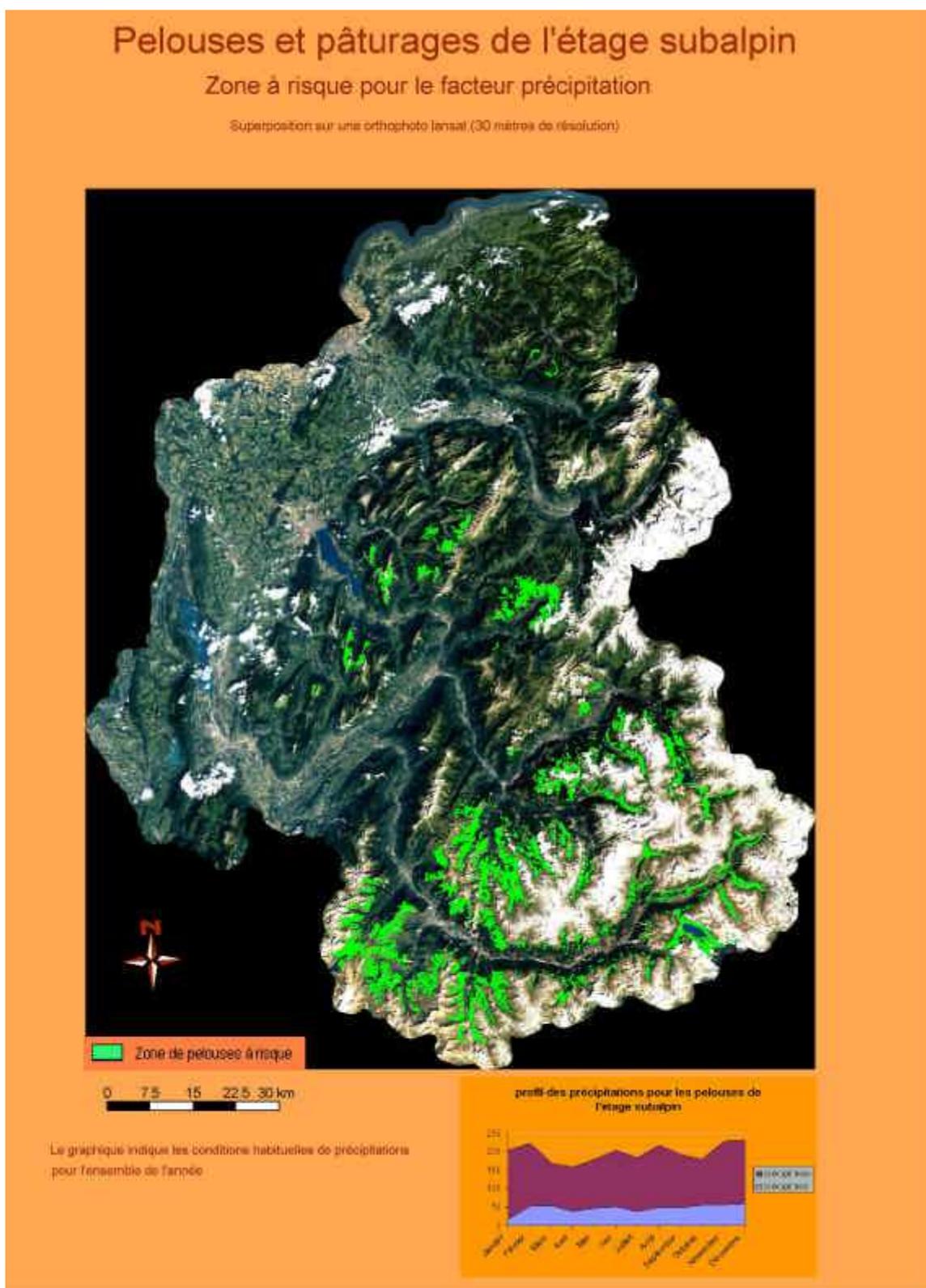


Figure 6-12 : Carte des zones de pelouse de l'étage subalpin soumises à une évolution du facteur précipitation

6.2.3 Mise en évidence des zones à risques conjugués : températures et précipitations

Nous avons identifié des espaces où les pelouses et prairies naturelles de l'étage subalpin étaient mises hors conditions habituelles sur le plan des températures et des précipitations. Nous pouvons raisonnablement avancer que, si ces conditions évoluent, il est assez probable que ce type d'écosystème évoluera lui aussi. Eventuellement, il sera remplacé (à terme) par un autre type d'écosystème comme par exemple la forêt. La vitesse de réaction de ces écosystèmes est liée à la force avec laquelle s'exprime la modification des facteurs précipitation et température, par rapport à la rapidité de survenue et en écart aux conditions habituelles. Nous avons pensé qu'il était illusoire de chercher à proposer une mesure spatiale de cette rapidité car le problème est bien plus complexe qu'il n'y paraît, du simple fait que notre stratégie est fortement attachée à une dépendance sensitive des conditions initiales.

Cette dépendance se retrouve au niveau du calibrage du modèle de circulation générale, ainsi qu'au niveau des méthodes d'interpolations que nous avons choisies.

En revanche, il est possible, par une simple addition de cartes, de déterminer trois zones de potentiel d'évolution des pelouses de l'étage subalpin. L'idée que nous poursuivons ici est simple. Quand les deux facteurs, températures et précipitations, sont susceptibles d'évoluer sur un même espace, le potentiel d'impact sur les pelouses situées sur cet espace est fort. A l'inverse, quand aucun des deux facteurs ne se trouve modifié par rapport à ses conditions habituelles, le potentiel d'impact par évolution des facteurs climatiques sur les pelouses est faible.

La carte ci-dessous est le résultat de ce traitement. Nous remarquons immédiatement que, seule une zone située en Tarentaise, autour de Moutiers, correspond à la situation de potentiel d'impact le plus fort.

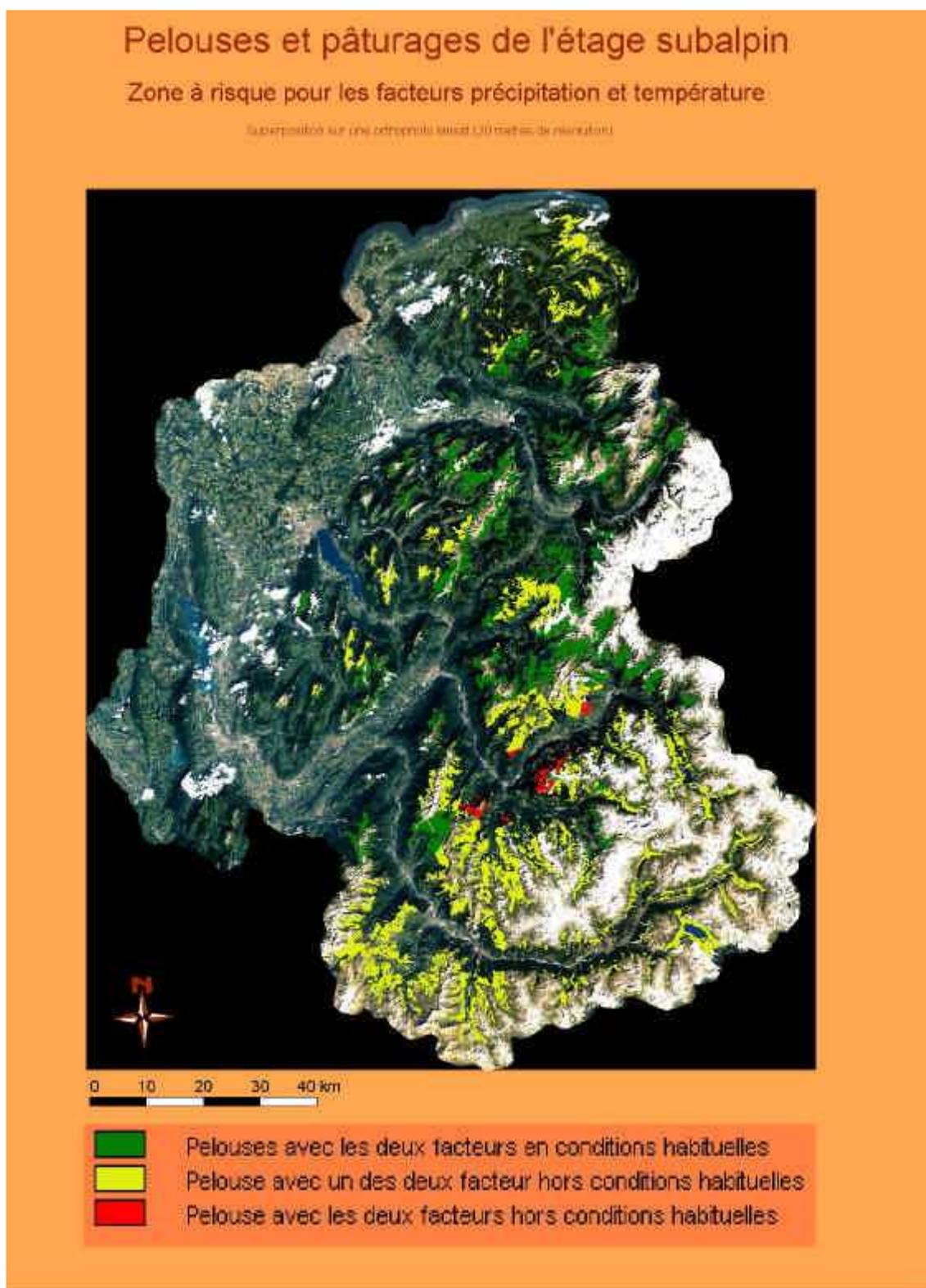


Figure 6-13 : Zones de potentiel d'évolution des pelouses de l'étage subalpin en fonction de l'action simultanée des deux facteurs température et précipitation

Les zones à risque moyen sont concentrées dans le Chablais, en Maurienne, et dans certains secteurs des massifs préalpins.

6.3 Mise en œuvre de l'heuristique environnementale en réalité virtuelle.

Nous abordons maintenant la dernière partie de notre travail. Il s'agit de mettre en œuvre l'idée d'heuristique visuelle dans l'environnement de réalité virtuelle. L'objectif est de construire une scène interactive, en réalité virtuelle, dans le but de faire mieux comprendre les enjeux aux différents acteurs du territoire. Nous mettrons en œuvre ici les différents concepts que nous avons définis en partie II pour la construction, le questionnement et la simulation.

Le premier de ces concepts concerne la définition des objets spatiaux élémentaires pour le projet d'aide à la concertation (les récifs de consensus)¹⁴³. Compte tenu de l'échelle globale de visualisation que nous envisageons, autour du 500 000ème, trois objets sont suffisants pour modéliser les domaines skiables : les remontées mécaniques, les bâtis des fronts de neige, les pistes. Ces trois objets forment des récifs de consensus. Ils sont perçus comme identiques quel que soit le point de vue de l'acteur du territoire, que ce dernier soit écologiste ou gestionnaire du domaine. Le volet « milieu naturel » sera entièrement géré par les différents fonds raster qui peuvent venir draper

le modèle numérique d'altitude. Les écosystèmes mis en évidence dans notre simulation seront donc inertes. Ils n'auront pas d'autre vocation que celle d'être visualisé par-dessous les objets 3D (Bâtis, remontées mécaniques) et les objets 2D (pistes) qui caractérisent les domaines dans la scène. Comme l'analyse du potentiel d'évolution de ces écosystèmes est conduite dans le SIG raster et que l'échelle choisie pour la simulation est assez importante, faire apparaître des objets 3D tels que des arbres dans la scène n'aurait fait qu'alourdir celle-ci sans apporter de valeur heuristique supplémentaire. En effet, les espaces de conflits potentiels sont immédiatement visibles en jouant sur la capacité de changement rapide de l'image drapée sur le modèle numérique de terrain. Par ailleurs, la simulation que nous avons choisi de mener concerne des écosystèmes herbacés. Nous ignorons la structure de ces derniers sur le plan de la diversité spécifique. Il n'était donc pas nécessaire d'en faire des objets vectoriels dans la base du SIG vecteur, car aucun attribut n'est disponible pour une éventuelle analyse par requête et topologie. Il convient de préciser que, dans des conditions réelles, ces objets doivent exister au niveau vectoriel afin d'équilibrer le potentiel d'action de chaque acteur sur tous les objets. Dans le cas que nous présentons, seuls les objets relatifs aux domaines skiables sont dynamiques, en création et destruction. Le dialogue et la redéfinition spatiale du territoire ne peuvent donc intervenir que sur ces derniers, ce qui crée un déséquilibre entre les acteurs dans leur capacité d'intervention dans la scène.

¹⁴³ Voir la partie II

Enfin, le dernier objet de consensus correspond au modèle numérique de terrain, ici la base de données Alti de l'IGN au pas de 50 mètres.

Le second point que nous avons développé dans notre travail, concerne justement ce principe de création/destruction, fondamental dans notre idée d'heuristique visuelle. Tout se passe ici au niveau de la base de données objet et de la configuration d'environnements spécifiques d'éclairage du terrain selon les points de vue des acteurs du territoire. Ces éclairages sont simplement des configurations de cartes thématiques prêtes à être drapées

dans l'environnement de réalité virtuelle, par exemple pour chaque mois, les zones où il est certain d'obtenir de la neige en cas de précipitation couplée à l'emprise des domaines (bâties des fronts de neige, remontées mécaniques et pistes).

Pour la base de donnée objet requise dans notre projet (modèle logique), le caractère orienté objet du SIG GéoConcept permettra de construire la base de données en respectant les formalismes que nous avons spécifiés en seconde partie de la thèse. GéoConcept permet de structurer la donnée en fonction des principes de hiérarchie, classe et héritage en utilisant assistant appelé « configurateur ». (Figure 6-14)

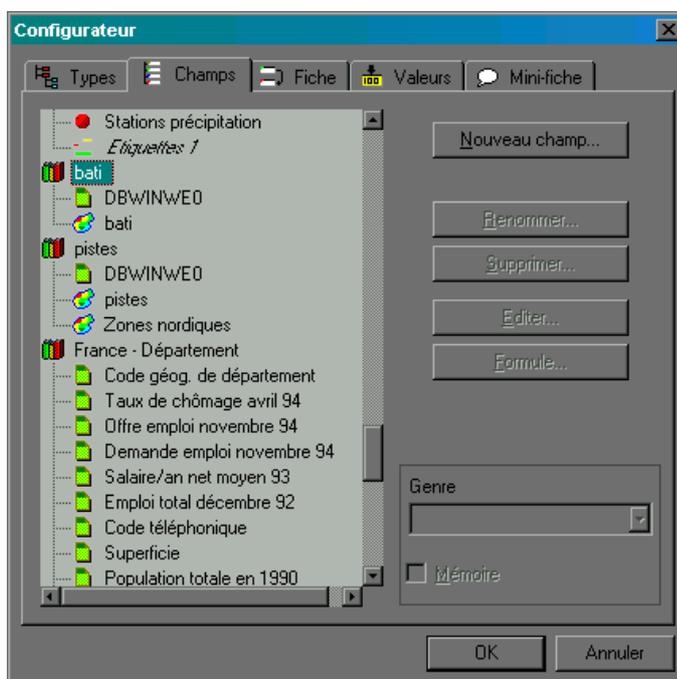


Figure 6-14 : Configurateur orienté objet de GéoConcept

Il existe une limite au modèle physique prêt à la simulation. Cette limite concerne la donnée

intégrée dans la base qui n'est pas exhaustive. Pour certains domaines, nous ne sommes en

possession que des axes de remontées mécaniques en 2D (X et Y). Pour d'autres (et notamment ceux de Tarentaise), nous possédons les axes en 3D (X, Y et Z), les pylônes, les pistes et les bâtiments des fronts de neige.

Ce manque d'exhaustivité spatiale est la conséquence d'un constat simple. Il n'existe pas, à ce jour, d'atlas des domaines skiables alpins. Il est à craindre que ce manque ne soit pas près d'être comblé car le coût de réalisation d'un tel atlas est considérable. De surcroît, il nécessiterait une entente entre des partenaires autrichiens, suisses, italiens, français et probablement slovaques. Enfin, les domaines skiables eux-mêmes sont pour la plupart très faiblement équipés en informations géographiques, ce qui rend délicat la détermination de l'emprise au sol de leurs pistes.

Malgré ces limites, une fois que les opérations de structuration du modèle physique ont été réalisées, l'environnement de simulation est opérationnel.

6.3.1 Mise en évidence des espaces dans l'environnement de réalité virtuelle

La détermination des enjeux entre acteurs du territoire, qu'ils soient gestionnaires de domaine skiable ou intéressés à la protection de la nature, est facilitée par l'environnement visuel proposé par le moteur VirtualGéo. L'interaction avec la base de données du SIG, c'est à dire la capacité de création/destruction d'objets avec une répercussion immédiate dans la scène autorise une mise en œuvre réelle de notre idée de concertation par approche heuristique visuelle.

L'aménageur du domaine skiable peut interroger la bibliothèque temporelle et visualiser les effets du changement pour un mois donné dans l'environnement 3D (Figures 6-15 et 6-16). Il peut donc mieux visualiser les conséquences spatiales du changement sur son domaine pour des périodes particulières comme le début ou la fin de saison. L'exemple ci-dessous montre une scène de simulation regroupant la zone habituelle du zéro degré et moins pour le mois de mars autour des trois vallées (Courchevel, Méribel Alpina et Méribel les Allues). La zone en bleu correspond aux secteurs où la probabilité d'obtenir de la neige en cas de précipitation est égale à 100% (hors variabilité naturelle de la météorologie)

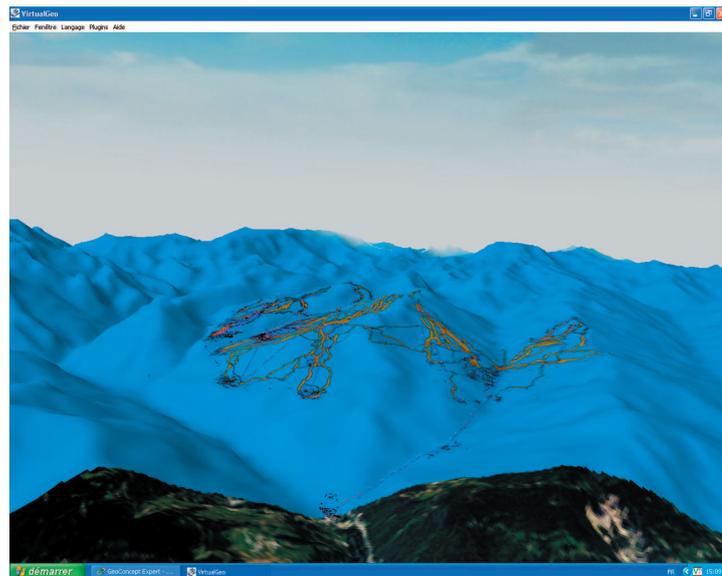


Figure 6-15 : Scène 3D de l'espace des trois vallées et de la zone de probabilité de 100% de potentiel neigeux pour le mois de mars actuel.

Restitution par VirtualGéo : Durée de création : 15 secondes avec extrusion des lignes de remontées mécaniques et des bâtis du front de neige

La scène suivante montre la situation possible en mars 2015 à partir du même angle de vue. La remontée de la zone en bleu est manifeste. Les décideurs (élus et gestionnaires des domaines) peuvent visualiser l'enjeu lié au raccordement entre le fond de la vallée et le front de neige pour la fin de saison. En revanche, les domaines eux-mêmes ne souffrent pas et conservent une certaine sécurité en matière de potentiel neigeux.

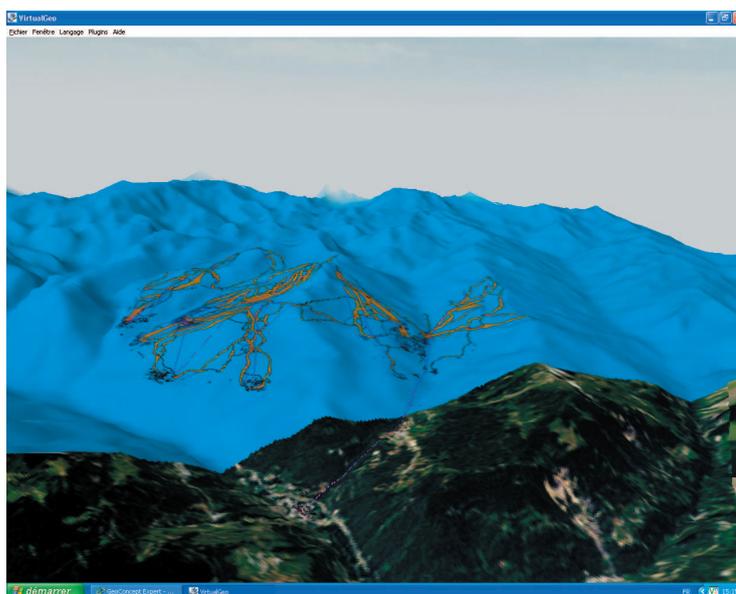


Figure 6-16 : Scène 3D de l'espace des trois vallées et de la zone de probabilité de 100% de potentiel neigeux pour le mois de mars 2015 en scénario A1b.

Restitution par VirtualGéo : Durée de création : 15 secondes avec extrusion des lignes de remontées mécaniques et des bâtis du front de neige

Ces deux images sont représentatives de notre idée d'aide à la concertation par heuristique visuelle. Elles développent un intérêt pédagogique immédiat et offrent aux acteurs locaux qui connaissent le terrain, un univers d'échange, de discussion et de prise de conscience des enjeux de chacun. Le Chablais se trouve dans une situation plus critique que l'espace des trois vallées, pour la

même période, nous l'avons souligné plus haut. L'économie du ski dans cette zone paraît compromise d'un point de vue tendanciel car la zone de probabilité de neige (en bleu) se réduit fortement (figure 6-17). Certains domaines skiables sont maintenant très éloignés de cette zone et d'autres se rapprochent de la limite de probabilité réduisant leur marge de sécurité.

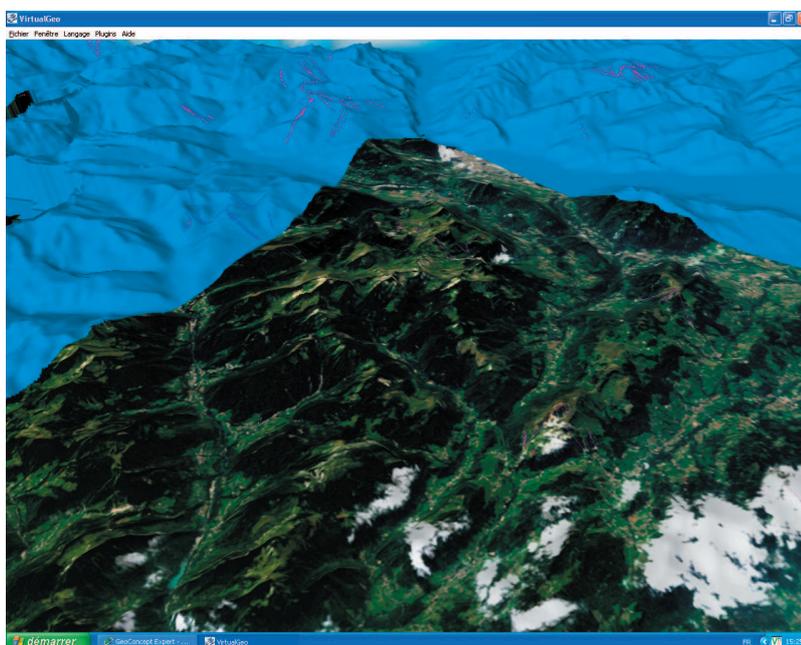
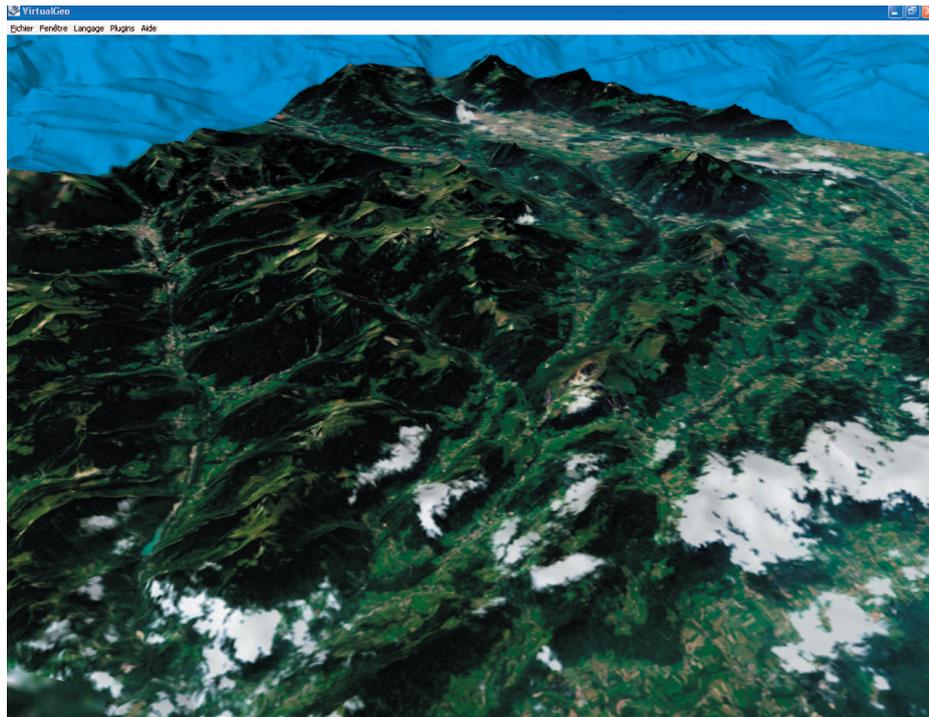


Figure 6-17 : Vue générale du Chablais et de l'évolution de la zone de 100% de potentiel neigeux entre les mois de mars actuel et mars 2015 en scénario A1b.

Restitution par VirtualGéo : vitesse de création des deux scènes 15 secondes



C'est dans la visualisation des espaces de risques pour les pelouses et prairies naturelles de l'étage subalpin que l'environnement de restitution en réalité virtuelle prend toute sa dimension interactive. La facilité avec laquelle nous pouvons

multiplier les angles de vue (Figure 6-16 ; 6-17 et 6-18) et les échelles de perception (Figures 6-19 et 6-20), permet de comprendre et situer les enjeux pour ce type d'occupation du sol, mieux que par une approche classique de cartographie.

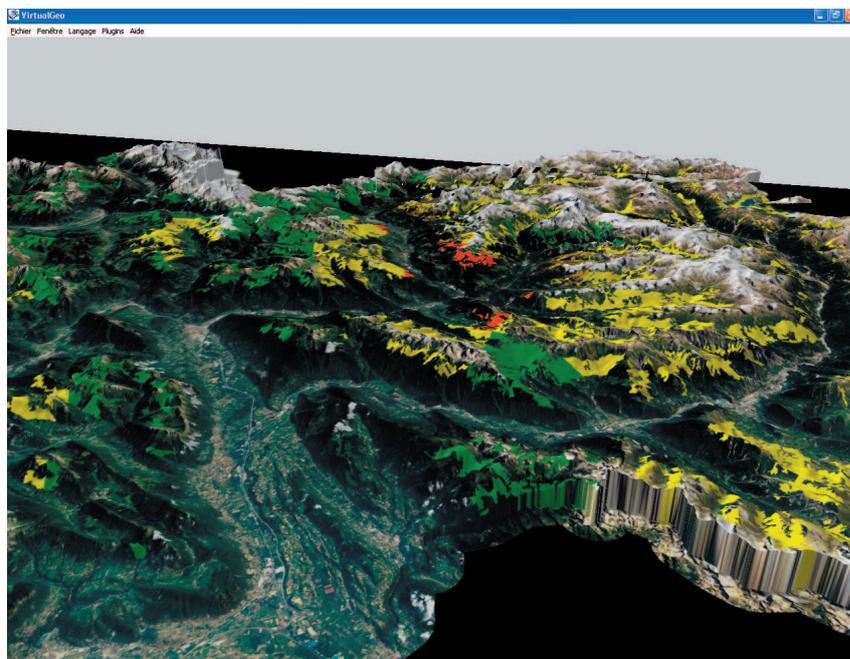


Figure 6-18 : Vue latérale (orientée vers la Maurienne) du risque lié aux pelouses subalpines :

scène constituée de la superposition de l'analyse spatiale sur un orthophotoplan landast à 30 mètres de résolution
vitesse de création 23 secondes

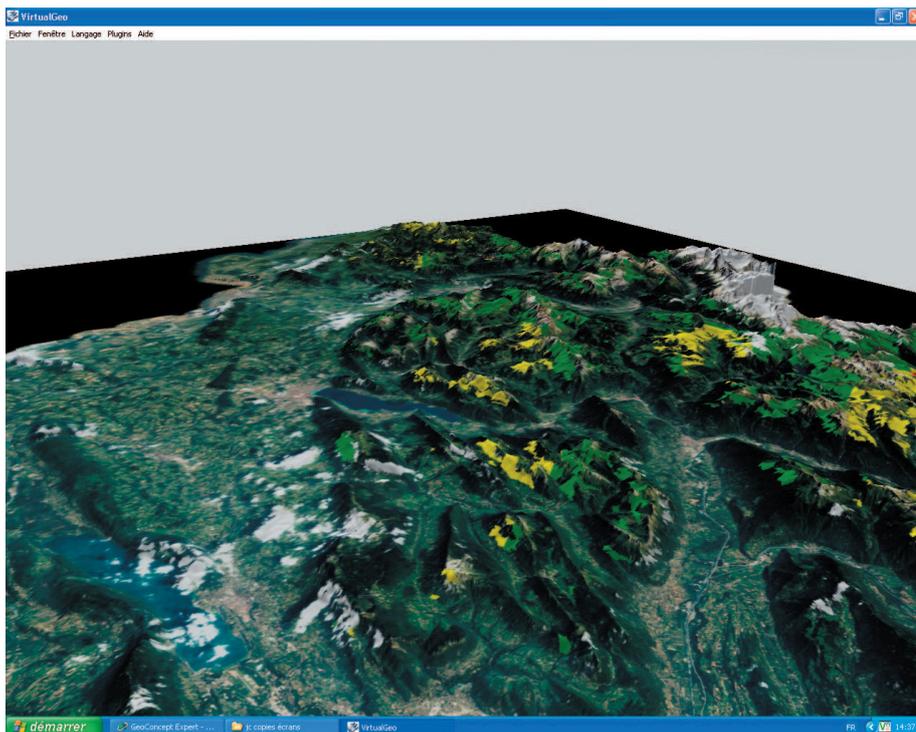


Figure 6-19 : Vue oblique (orientée vers le chablais) du risque lié aux pelouses subalpines : scène constituée de la superposition de l'analyse spatiale sur un orthophotoplan landast à 30 mètres de résolution vitesse de création 21 secondes

Un rapprochement vers la zone en rouge de la figure 6-20 nous permet de visualiser les espaces de conflits potentiels forts entre enjeux d'aménagement d'un domaine skiable (La Plagne) et les espaces soumis à un potentiel d'évolution fort.

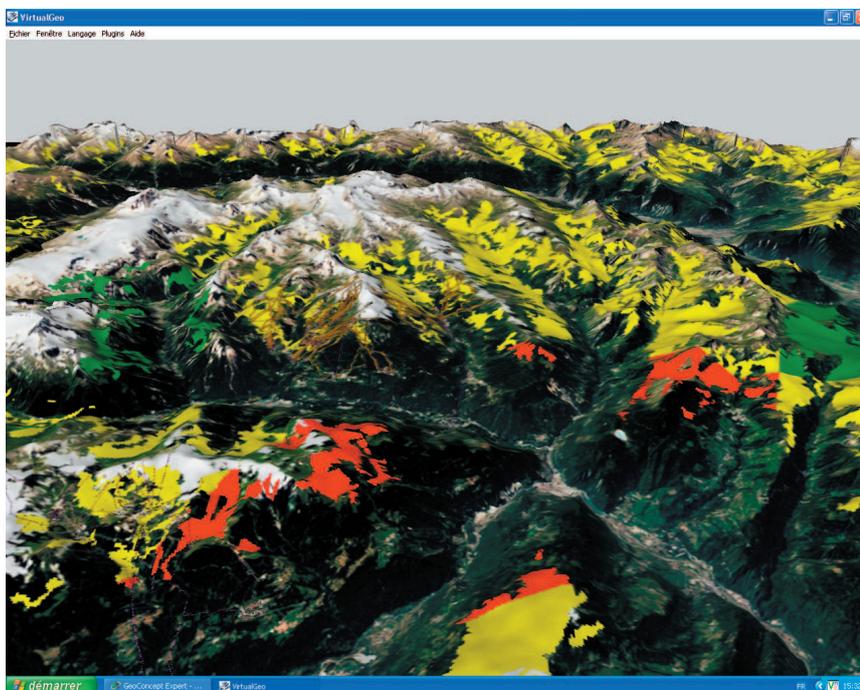


Figure 6-20 : Vue orientée vers le Nord, de la zone de risque maximal pour les pelouses. Au premier plan à gauche, se situe le domaine skiable de La Plagne dont nous apercevons les axes de remontées mécaniques. Au second plan, nous voyons les pistes de ski des Trois Vallées. Vitesse de création 20 secondes

Les scènes des trois figures présentées ci-dessus représentent, pour nous, des scènes de concertations. Dès l'instant où cette dernière apparaît à l'écran (en 15 à 20 secondes), il devient possible de naviguer à l'intérieur à volonté et en temps réel. Nous pouvons donc nous rapprocher du terrain jusqu'à distinguer les bâtis, les remontées mécaniques et les pistes. Il devient possible également de construire immédiatement un projet en 3D. On peut considérer que les acteurs du territoire, devant une telle scène, puissent prendre la mesure des différents enjeux et proposer des redécoupages du territoire (qu'ils testeraient directement dans cette scène) pour parvenir à un compromis. Par exemple, dans le cas de La Plagne, le secteur rouge (Figure 6-20) pourrait éventuellement faire l'objet d'un moratoire d'exploitation de la part du domaine contre l'abandon à l'aménagement d'un autre secteur. On peut aussi envisager l'inverse, permettre l'exploitation de ce secteur car les pelouses semblent condamnées à terme. En revanche, certaines zones en jaune devront être soutenues par le domaine (pas de neige de culture ; abandon de certaines remontées...).

Toutes ces solutions peuvent être testées immédiatement et creusées ou abandonnées. Chacun des interlocuteurs peut agir à sa guise sur le support et produire ses propres analyses (sauf celles qui sont issues du traitement d'interpolation). Le réalisme de restitution de la scène permettra de converger vers une solution commune car l'image produite est assez fine pour réduire de beaucoup les

ambiguïtés sur les enjeux et les conséquences spatiales d'un choix d'une partie ou d'une autre. C'est ici que notre idée d'aide à la concertation par approche heuristique visuelle prend une dimension appliquée.

Au cours de l'année 2002, nous avons pu tester en grandeur réelle, le volet simulation interactive dans un contexte connexe à notre thème de recherche¹⁴⁴, pour le compte du conseil général des Pyrénées Atlantique. Le résultat de la séance a été très intéressant car deux tendances se sont nettement dégagées en fonction de la position professionnelle des acteurs du projet.

Les élus, décideurs institutionnels faiblement techniques, ont très fortement adhéré au système, lui trouvant des vertus de pédagogie qui leur permettaient de s'affranchir d'un certain investissement technique. Ils ont également insisté sur le gain de temps réalisé, dans le choix des différentes solutions qui leur étaient proposées. En revanche, le personnel technique (ingénieurs subdivisionnaires) présent lors de cette séance s'est violemment élevé contre notre instrument, tant que des élus restaient présents dans la salle. Cet instrument ne leur semblait pas correspondre à la réalité du terrain. Il était entaché d'erreurs sur la donnée et enfin, beaucoup lui trouvaient un caractère de gadget inutile. Cette entreprise de discrédit a cessé immédiatement après que les élus présents, qui devaient honorer d'autres rendez-vous, eurent quitté la salle. Dès cet instant, les décideurs techniques nous

¹⁴⁴ Il s'agissait d'une mission d'aide à la prise de conscience de plusieurs projets d'aménagements pour les domaines skiable d'Arette la Pierre St martin et Artouste.

ont demandé de réaliser certains scénarios (création de pistes) et de leur apporter certaines informations comme des profils en long et des visualisations de projets sous différents angles de vue. L'outil, à ce moment là, ne leur semblait plus du tout sujet à caution. Nous avons donc demandé les raisons d'un tel changement d'attitude. L'ingénieur en chef, coordinateur technique du projet, nous a expliqué que « nous allons mettre les ingénieurs au chômage avec un outil pareil ». Nous avons donc tenté de leur montrer que cet instrument était inopérant sans un travail préalable d'intégration du volet technique dans la base de données. Mais leur position n'évoluait pas.

Nous avons pensé, au final, que le cœur du problème ne résidait pas dans une quelconque angoisse d'appropriation de la technique par des élus, mais plutôt, dans un sentiment de perte de pouvoir d'influence sur les décisions prises par les élus. Ce pouvoir réside, justement dans la capacité d'explication du personnel technique vers les décideurs. Simul-Image amoindrit cette influence et cantonne le technicien dans son rôle stricto sensu. Il est donc normal que cet outil soit combattu par le milieu des utilisateurs techniques.

Nous avons vu dans cette partie une mise en œuvre de l'environnement Simul-Image pour un objectif de concertation économie/environnement en fonction du changement climatique. Les idées développées en seconde partie de notre travail ont toutes été mises en œuvre pour parvenir à ce résultat.

Nous avons vu qu'il existe un écart entre la théorie du modèle d'ajout de stations météorologiques virtuelles et son application sur le réel. Cet écart nous a obligé à développer une stratégie spatiale d'implantation de stations virtuelles de températures pour assurer un lien avec le réel. Ce biais a considérablement réduit nos choix en matière de techniques d'interpolation possibles, le krigeage étant désormais déconseillé. Cependant, la technique des splines de type plaque mince restait parfaitement adaptée. Avec le recul, nous pensons même que cette technique d'interpolation est celle qui semble la plus adaptée, couplée à l'ajout de stations virtuelles, car elle autorise une convergence de l'interpolation par itération.

Dans le cas particulier du modèle d'ajout de stations virtuelles, il semble que le poids relatif de chacune des stations météorologiques réelles sur la détermination d'un point à prévoir, exerce des effets et des contres effets, obligeant ce point à donner une valeur proche de l'allure moyenne de l'ensemble de la distribution. Cela nous indique une hypothèse de travail, qui serait éventuellement de classer nos stations météorologiques en fonction de leur écart à cette moyenne et de leur affecter un « super poids » préalable, inversement proportionnel à leur écart à la moyenne globale de la distribution. De cette façon, on introduirait un effet de distorsion lié aux caractéristiques locales des stations au profil thermique particulier.

Sur le plan de l'outil de simulation, les résultats sont, à notre sens, applicables dans

le contexte que nous nous sommes fixé. Le temps de réalisation des scènes est court (entre 15 et 20 secondes) alors que la base de données est très importante (toute la Savoie et la Haute Savoie au pas de 50 mètres en altitude ; plus de 500 remontées mécaniques et 1600 bâtis de fronts de neige). Les possibilités de navigation en temps réel et d'action sur l'environnement sont très confortables. Environ 20 images par secondes sont calculées sur un ordinateur (puissant) du marché.

En revanche, dans le cas de plusieurs chargements et déchargements du fond drapé sur le modèle numérique de terrain, l'outil perd

en vitesse de rafraîchissement. Il permet cependant toutes les simulations et répercute les résultats d'une analyse effectuée dans le SIG vecteur. L'approche d'aide à la concertation par heuristique visuelle est donc envisageable dès à présent comme un outil véritablement concret.

L'objectif que nous nous étions fixé au départ, nous semble donc globalement atteint, même si ce travail reste perfectible, notamment sur le plan du modèle d'ajout de stations virtuelles pour la détermination de températures.

Conclusion générale

Avec la réalisation concrète de Simul-Image, instrument d'aide à la concertation par simulation interactive, nous espérons avoir réalisé notre objectif de mise en œuvre d'une méthode et d'un instrument appliqué. Le caractère innovant de ce travail se développe autour de la façon dont se construit une solution de compromis grâce à la possibilité de simulation en temps réel. Cet outil n'offre pas de réponse à la suite d'un traitement complexe qui verrait émerger **LA** carte ayant vocation à résoudre le problème spatial en jeu. Il s'agit plutôt d'un instrument symbiotique¹⁴⁵ C'est à dire que la solution est construite par une interaction entre les utilisateurs du système et l'instrument de simulation informatique. Pour parvenir à ce résultat, il nous a paru important d'éviter un angle purement technique, donc de traiter ce problème d'un point de vue seulement informatique. En effet, il existe une différence fondamentale entre l'outil informatique de type SIG et la donnée géométrique ou sémantique structurée en son sein, particulièrement quand l'ensemble (logiciel et données) est conçu pour « aider à la décision ». Nous avons cherché à montrer que la présence ou l'absence dans une base SIG d'une information spatiale particulière, représentative d'un territoire particulier n'est pas un phénomène en soi. Au contraire, l'action de l'introduire dans l'outil doit

correspondre à une finalité. Mais cette dernière n'est pas uniforme. Elle ne peut être considérée qu'en fonction des objectifs et des perceptions des acteurs du territoire où existe le problème. Dans ce cadre, le choix de la donnée ne peut plus être considéré comme objectif. Il s'agit donc de prendre en compte cette vision relative de la donnée, c'est à dire celle de chacun des acteurs, pour permettre la concertation. Nous avons donc cherché à repenser les méthodes conceptuelles d'acquisition.

Dans un autre registre, il nous semblait que ce travail resterait seulement une idée de laboratoire si nous ne tentions pas d'en produire une application. La plupart du temps, l'idée originale qui fonctionne « sur le papier » doit subir des aménagements pour prendre une consistance appliquée. Ce besoin de validation avec le réel nous semble particulièrement vrai quand il s'agit d'un travail sur l'aide à la décision. Les trois temps de cette thèse tendent en permanence vers cette idée : du théorique vers l'application.

A notre sens, la géographie en tant que discipline ne peut prendre toute son épaisseur qu'en se mesurant avec le réel tel qu'il est, et non pas, tel que le géographe voudrait qu'il soit. A charge donc pour ce dernier, d'expérimenter ses hypothèses et de ne pas les étendre au delà du domaine pour lequel elles ont été conçues. Chacun des temps de cette thèse s'inscrit dans cette idée comme un fil directeur.

¹⁴⁵ Au sens de Joël de Rosnay [ROSNAY 2000]

Les trois temps du travail

Le premier de ces temps peut être considéré comme la définition du domaine de validité de tout le travail qui suit. Il correspond à la partie I de la thèse. Nous y avons exposé les enjeux relatifs au changement climatique dans un contexte général mais aussi local, (la Savoie et la Haute Savoie), aussi bien sur le plan physique que sur le plan socio économique. Nous avons cherché à montrer que le problème du changement de climat ne pouvait prendre un sens que dans le cas de problématiques spécifiques aux acteurs du territoire.

Comme l'objectif final vise à produire une application, ce constat nous a obligé à définir aussi le domaine de validité des outils de modélisation qui ont été mis en œuvre plus avant dans le travail. Cette définition est particulièrement visible pour le volet qui traite du milieu naturel. Nous avons choisi de construire nos cartes de simulations finales à partir de la théorie des niches écologiques par rapport aux facteurs limitants. Mais nous avons étendu l'idée de niche aux écosystèmes ce qui peut, d'un point de vue purement écologique, poser des problèmes conceptuels. En effet, la niche concerne généralement une seule espèce alors que l'écosystème est une communauté d'espèces. Cependant ces deux entités partagent le fait de pouvoir « exister » spatialement. Leur étendue peut être une fonction des facteurs limitants qui agissent sur elles de façon continue. C'est ce qu'Hutchinson a défini avec la théorie de la niche écologique. Il ne nous apparaissait

pas contradictoire d'étendre cette théorie aux écosystèmes pour chercher à les spatialiser et seulement pour cela. Il s'agit, somme toute, de la mise en œuvre de l'idée de Wagensberg¹⁴⁶ [WAGENSBERG 1997]. Nous avons simplement considéré que la permanence spatiale ne pouvait être assurée que dans un intervalle déterminé, ce qui est parfaitement exprimé par l'idée des facteurs limitants.

Le second temps occupe toute la partie II de notre thèse. Il se situe également dans un contexte théorique mais du point de vue de la technique mise en œuvre dans ce travail. Il nous semble que la technologie informatique et le potentiel offert par les logiciels SIG ne permettent pas de s'affranchir du domaine de validité dans lequel ils s'expriment. Nous devons donc expliciter et montrer la portée des outils que nous avons utilisés dans le contexte de ce travail.

Par exemple, nous avons exposé les enjeux des différentes méthodes d'interpolation par rapport à un projet appliqué. Dans notre cas, nous devons bien comprendre les limites théoriques des différentes méthodes car elles exercent des influences sur la confiance que les acteurs du territoire ont des résultats de notre instrument. Ces influences ont des conséquences appliquées sur l'établissement d'une solution visuelle de concertation car les données de traitement, issues d'un pré travail comme une

¹⁴⁶ Qui considère que la Vie, et ce qui lui confère une permanence spatiale, réside justement dans son caractère transitoire.

interpolation, sont déjà le fruit d'une interprétation. En effet, les cartes de températures interpolées seront différentes si l'on choisit une méthode d'interpolation qui favorise la régularité du phénomène étudié ou une autre qui favorise le caractère local du phénomène étudié. Le cadre spatio-temporel de la décision sera donc modifié au départ par la donnée interpolée disponible pour l'analyse.

C'est dans cette partie que nous avons également développé une théorie de la structuration de la donnée en fonction d'un projet d'aide à la concertation par heuristique visuelle. Il s'agit d'une méthode orientée objet comportant des règles de spécification des objets du point de vue de leur perception par les acteurs. Nous proposons, dans ce cadre, des outils conceptuels pour aider à la détermination de ces objets et évaluer leur poids dans l'établissement du consensus. Il s'agit, à notre sens, d'un point important du travail.

Nous avons cherché à mesurer et à prendre en compte des informations qui sont par définition diffuses. C'est un objectif courant pour qui s'intéresse à la question de l'aide à la décision. Les outils multicritère d'aide à la décision représentent, en la matière, une forme d'aboutissement. Dans le cas de ce travail, nous avons tenté d'introduire cette dimension dans des outils (les SIG) qui ne sont généralement pas utilisés dans le sens de l'aide à la concertation. Ces instruments informatiques sont pensés et structurés pour permettre l'émergence d'une solution optimale à partir de la mise en relation des données entres elles. C'est à dire qu'on

considère que la solution est cachée dans la base de données. Il suffit donc d'accumuler le plus possible de données différentes sur le territoire concerné pour avoir la certitude de posséder la solution optimale, cette dernière étant l'agencement des « bonnes » données entres elles. Les fonctionnalités de ces logiciels ne sont finalement là que pour aider l'opérateur à faire apparaître cette solution. Cela revient à considérer que le réel est entièrement déterminé, et que l'évolution des solutions est uniquement liée à l'amélioration de la précision des attributs et des mesures. On peut éventuellement considérer cette position comme pertinente quand on observe le réel indépendamment du facteur humain,. Il nous semble que ce facteur humain¹⁴⁷ ne peut pas être réduit à une donnée déterminée. Il est bien trop complexe pour cela. Il rentre donc dans le champ de l'indéterminé. Les instruments pour l'aborder ne peuvent donc être que probabilistes. C'est particulièrement vrai pour le cas de la perception des enjeux spatiaux. Elle est multiforme et fonction des intérêts personnels de l'individu. Quand ce dernier est un décideur, son action sur l'espace est prégnante. Les aménagements décidés par l'Homme ne peuvent donc pas être universels. Si ces derniers l'étaient, il n'y aurait pas de conflits d'intérêts. Dans le contexte général dans lequel s'inscrit ce travail, nous avons tenté de développer une méthodologie capable d'offrir des possibilités techniques, pour la prise en compte de cette dimension diffuse au sein

¹⁴⁷ On peut préciser et dire que, dans le champ de la géographie, le facteur humain est un facteur pensant, cette pensée produisant l'idée de perception ;

d'un instrument qui reste toutefois entièrement déterminé.

Le dernier temps (partie III) correspond à la partie purement appliquée de notre travail. D'emblée, nous remarquons l'effet de différence entre l'idée théorique développée « in vitro » (le modèle d'ajout de stations météorologiques virtuelles) avec l'expérimentation « in vivo. ». L'étude du comportement de prévision local du modèle, à partir de la comparaison entre vraies mesures et valeurs prédites pour chaque station météorologique du champ d'étude a montré une faiblesse de prévision pour les stations au profil thermique particulier. Nous avons donc dû adapter notre stratégie d'analyse spatiale pour pouvoir la mettre en œuvre sur notre champ d'étude.

En revanche, quand cette méthodologie s'est trouvée en place, les objectifs d'optimisation de l'interpolation par des moyens accessibles à des utilisateurs dont ce n'est pas le métier, nous semble avoir été atteint. En effet, cette démarche repose sur une définition algébrique et géométrique du phénomène spatial que l'on souhaite interpoler. On peut même imaginer un instrument intégré à un logiciel SIG pour automatiser l'opération d'amélioration du semis et d'interpolation. Cependant, le domaine d'application du modèle d'ajout de stations virtuelles n'est pas universel. Il dépend des conditions de définition du phénomène dans l'espace. En l'état actuel, seul un phénomène capable d'être modélisé par des fonctions linéaires définies dans R , peut faire l'objet d'une amélioration du

semis de stations. C'est une limite assez forte car beaucoup de phénomènes continus du réel ne sont pas modélisés avec des hypothèses aussi fortes. C'est le cas du phénomène des précipitations par exemple.

Un instrument opérationnel

Pour finir, nous devons nous interroger sur la valeur véritablement appliquée de l'instrument Simul-Image. En effet, il pourrait s'agir d'un travail de RANA (Recherche Appliquée Non Applicable)¹⁴⁸, reproche souvent fait à l'institution universitaire. Si cela s'avérait vrai, alors cette thèse n'aurait que partiellement rempli ses objectifs et serait en contradiction avec son mode de financement (convention cifre).

Nous pensons qu'il n'est rien, bien que des améliorations doivent être encore apportées à l'ensemble pour la garantie de son opérationnalité. L'expérimentation en temps réel de l'instrument n'a été que partiellement faite et nous n'avons pas pu tester les outils de modélisation heuristique directement avec les acteurs du territoire. Deux raisons principales montrent, selon nous, que nous nous sommes gardés de la RANA. La première est technique.

Nous considérons que cet outil n'est pas un instrument de laboratoire pour les raisons suivantes :

- L'ensemble du processus défini dans la seconde partie pour l'établissement de la base de

¹⁴⁸ Bruno Latour in [LATOUR 2001]

données peut être facilement mis en œuvre. Le point délicat concerne la question de l'interpolation, mais nous avons vu que le recours aux fonctions base radiale comme les splines de type plaque mince permettaient d'obtenir des résultats puissants par une démarche déterministe.

- L'architecture informatique est assez simple et ne réclame que des connaissances usuelles en géomatique. L'automatisation du processus (dialogue et échange de données entre les logiciels) ne réclame que des capacités simples de programmation et de connaissance du système d'exploitation windows.
- Les logiciels utilisés sont tous des produits du marché, stables, et relativement peu onéreux. Par exemple, l'ensemble logiciel complet prêt à fonctionner, pourrait être acquis, par une entreprise, pour un budget de moins de 10 000 euros toutes taxes comprises.
- Enfin, le temps de mise en place et de réalisation d'une mission de concertation complète est compatible avec les exigences d'une entreprise. Nous évaluons le travail nécessaire à un mois pour une personne, pour la construction de la base SIG orientée pour la concertation. Bien entendu, ce temps est compté hors acquisition de l'information de base.

La seconde raison est plus stratégique et concerne les idées que nous avons sur l'évolution du marché de la géomatique dans les prochaines années. Bien entendu, cette réflexion ne vaut que dans un contexte d'entreprise. Mais nous rappelons que le mode de financement de cette thèse (convention cifre) nous faisait une obligation morale de valorisation du travail au delà de la recherche « pure ».

Avec le souci de maîtriser de plus en plus d'informations pour prendre des décisions, les acteurs du territoire ont compris l'intérêt de l'emploi des SIG pour maîtriser le flot de données et les intégrer dans leur raisonnement. Dans un registre connexe, le besoin de « pédagogie » de la décision se fait de plus en plus en plus sentir. C'est la raison du développement de la synthèse d'images d'entreprise. Les élus usent de cette technologie pour faire passer les projets qu'ils souhaitent, et réduire dans le même temps, les conflits éventuels qui peuvent émerger autour de ces projets. Actuellement, ces deux axes de valorisation de la donnée géographique sont séparés et correspondent à deux modèles économiques différents. Nous pensons que leurs réunions se révélerait très fertile pour une entreprise. Le gain de temps en matière de concertation serait sans doute considérable. Devant la multiplication de ce type de besoins pour les acteurs du territoire, il est hautement probable que ce type d'outils sera appelé à se développer. C'est un nouveau champ de la géomatique qui verrait alors le jour. Nous pensons que ce champ sera un vecteur économique intéressant et rentable à moyen terme.

Indications bibliographiques

- ARMSTRONG M et CARRIGNAN J :** 1997. *Géostatistique linéaire : application au domaine minier* : Ecole des Mines; Paris; 112 pages
- ADANT I. C. MOUGENOT et al :** 1999. *La participation, heuristique de l'environnement* ; Environnement et Société n°22 ; pp. 145-155.
- ARNAUD M et EMEY X :** 2000. *Estimation et Interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques* : Hermes; Paris; 221 pages
- AYACHE M et FLORY A :** 1996. *Approche Orientée Objet : Concept et utilisation* ; Economica ; Paris ; 112 pages
- BACHELARD G :** 1934 (réédition 1999). *Le nouvel esprit scientifique* ; Presses Universitaires de France ; Quadrige ; Paris ; 183 pages
- BACHELARD G :** 1970. *La formation de l'esprit scientifique* ; Vrin ; Paris ; 256 pages
- BAUDRY J et BUREL F :** 1999. *Ecologie du paysage : concepts, méthodes et applications* : Tec & docs; Paris; 359 pages
- BEDECARRATS A et DINGER F :** 1994. *Etude de la dynamique de reconquête des espaces terrassés en altitude* : Cemagref; Grenoble; Etude; 37 pages
- BÉGUIN M et PUMAIN D :** 1994. *La représentation des données géographiques. Statistique et cartographie*. Armand Colin coll. Cursus; Paris 192 pages.
- BELTRANDO G et CHERMERY L :** 1995. *Dictionnaire du climat*. Larousse; Paris; 344 pages
- BENISTON M (ed):** 2002. *Climatic Change; Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management: Advances in Global Change Research*; Kluwer Academic Publishers; Dordrecht; Pays Bas et Boston; USA; 503 pages.
- BENISTON M (ed.) :** 1994. *Mountain Environments in Changing Climates*: Routledge Publishing Company; Londres et New York; 492 pages
- BENISTON M. COLLET C. HAMMER T. LEIMGRUBER W. MONBARON M. RUEGG J :** 2003. *Interdisciplinary research on "Global Environmental Change"* au Department of Geosciences of the University of Fribourg; Geographica Helvetica; 58; pp 231-243
- 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; pp 19-31
- BENISTON M :** 2000. *Environmental Change in Mountains and Uplands*; Arnold/Hodder and Stoughton/Chapman and Hall Publishers; Londres; Royaume Unis et Oxford University Press; New York; USA. 172 pages
- BENISTON M :** 2002. *Climatic change: Possible impacts on human health*, Swiss Medical Weekly; 132; pp 332-337
- BENISTON M :** 2003. *Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts*; Climatic Change; 59; pp 5-31
- BERTIN J :** 1967. *Sémiologie Graphique. Les diagrammes, les cartes*. Mouton; Gauthier-Villars; Paris-la Haye; 431 pages
- BERTIN J :** 1977. *La Graphique et le traitement graphique de l'information*. Flammarion; Nouvelle Bibliothèque Scientifique; Paris; 277 pages
- BERTIN J :** 2000. http://www.sciencespo.fr/cartographie/cartographie_html/5_page5theorie/graphique_bertin2001/flash/accueil.html ; Atelier de science po Paris ; Paris
- BLONDEL J :** 1995. *Biogéographie: approche écologique et évolutive* ; Masson ; Paris ; 297 pages
- BOND G et al :** 1993 September. *Correlations between climate records from North Atlantic sediments and Greenland ice*. Nature; Vol 365; pp 143-147.
- BOND G :** 1992. *Evidence for massive discharges of icebergs into the North Atlantic ocean during the last glacial periods*; Nature; vol. 360; pp. 245-249.

- BORD J.-P et BLIN E** :1993. *Initiation géographique ou comment visualiser son information* ; Sedes ;Paris ; 284 pages
- BORD J.P** : 2002. *La carte thématique et l'explication en géographie*: Géopoint 2000; l'explication en géographie; Avignon; pp 125-128
- 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° 5/6-1995 ; pp 63-68.
- CARDON A** : 1999. *Conscience artificielle et systèmes adaptatifs* : Eyrolle; Paris; 380 pages
- CARREGA P** : 1982. *Les facteurs climatiques limitants dans le sud des alpes occidentales* ;Thèse ; Nice ;251 pages
- CEN/TC 287** : 1996. *Prénorme européenne ; Projet définitif prENV12160* ; Information géographique- Description des données - Schéma spatial ; Comité Européen de Normalisation
- CHARDONNEL S. FEYT G. ET LOUBIER J.C** : 2003. *Maquette virtuelle et projet de territoire: vers une vision commune*, in: Collectif. Figure du Projet territorial (Directeurs d'ouvrage: Debarbieux B. et Lardon S.), Editions de l'Aube: La Tour D'Aigues, 2003
- CHAUVET P** : 1999. *Aide mémoire de géostatistique linéaire* : Ecole des mines; Paris; 367 pages
- COLLET C ET EASTMAN J.R** : 1993. *Idrisi: Un SIG en mode Image* : Centre régional Idrisi francophone; Besançon; 275 pages
- COLLET C**: 1992. *Systèmes d'Informations Géographiques en mode image* : Presses Polytechniques et Universitaires romandes; Lausanne; 186 pages
- COOK E.R. D'ARRIGO R.D. et BRIFFA K.R** : 1998. *A reconstruction of the North Atlantic Oscillation using tree-ring chronologies from North America and Europ* : The Holocene ; 8; pp 9-17
- CREUTIN J.D**: 1979. *Méthodes d'interpolation optimale de champs hydrométéorologiques: Comparaison et application à une série d'épisodes pluvieux Cévenols* ; Thèse ; INPG ; Grenoble ; 131 pages
- CROSAZ Y et DINGER F** : 1990. *Comportement de la végétation des engazonnements sur substrats amendés en altitude* : Cemagref; Grenoble; Etude; 28 pages
- CROSAZ Y et DINGER F** : 1995. *Protection de talus et fossés de forte pente par toile de jute avant végétalisation* : Actes des rencontres 95 Géotextiles géomembranes; tome 1 pp 43-45
- DABURONA**:1989. *La réhabilitation des surfaces dégradées des domaines skiabiles : une nouvelle conception de l'aménagement des stations-cas de l'Isère et de la Savoie*: Cemagref; Grenoble; thèse; 310 pages
- DE CAMBRAY B** : 1994. *Etude de la modélisation, de la manipulation et de la représentation de l'information spatiale en 3D dans les bases de données géographiques* ;Thèse ;Paris 6 ;Paris
- DE CAMBRAY B. et TSIN-SHU Y** :1995. *Données géographiques multidimensionnelles (2D, Relief et 3D) dans un SIG 3D* ;Revue internationale de géomatique ;Vol 5, n°1 pp 7-36
- DE LA LOSA A** : 2000. *Modélisation de la troisième dimension dans les bases de données géographiques* : Thèse; Marne la Vallée; 175 pages
- De ROSNAY J** : 2000. *L'homme symbiotique. Regard sur le troisième millénaire* ;Seuil ; Points essai ;Paris ; 408 pages
- DEBARBIEUX B** (ed Veyret Y) : 2001a. *La montagne : un objet géographique ?*: Les montagnes, discours et enjeux géographiques. SEDES; Paris; pp 11-34
- DEBARBIEUX B** (ed Veyret Y) : 2001b. *Les montagnes : représentations et constructions culturelles* : Les montagnes, discours et enjeux géographiques. SEDES; Paris; pp 35-50
- DENEGRE J ET SALGE F** : 1996. *Les systèmes d'information géographique* ; collection Que-Sais-Je? N° 3122, Presses Universitaires de France ; 128 pages

- DESCARTES R** : 1637. Réédition 1990. *Discours de la méthode* : Hatier; Philosophie; Paris; 79 pages
- DIDIER L. et BRUN J.J** : 1998. *Limite supraforestière et changements environnementaux pour une approche pluiscale et spatialisée des écosystèmes d'altitude*: Géographie Physique et Quaternaire; 52; N°2 PP 1-9
- DINGER F** : 2001. *Exemple de mise en œuvre de techniques de génie écologique : réhabilitation de milieux dégradés d'altitude*; La Jaune et le Rouge de 2001 : Les milieux naturels continentaux; 11 pages
- DINGER F. AUBRY F. et WIART J** : 1999. *Utilisation des déchets organiques en végétalisation. Guide des bonnes pratiques* : Editions ADEME; Paris; 112 pages
- DINGER F**: 1997. *Végétalisation des espaces dégradés en altitude*: Cemagref Edition; 144 pages
- DURAND-DASTES F** (ed Bailly A. Ferras R. Pumain D) : 1995. *Les modèles en géographie*. Encyclopédie de Géographie; Economica; Paris; pp 293-307
- EASTMAN J.R. KYEM P.A.K. TOLEDANO J. et JIM W** : 1993. *GIS and decision making: Exploration in Geographic Information System*. Vol 4; Unitar; Genève
- EASTMAN R** : 1999. *Guide to GIS and Image Processing* Idrisi32. Worcester MA; Clark university; 170 pages
- ERMINE J L** : 1989. *Systèmes Experts : théorie et pratique* : Lavoisier; Paris; 221 pages
- FAO (Food Administration Organisation)**: 1997. *Changement de climat et production agricole*. Polytechnica; Paris; 472 pages
- FERLAND Y**: 1997 révis 2002. *Les défis théoriques posés à la cartographie mènent à la cognition* ;Colloque : 30 ans de sémiologie graphique ; Paris 12 et 13 décembre 1997; Cybergéog.fr
- FISCHESSER B** : 1998. *La vie de la montagne*. La Martinière; Paris; 351 pages
- FLOCH'LAY B. et PLOTTU E** : 1998. *Consultation ou co-décision : la question de participation du citoyen à l'évaluation des projets publics* ; Métropolis ; 106-107 ; pp.76-79.
- FÖHN P** : 1991. *Les hivers de demain seront-ils blancs comme neige ou vert comme les prés ?*;WSL/FNP (ed) ; Argument de la recherche ;N°3 ; pp 3-12
- FRONTIER S et PICHOD-VIALLE D** : 1993. *Ecosystèmes; structures; fonctionnements; évolutions* : Masson; Paris; 447 pages
- GARBOLINO E** : 2001. *Les plantes indicatrices du climat en France et leur télédétection*; Thèse; Nice; 310 pages
- GAUSSEN H** : 1954. *Rapport général sur la cartographie écologique. Les divisions écologiques du monde* ; Coll. Intern; Paris; CNRS.
- GAUSSEN H** :1973. *International Classification and Mapping of Vegetation; Ecology and conservation*; 6; UNESCO; Paris; 93 pages
- GIEC (Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat) (a)** : 2001. *Climate Change 2001: The scientific basis* : Cambridges University Press; Cambridges; 892 pages
- GIEC (Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat) (b)** : 2001. *Climate Change 2001: Impact, adaptation and vulnerability*. Cambridges University Press; Cambridges; 1042 pages
- GIEC (Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat) (c)**: 1995. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*: Cambridges University Press; Cambridges;
- GIEC (Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat) (d)**: 1996. *Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change* : Scientific Technical Analyses, Cambridges University Press; Cambridges; 879 pages
- GIEC(Groupement Intergouvernemental d'Etude du Climat) (e)**: 2001. *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'Evolution du Climat ;IPCC ; 92 pages

- GRATTON Y :** 2002. *Le krigeage: la méthode optimale d'interpolation spatiale* ; Institut national de la recherche scientifique ; Québec ; Canada
- GUYOT G :** 1997. *Climatologie de l'environnement*: Masson; Paris; 505 pages
- HAEBERLI W :** 1995. *Climate Change Impacts on Glaciers and Permafrost* in: A Guisan J.L; Holten R; Spichiger et Tessier L; edit : Potential Ecological Impacts of Climate Change in the Alps and Fennoscandian Mountains : Conservatoire et jardins botaniques de la ville de Genève; Publication Hors série 8; pp 97-103
- HALPIN P -N :** 1994. *Latitudinal variation in montane ecosystem response to potential climatic change*; in Mountain Ecosystems in changing Climates; Beniston M (ed); Routledge Publishing Company; London and New York; pp 180-203
- HEIDEGUER M :** 1986. *Être et temps* ; Gallimard ; NRF ; Paris
- HEINRICH H :** 1988. *Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years*; Quaternary Research; vol 29; pp 142-152.
- HILL D ET COQUILLARD P :** 1996. *Modélisation et simulation d'écosystèmes : recherche en écologie* ; Masson; Paris; 273 pages
- HOFSTADTER D :** 1998. *Godël Escher Bach : les brins d'une guirlande éternelle* : Interédition; Paris; 883 pages
- HUETZ DE LEMP A :** 1994. *Les paysages végétaux du globe*. Masson; Paris; 182 pages
- HUNT B.G ET DAVIS H.L :** 1997. *Mechanism of multi-decadal climatic variability in a global climatic model*: International Journal of Climatology; 17; pp 565-580
- HUNT B.G :** 1998. *Natural climatic variability as an explanation for historical climatic fluctuation*: Climatic Change; 38; pp 133-157
- IFEN (Institut Français de l'Environnement) :** 2002. *Chiffres-Clés 2002 de l'environnement* : IFEN; Orléans; 24 pages
- JANCOVICI J.M :** 2002. *L'avenir climatique : Quel temps ferons nous ?*: Seuil; Paris; 284 pages
- JOËRIN F :** 1998. *Décider sur le territoire : proposition d'une approche par utilisation de SIG et de méthodes d'analyse multicritère* ; Thèse ; Département de Génie Rural ; Lausanne ; EPFL ; 220 pages.
- JOURNEL A.G ET HUIJBREGTS C.J :** 1978. *Mining Géostatistics* ; Academic press; New York; 600 pages
- KIENAST F. BREZEZIECKI B ET WILDI O :** 1995. *Long term adaptation potential of Central European Mountain forest to climate change : a GIS assisted risk assessment* : Forest Ecologia Management; N°80; pp 133-153
- KRIGE D.G :** 1957. *A statistical approach to some basic mine valuation problems on Witwatersrand*: Journal of Chem; Metal and mining society of South Africa / N° 52; 20 pages
- LAARBI AMOR :** 2000. *SIG et analyse multicritère*. Hermes; Paris; 190 pages
- LABORDE J.P :** 2000. *Méthodes d'interpolations et géostatistiques pour la cartographie automatique* : CNRS UMR 5651 « Espace »; Equipe Gestion et Valorisation de l'environnement; Nice; Sophia-Antipolis; 27 pages
- LACOSTE A ET SALANON R :** 1993. *Eléments de biogéographie et d'écologie* : Nathan; Paris; 189 pages
- LARUE T, PASTRE D ET CHAPUIS M :** 1992. *Schéma d'une base de données géographiques pour véhicules dirigés automatiquement* ; actes du 15^{ème} Symposium Européen des Systèmes d'Information Urbains ; vol. 2 ; pp. 371-382.
- LATOUR B :** 2001. *Le métier de chercheur. Regard d'un anthropologue* ; INRA ; Science en question ; Paris ; 103 pages
- LE FUR A :** 2000. *Pratique de la cartographie*. Armand Colin; Paris; 95 pages
- LE ROY LADURIE E :** 1992. *Histoire du climat depuis l'an Mil* ; Flammarion ; Paris ; 376 pages

- LEVI STRAUSS C** : 1952 réédition 1987. *Race et Histoire* : folio essai; Paris; 127 pages
- LEVY J** : 1999. *Le tournant géographique : penser l'espace pour lire le monde*. Belin; Paris; 399 pages
- LOUBIER J C**: 1999. *Mise en place d'un prototype informatique de gestion du milieu naturel dans une perspective de développement du tourisme de loisirs* ; Mémoire de DEA ; Université Joseph Fourier ; Institut de Géographie Alpine ; Grenoble ; 31 pages
- LOVELOCK J** : 1993. *La terre est un être vivant : l'hypothèse Gaia* : Flammarion; Paris; 192 pages
- LOVELOCK J**: 1997. *Les ages de Gaia*: Odile Jacob ; opus ; Paris ; 308 pages
- MARTIN E. BRUN E. DURAND E** :1995. *Modélisation de la climatologie nivale des Alpes françaises et application aux études d'impact des changements du climat* ; La Houille Blanche ; N° 7/8-1995.
- MARTIN E. BRUN E. DURAND Y**: 1997. *Snow cover simulations in mountainous regions based on general circulation model outputs*; Annals of Gaciology; n°25 pp42-45.
- MARTIN E. et ETCHEVERS P** : 2002. Impact des variations climatiques sur le manteau neigeux, incidence sur l'hydrologie nivale, les avalanches ; La Houille Blanche ; N° 8-2002 ; pp 84-88.
- MATHERON G** : 1978. *Estimer et choisir*: Essai sur la pratique des probabilités : les cahiers du centre de morphologie mathématique ; fac 7 ; Ecole des Mines; Paris; 175 pages
- ONT (Organisation Nationale du Tourisme)** : 2003. *Memento du tourisme* : les périodiques; Collectif édition ONT ; Paris ; 135 pages
- OST F** : 2003. *La nature hors la loi; l'écologie à l'épreuve du droit*. La découverte; Paris; 350 pages
- OZENDA P**:1994. *Végétation du continent Européen* ; Delachaux et Niestlé ; Lausanne ; 271 pages
- OZENDA P. et BOREL J.L** : 1991. *Les Conséquences Ecologiques Possibles des changements Climatiques dans l'Arc Alpin* : Rapport Futuralp N°1; International Centre for Alpine Environment (ICALP); le Bourget du lac
- OZENDA P**: 1985 . *La végétation de la chaîne alpine dans l'espace montagnard Européen* : Masson; Paris; 344 pages
- PARIZEAU M H (ed.)**:1997. *La biodiversité :tout conserver ou tout exploiter* ; De Boek Université ; science éthique sociétés ; Paris-Bruxelles ; 212 pages
- PASKOFF R** : 2001. *L'élévation du niveau de la mer et les espaces côtiers :le mythe et la réalité* /Institut Océanographique; Paris; 190 pages
- RAMEAU J C. MANSION D. DUME G**:1994. *Flore forestière française. Tome 2. Montagnes* ; IDF ;Paris ; 2421 pages
- ROMME W.H et TURNER M.G**:1991. *Implication of global climate change for biogéographic patterns in the greater Yellowstone ecosystem* : Conservation Biological ; 5; pp 373-386
- ROY B**: 1985 (réédition 2000). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision* ; Economica ; Paris ; 423 pages
- ROY B et BOUYSSOU D**: 1993. *Aide Multicritère à la décision: Méthodes et cas* : Economica; Paris; 693 pages
- SCHÄRLING A** : 1996. *Pratiquer Electre et Prométhée* : Presses Polytechniques et Universitaires romandes ; Lausanne ; 173 pages
- SEATM (Service d'Etude et d'Aménagement Technique de la Montagne)**: 1990. *Aménagement des pistes des ski alpin* : Plaquette; 40 pages
- SIMON H A** : 1960. *The New Science of Management Decision*; The Ford Distinguished Lectures, Vol. III, Harper and Row; New York
- THOMAS I** : 2001. *Cartographie d'aujourd'hui et demain : rappels et perspectives* ;Cybergeog ; Cartographie, Images et SIG ; 24 pages
- TONG-TONG J.R**: 1995. *La logique floue* ; Hermes ; Paris ; 160 pages.

TURCOTTE M.-F : 1997. *Prise de décision par consensus; Leçons d'un cas d'environnement* ; Paris-Montréal ; L'Harmattan ; 173 pages.

VAN OOSTEROM P. VERTEGAAL W. VAN HEKKEN M: 1994. *Integrated 3D modelling within a GIS*; in *Advanced geographic data modelling*; (Directeurs d'ouvrage Molenaar M. De Hoop S); pp.80-95

VIGNEAU J P :2000. *Géoclimatologie* ; Université Géographie ; Ellipses ; Paris

WAGENSBERG G : 1997. *L'âme de la méduse: Idées sur la complexité du monde* ; Seuil ; sciences ouvertes ; Paris ; 170 pages

ZADEH L : 1965. *Fuzzy Sets* : Information and control; Vol 8; pp 338-353

Figure 1-1: Bilan énergétique terrestre	8
Figure 1-2: Mesure directe atmosphérique de la concentration des HCFC.	9
Figure 1-3: Concentration du CO ₂ mesuré sur le site de Mona Loa à partir de 1955.	10
Figure 1-4: Concentration de gaz carbonique atmosphérique depuis l'an 1000	10
Figure 1-5: Concentration en ppmv de CO ₂ et CH ₄ sur les 400 000 dernières années d'après l'étude des forages effectués à la station Vostok.....	11
Figure 1-6: Récapitulatif du développement des modèles de circulation climatique	15
Figure 1-7: Modèle conceptuel du maillage pour le modèle de circulation climatique du Hadley center.....	16
Figure 1-8: Amélioration de la simulation par introduction du forçage naturel et anthropique....	17
Figure 1-9: Graphique d'évolution des températures et de l'élévation des niveaux des océans entre 2000 et 2100 donnés par les modèles.....	25
Figure 1-10 : Exemple de modélisation des écosystèmes méditerranéens.	26
Figure 1-11: Projections sur le rendement agricole dans un contexte de doublement du CO ₂ atmosphérique	29
Figure 1-12 : Montagne sans ski (hors saison d'hiver et séjournants hiver non pratiquants) pour les courts et longs séjours.....	33
Figure 1-13 : Montagne avec ski pour les courts et longs séjours.	34
Figure 1-14: Structure des brevets d'Etats	35
Figure 1-15 : Structure des massifs	37
Figure 1-16: Carte des remontées mécaniques.....	39
Figure 1-17: Evolution des investissements en neige de culture sur cinq ans.....	40
Figure 1-18: Nombre d'Ha enneigés artificiellement entre 1996 et 2001.....	41
Figure 1-19: Répartition des heures de fonctionnement des systèmes d'enneigement pour la saison 2000/2001.....	42
Figure 1-20 : Coût de production en Euros d'un m ³ de neige par système bi-fluides	42
Figure 1-21: Coût de production en Euros d'un m ³ de neige par système mono-fluide	43
Figure 1-22: Part de marché des massifs en %.....	44
Figure 1-23 : carte du chiffre d'affaires des domaines skiables en France.....	45
Figure 1-24: Exemple de pistes non végétalisées sources.....	47
Figure 1-25: Type d'espèces utilisées pour l'engazonnement des pistes de ski	50
Figure 2-1: Méta-climax.....	54
Figure 2-2 : Modèle de facteur écologique	56
Figure 2-3: Modèle de niche écologique	57
Figure 2-4 : Modèle des étages de végétation	60
Figure 3-1: Propriétés naturelles de l'image instantanée	78
Figure 3-2: Réseau et matrice ordonnable	79
Figure 3-3: Les variables visuelles	80
Figure 3-4: Graphe de modélisation de la valeur heuristique des objets spatiaux minimum.....	84
Figure 3-5: Principes des SIG	89
Figure 3-6: Les deux modes de représentation du réel dans un systèmes à deux dimensions	90
Figure 3-7: Modèle des données en SIG vecteur ; notation Express [CEN 1996]	92
Figure 3-8: Exemple d'héritage et de classes pour la modélisation d'un domaine skiable.....	94
Figure 3-9 : Modèle du processus décisionnel de SIMON	97
Figure 3-10: Exemple de paysage reconstitué entièrement en synthèse d'Images.....	99
Figure 3-11 : Implication du mouvement sur un objet pour la perception de son caractère tridimensionnel	100
Figure 3-12: Le problème de la 2D75.....	102
Figure 3-13: Modèle de représentation de la 3D de Cambrai	103

Figure 4-1 : Structure de l'environnement informatique	107
Figure 4-2: Base de données vecteur avec raster calé automatiquement	108
Figure 4-3: Exemple de passage du fond de carte du SIG vecteur vers l'environnement de réalité virtuelle.....	108
Figure 4-4: Visualisation du point d'équilibre d'un objet dans un environnement de modélisation 3D.....	109
Figure 4-5: Exemple de structure d'une base de données géographiques pour la reconstitution automatique d'un paysage	110
Figure 4-6: Modèle d'instanciation des objets ponctuels pour la reconstitution interactive d'un paysage.....	111
Figure 4-7: Scènes reconstituées après analyse climatique : Domaine skiable Arête la Pierre St Martin.....	112
Figure 4-8: Modélisation objet d'un domaine skiable	114
Figure 4-9: Modélisation objet du milieu naturel	115
Figure 4-10: Schéma explicatif pour l'échange des données entre le SIG raster et le SGBDR..	117
Figure 4-11: Une réalisation du phénomène des précipitations en juillet.....	118
Figure 4-12: Carte d'interpolation des valeurs des sites de mesures (Thiessen).....	119
Figure 4-13: Exemple de polynôme d'interpolation.	120
Figure 4-14: Carte d'interpolation des valeurs des sites de mesures	120
Figure 4-15: Tableau de choix des méthodes d'interpolation	124
Figure 4-16: Courbe d'efficacité des différentes méthodes d'interpolations.....	125
Figure 4-17: Variogramme expérimental et ajustement par défaut	129
Figure 4-18: Estimations des températures moyennes d'un mois de janvier type par krigeage ordinaire.....	130
Figure 4-19: Histogramme des résidus de l'estimation par défaut.....	131
Figure 4-20: Allure générale du variogramme expérimental.....	132
Figure 4-21: Variogramme expérimental N° 1 au pas de 5000 M et de porté 11500	133
Figure 4-22: Ajustement simple sur le variogramme expérimental n° 1.....	134
Figure 4-23: Carte des températures d'après l'ajustement exponentiel	135
Figure 4-24: Variogramme expérimental N°2 au pas de 5000 M et de portée 5200M	136
Figure 4-25: Ajustement du modèle sur le variogramme expérimental n°2.....	137
Figure 4-26: Carte des températures pour un mois de janvier moyen en hypothèse quasi stationnaire d'ordre deux.....	138
Figure 4-27: Exemple de spline à une dimension	139
Figure 4-28: Exemple d'une plaque mince de type spline bi-cubique	140
Figure 5-1: Les emplois des domaines skiabiles en Savoie et haute Savoie.....	173
Figure 5-2: Carte de l'efficacité des Domaines skiabiles en Savoie et Haute Savoie	175
Figure 5-3: Evolution de la population d'Annecy et de Chambéry entre 1896 et 1931	176
Figure 5-4: Evolution de la population en Savoie et Haute Savoie entre 1896 et 1999	177
Figure 5-5: Carte de la population par commune pour la Savoie et la Haute Savoie	177
Figure 5-6: Aperçu de l'occupation du sol en Savoie et haute Savoie	180
Figure 5-7: Structure globale de l'occupation du sol en Savoie et Haute Savoie	181
Figure 5-8: Occupation du sol pour le milieu naturel faiblement traité par l'Homme	182
Figure 5-9: Tableau du Nombre de stations de la bd ER30 de 1944 à 1992	184
Figure 5-10: Exemple de structure du tableau de données pour la température.....	185
Figure 5-11 : Modèle d'échange de données climatiques vers le SIG raster	186
Figure 5-12 : Carte attachée à l'axe 1 de l'ACP spatiale	188
Figure 5-13 : Carte attachée à l'axe n°2 de l'ACP spatiale	188
Figure 5-14 : Score des variables sur les trois premières composantes de l'ACP	189

Figure 5-15 : Comparaison des moyennes mensuelles réelles et prévues.....	191
Figure 5-16 : Allure d'une station de mauvaise qualité de prévision (Bessans)	192
Figure 5-17 : Allure d'une station de bonne qualité de prédiction (Avrieux).....	192
Figure 5-18 : Carte booléenne des correspondances altitudinale et orientation	194
Figure 5-19 : Carte booléenne des contraintes.....	194
Figure 5-20 : Modèle d'appartenance en ensemble flou pour la pente	196
Figure 5-21 : Quatre exemples d'utilisation de la fonction sigmoïde.	196
Figure 5-22 : Modèle de définition du facteur altitude	198
Figure 5-23 : Carte de fonction floue et fonction sigmoïde associée	198
Figure 5-24 : Cartes des semis du champ (initial et amélioré).....	200
Figure 5-25 : Exemple d'interpolation par spline de type plaque mince	202
Figure 5-26 : Validation croisée pour l'interpolation par spline de type plaque mince.....	203
Figure 5-27 : Contribution des variables sur les trois premières composantes de l'ACP	204
Figure 5-28 : Carte attachée à l'axe n° 1 de l'ACP spatiale des Températures	204
Figure 5-29 : Carte attachée à l'axe n° 2 de l'ACP spatiale des Températures	205
Figure 6-1 : Modèle d'analyse raster pour la détermination des zones de T° 0	207
Figure 6-2 : Nombre d'ha où la température par mois est égale à zéro et pourcentage de terrain perdu sur 15 ans.....	208
Figure 6-3 : Cartes des zones concernées par l'évolution de l'isotherme zéro en 2015	209
Figure 6-4 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute Savoie pour décembre.....	211
Figure 6-5 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute Savoie pour février.....	212
Figure 6-6 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute Savoie pour mars.....	213
Figure 6-7 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute Savoie pour décembre 2015...	215
Figure 6-8 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute Savoie pour février 2015.....	216
Figure 6-9 : Présentation de la probabilité de constitution d'une couverture neigeuse pour les principaux domaines skiables de Savoie et Haute Savoie pour mars 2015.....	217
Figure 6-10 : Modèle d'analyse Raster pour la détermination des écosystèmes soumis à une évolution des facteurs température et précipitation.....	219
Figure 6-11 : Carte des zones de pelouse de l'étage subalpin soumises à une évolution du facteur température.....	221
Figure 6-12 : Carte des zones de pelouse de l'étage subalpin soumises à une évolution du facteur précipitation.....	223
Figure 6-13 : Zones de potentiel d'évolution des pelouses de l'étage subalpin en fonction de l'action simultanée des deux facteurs température et précipitation.....	225
Figure 6-14 : Configurateur orienté objet de GéoConcept	227
Figure 6-15 : Scène 3D de l'espace des 3 Vallées et de la zone de probabilité de 100% de potentiel neigeux pour le mois de mars actuel.....	229
Figure 6-16 : Scène 3D de l'espace des 3 Vallées et de la zone de probabilité de 100% de potentiel neigeux pour le mois de mars actuel en scénario A1B.....	229
Figure 6-17 : Vue générale du Chablais et de l'évolution de la zone de 100% de potentiel neigeux entre les mois de mars actuel et mars 2015 en scénario A1B.....	230
Figure 6-18 : Vue latérale (orientée vers la Maurienne) du risque lié aux pelouses subalpines.	231
Figure 6-19 : Vue oblique (orientée vers le Chablais) du risque lié aux pelouses subalpines....	232
Figure 6-20 : Vue orientée vers le Nord de la zone de risque maximale pour les pelouses.....	232

ANNEXES

ORDRE DES ANNEXES

Carte des zones de montagne

Températures moyennes par stations météorologiques

Précipitations moyennes par stations météorologiques

Températures moyennes après simulation

Précipitations moyennes après simulation

Numéros des stations météorologiques (températures)

Comparaison des performances du modèle par station météorologiques

Informations sur les domaines skiables

Cartes des Températures interpolées

Cartes des précipitations interpolées

Validations croisées des cartes de températures

Validations croisées des cartes de températures après simulation

Validation croisée des cartes de précipitations

Cartes des remontées mécaniques pour la Savoie et la Haute-Savoie

Cartes des lits pour la Savoie et la Haute-Savoie

Notation express

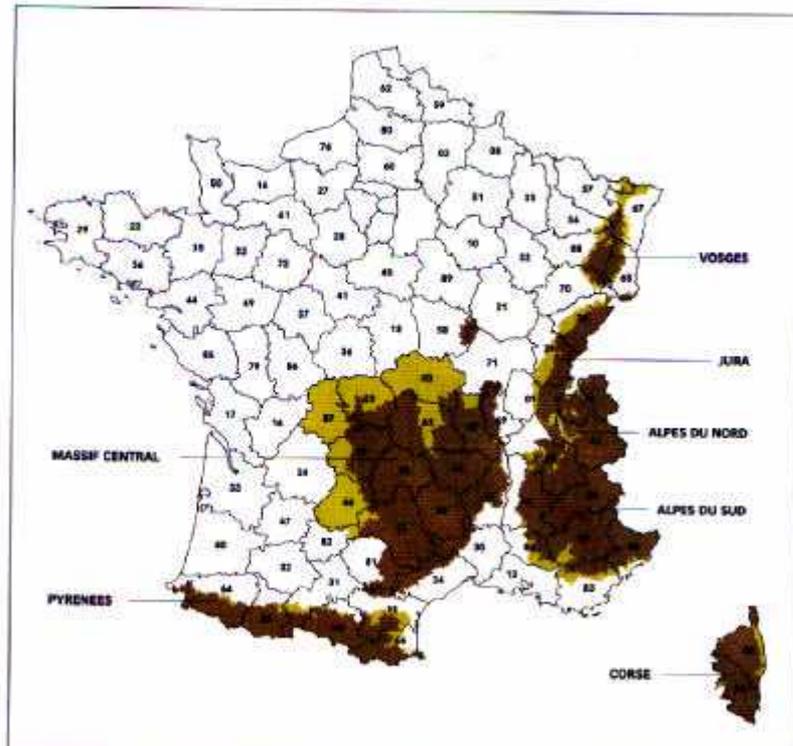
Architecture informatique

Présentation des procédés d'enneigement artificiel

Présentation du calculateur Java Climate Model

ANNEXE

Carte des zones de montagne en France



ZONE MASSIF
ZONE MONTAGNE
(à partir de 700 m et 600 m pour le massif des Vosges)

LE MASSIF : Définition

Par massif, il faut entendre, ainsi que le définit l'article 5 de la loi du 9 janvier 1985, chaque zone de montagne et les zones qui lui sont immédiatement contiguës et formant avec elle une même entité géographique, économique et sociale. Ces massifs, au nombre de 7, sont territorialement délimités par les décrets du 20 septembre 1985.

LA ZONE MONTAGNE : Définition

La zone de montagne est constituée de communes françaises qui sont classées par application du décret 77-566 du 3 juin 1977. Les critères pris en compte sont déterminés par l'arrêté du 28 avril 1976, et le territoire doit répondre aux caractéristiques suivantes : soit l'altitude > 700 m (600 m pour le massif des Vosges), soit la pente moyenne > 20 %, soit une combinaison des 2 facteurs.

SEATM - Juin 1999 - source : SEATM, CEMAGREF, INSEE

source : CEMAGREF

ANNEXE

Les températures moyennes (moyenne sur les 30 ans de mesures de la base ER «30)

NOM	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Aussois	-0.34	-0.30	-0.45	-0.03	0.50	0.87	1.34	1.30	0.99	0.65	0.00	0.00
Beaufort Arêches	-5.18	-4.72	-2.86	1.16	5.05	8.39	10.74	10.39	8.10	4.31	-0.65	-3.61
Bessans	-1.91	-1.65	-1.18	-0.46	0.41	0.53	0.90	0.92	0.45	-0.06	-1.16	-1.81
Bour S.Maurice MN	-4.93	-3.62	-0.60	2.11	6.57	9.64	11.75	11.27	8.96	4.61	0.03	-3.27
Hauteluce Belleville	-6.25	-5.85	-3.42	-0.18	3.71	7.01	9.23	8.78	6.52	3.25	-2.73	-4.53
Lescheraines	-6.32	-5.32	-2.91	1.16	4.39	7.94	9.54	9.27	7.00	3.86	-0.07	-4.15
Moutiers centre ville	-3.69	-2.33	0.76	3.18	8.20	11.41	13.34	12.87	10.07	5.60	0.49	-3.01
Peisey Nancroix	-5.08	-4.46	-2.52	1.46	5.03	8.10	10.57	10.17	7.94	4.36	-0.31	-3.88
Pralognan Les Darbelays	-8.17	-7.57	-4.50	-0.25	3.08	6.25	8.10	8.07	5.54	2.09	-2.43	-6.13
La Rochette Les Cités	-1.47	-0.87	0.10	1.26	2.45	3.59	4.12	4.00	3.27	1.94	0.24	-1.06
St.Alban des Hurtières	-1.33	-0.86	0.26	1.58	4.57	6.17	7.91	7.69	5.99	3.82	1.29	-1.46
Ste Foy le Miroir haut du villae	-2.37	-2.24	-0.71	1.03	3.26	4.81	6.08	5.91	4.82	2.92	0.33	-1.45
St.Michel de Maurienne le Thyl	-4.62	-4.35	-2.07	0.77	4.74	7.75	9.99	9.68	7.63	4.11	-0.63	-3.26
Termignon	-7.69	-7.14	-3.84	-0.87	2.83	5.58	7.11	6.72	4.72	1.77	-2.33	-6.01
Ugine La Savoisienne	-2.84	-1.79	0.34	2.28	6.22	8.64	10.72	10.46	8.13	4.52	0.73	-1.96
Verens Arvey	-1.74	-1.17	0.14	1.41	4.18	6.10	7.64	7.51	5.80	3.50	0.68	-1.76
avrieux	-3.19	-2.61	-1.50	1.12	3.53	5.39	6.99	6.81	5.03	2.38	-0.57	-2.76
Valloire barrage du Ley	-6.00	-5.52	-2.89	0.06	2.75	5.22	6.99	6.89	4.90	1.79	-1.53	-4.32
Lanslebour Mont Cenis	-3.81	-3.61	-2.63	-0.82	0.56	2.39	4.07	3.78	2.51	0.56	-1.26	-2.74
Abondance	-0.16	-0.13	0.00	0.02	0.11	0.19	0.26	0.21	0.20	0.04	-0.07	-0.08
Annecy DDE	-1.68	-1.44	0.16	2.05	5.21	7.42	8.57	8.35	6.73	3.75	0.88	-0.96
Chamonix Le Bouchet	-7.75	-6.22	-3.16	0.18	4.18	7.41	9.11	8.72	6.28	2.47	-1.65	-6.01
Chamonix le Tour	-2.62	-2.73	-1.35	0.01	1.51	2.78	3.48	3.40	2.61	1.01	-0.30	-1.63
Contamine sur Arve	-2.44	-1.56	-0.02	1.93	5.55	8.35	9.80	9.35	7.19	4.32	0.84	-1.36
La Clusaz Les Verriers	-4.76	-4.67	-2.35	0.42	3.31	7.23	9.33	8.95	6.44	3.45	-0.56	-2.97
Cluses	-1.95	-1.26	0.23	1.68	3.86	5.56	6.35	6.27	5.04	2.71	0.55	-1.18
Combloux Le Perret	-4.16	-3.20	-1.21	1.05	4.36	6.92	8.53	8.29	6.43	3.03	-0.42	-3.07
Groisy	-3.86	-3.11	-0.78	1.79	6.20	9.28	11.56	11.15	8.88	4.95	0.28	-2.47
Mégève Maison Forestière	-7.24	-6.59	-3.48	0.21	3.88	7.16	8.89	8.49	6.16	2.04	-1.71	-4.95
Rumilly	-3.48	-2.44	-0.09	2.13	7.25	10.83	12.79	12.32	9.63	5.49	0.75	-1.75
Samoens (La Jaysinia ?)	-2.65	-2.48	-0.83	0.37	1.91	3.25	3.89	3.69	2.95	1.08	-0.54	-1.78
Thones	-2.82	-2.02	-0.58	1.07	3.29	5.25	6.13	5.85	4.65	2.54	0.59	-1.74
Thonon les Bains Rives	-1.02	-0.82	1.57	3.46	9.03	12.43	14.19	13.76	11.07	7.44	2.58	0.47

ANNEXE

Les précipitations moyennes (moyenne sur les 30 ans de mesures de la base ER «30)

nom de la station	janv	fev	mars	avr	mai	juin	juill	aout	sept	oct	nov	dec
albertville	125.00	124	100	87	90	108	93	106	94	98	124	130
Aussois_(84_reconstitue)	69.00	78	56	49	52	55	41	56	49	58	66	77
Beaufort-sur-Doron_(Areches)	124.00	126	101	92	100	127	136	143	111	103	136	146
le_bourget_en_huile	118.00	115	104	99	106	115	106	123	109	100	126	124
Bourg_st_Maurice_MN	99.00	103	72	57	63	77	73	82	66	71	94	105
Brides_les_Bains	76.00	80	54	54	49	64	65	76	61	54	86	77
challes_les_eaux_(aerodrome)	88.00	91	85	75	87	102	93	106	98	84	106	99
Les_Deserts	134.00	147	117	114	115	136	120	138	132	110	158	148
hauteluce_(belleville)	165.00	173	131	119	131	150	141	153	128	121	156	172
lescheraines_(le_pont)	113.00	112	105	100	117	129	112	120	111	104	125	116
montgellafrey	102.00	109	82	81	87	96	83	102	76	84	103	106
moutiers	96.00	97	76	61	58	71	63	78	63	67	94	104
Pralognan_la_vanoise	94.00	97	83	79	91	99	90	98	81	85	93	96
la_rochette	97.00	94	85	81	93	102	90	104	92	92	103	98
st_alban_des_hurtieres	120.00	120	99	99	105	111	108	117	103	96	130	127
st_jean_d'arves_(entraigues)	82.00	79	71	62	72	79	67	79	71	71	94	87
st_jean_de_belleville_(bourg)	95.00	101	75	63	61	70	84	83	68	68	99	105
ste_marie_de_cuines_(le_glandon)	106.00	106	79	66	62	69	65	80	68	75	102	106
st_martin_de_la_porte	72.00	71	51	45	57	59	56	65	57	54	75	76
St_michel_de_maurienne-le_thyl	98.00	100	77	71	69	68	59	73	64	75	90	97

avrieux	47.00	51	39	35	46	48	37	49	48	52	55	54
Bessans	78.00	83	70	73	77	75	47	72	60	78	82	87
termignon	60.00	59	52	50	60	59	41	58	54	61	62	62
valloire	81.00	83	62	57	65	62	58	70	60	66	79	85
ayse(les_mesieres)	82.00	78	77	82	109	133	103	120	106	89	99	81
le_biot	111.00	115	89	109	120	148	121	164	126	101	148	121
chamonix(le_bouchet)	102.00	103	89	79	102	117	118	135	99	95	112	109
Les_Contamines_Montjoie	101.00	104	80	88	103	130	148	160	114	89	131	104
la_clusaz	159.00	151	129	118	133	154	129	146	134	127	160	164
megeve	117.00	128	93	96	103	125	128	145	120	91	145	130
morzine	130.00	131	102	111	114	148	135	159	125	100	159	137
rumilly	84.00	94	79	79	82	105	86	107	108	84	131	94
samoens	129.00	139	107	110	117	152	146	168	135	100	159	136
thones	155.00	165	125	125	118	153	130	182	149	124	185	168
thonon_(Rives_puis_Chemin_vieux)	68.00	63	68	67	92	103	73	108	92	78	89	68
Groisy_(Ecole_puis_Gare)	115.00	112	106	94	115	119	95	119	113	109	127	123
Combloux	112.00	119	81	84	85	106	111	125	106	82	136	118
les_gets	168.00	162	133	116	131	152	137	157	138	132	178	181

ANNEXE

Simulation JCM pour les températures

NOM	janvier	fevrier	mars	avril	mai	juin	juillet	aout	septembre	octobre	nov	dec
Aussois	0.54	0.46	0.08	0.27	0.91	1.13	2.10	2.45	1.99	1.26	0.76	0.69
Beaufort Arêches	-4.30	-3.96	-2.33	1.46	5.46	8.65	11.50	11.54	9.10	4.92	0.11	-2.92
Bessans	-1.03	-0.89	-0.65	-0.16	0.82	0.79	1.66	2.07	1.45	0.55	-0.40	-1.12
Bour S.Maurice MN	-4.05	-2.86	-0.07	2.41	6.98	9.90	12.51	12.42	9.96	5.22	0.79	-2.58
Hauteluze Belleville	-5.37	-5.09	-2.89	0.12	4.12	7.27	9.99	9.93	7.52	3.86	-1.97	-3.84
Lescheraines	-5.44	-4.56	-2.38	1.46	4.80	8.20	10.30	10.42	8.00	4.47	0.69	-3.46
Moutiers centre ville	-2.81	-1.57	1.29	3.48	8.61	11.67	14.10	14.02	11.07	6.21	1.25	-2.32
Peisey Nancroix	-4.20	-3.70	-1.99	1.76	5.44	8.36	11.33	11.32	8.94	4.97	0.45	-3.19
Pralognan Les Darbelays	-7.29	-6.81	-3.97	0.05	3.49	6.51	8.86	9.22	6.54	2.70	-1.67	-5.44
La Rochette Les Cités	-0.59	-0.11	0.63	1.56	2.86	3.85	4.88	5.15	4.27	2.55	1.00	-0.37
St.Alban des Hurtières	-0.45	-0.10	0.79	1.88	4.98	6.43	8.67	8.84	6.99	4.43	2.05	-0.77
Ste Foy le Miroir haut du villae	-1.49	-1.48	-0.18	1.33	3.67	5.07	6.84	7.06	5.82	3.53	1.09	-0.76
St.Michel de Maurienne le Thyl	-3.74	-3.59	-1.54	1.07	5.15	8.01	10.75	10.83	8.63	4.72	0.13	-2.57
Termignon	-6.81	-6.38	-3.31	-0.57	3.24	5.84	7.87	7.87	5.72	2.38	-1.57	-5.32
Ugine La Savoisiene	-1.96	-1.03	0.87	2.58	6.63	8.90	11.48	11.61	9.13	5.13	1.49	-1.27
Verens Arvey	-0.86	-0.41	0.67	1.71	4.59	6.36	8.40	8.66	6.80	4.11	1.44	-1.07
avrieux	-2.31	-1.85	-0.97	1.42	3.94	5.65	7.75	7.96	6.03	2.99	0.19	-2.07
Valloire barrage du Ley	-5.12	-4.76	-2.36	0.36	3.16	5.48	7.75	8.04	5.90	2.40	-0.77	-3.63
Lanslebour Mont Cenis	-3.12	-2.88	-2.14	-0.56	0.93	2.61	4.91	4.97	3.51	1.21	-0.50	-2.13
Abondance	0.53	0.60	0.49	0.28	0.48	0.41	1.10	1.40	1.20	0.69	0.69	0.53
Annecy DDE	-0.99	-0.71	0.65	2.31	5.58	7.64	9.41	9.54	7.73	4.40	1.64	-0.35
Chamonix Le Bouchet	-7.06	-5.49	-2.67	0.44	4.55	7.63	9.95	9.91	7.28	3.12	-0.89	-5.40
Chamonix le Tour	-1.93	-2.00	-0.86	0.27	1.88	3.00	4.32	4.59	3.61	1.66	0.46	-1.02
Contamine sur Arve	-1.75	-0.83	0.47	2.19	5.92	8.57	10.64	10.54	8.19	4.97	1.60	-0.75
La Clusaz Les Verriers	-4.07	-3.94	-1.86	0.68	3.68	7.45	10.17	10.14	7.44	4.10	0.20	-2.36
Cluses	-1.26	-0.53	0.72	1.94	4.23	5.78	7.19	7.46	6.04	3.36	1.31	-0.57
Combloux Le Perret	-3.47	-2.47	-0.72	1.31	4.73	7.14	9.37	9.48	7.43	3.68	0.34	-2.46
Groisy	-3.17	-2.38	-0.29	2.05	6.57	9.50	12.40	12.34	9.88	5.60	1.04	-1.86
Mégève Maison Forestière	-6.55	-5.86	-2.99	0.47	4.25	7.38	9.73	9.68	7.16	2.69	-0.95	-4.34
Rumilly	-2.79	-1.71	0.40	2.39	7.62	11.05	13.63	13.51	10.63	6.14	1.51	-1.14
Samoens (La Jaysinia ?)	-1.96	-1.75	-0.34	0.63	2.28	3.47	4.73	4.88	3.95	1.73	0.22	-1.17
Thones	-2.13	-1.29	-0.09	1.33	3.66	5.47	6.97	7.04	5.65	3.19	1.35	-1.13
Thonon les Bains Rives	-0.33	-0.09	2.06	3.72	9.40	12.65	15.03	14.95	12.07	8.09	3.34	1.08

Résultat de JCM

Lat	Long	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
6°	46°	0.88	0.76	0.53	0.30	0.41	0.26	0.76	1.15	1	0.61	0.76	0.69
6°	45°	0.69	0.73	0.49	0.26	0.37	0.22	0.84	1.19	1	0.65	0.76	0.61

ANNEXE

Simulation JCM pour les précipitations

nom	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Albertville	144.3	141.3	113	83.44	67.65	74.98	68.36	66.63	80.03	92.412	141.272	144.986
Aussois_(84_reconstitue)	88.3	95.27	68.95	45.44	29.65	21.98	16.36	16.63	35.03	52.412	83.272	91.986
Beaufort-sur-Doron_(Areches)	143.3	143.3	114	88.44	77.65	93.98	111.4	103.6	97.03	97.412	153.272	160.986
le_bourget_en_huile	137.3	132.3	117	95.44	83.65	81.98	81.36	83.63	95.03	94.412	143.272	138.986
Bourg_st_Maurice_MN	118.3	120.3	84.95	53.44	40.65	43.98	48.36	42.63	52.03	65.412	111.272	119.986
Brides_les_Bains	95.3	97.27	66.95	50.44	26.65	30.98	40.36	36.63	47.03	48.412	103.272	91.986
Challes_les_eaux_(aerodrome)	107.3	108.3	97.95	71.44	64.65	68.98	68.36	66.63	84.03	78.412	123.272	113.986
Les_Deserts	153.3	164.3	130	110.4	92.65	103	95.36	98.63	118.03	104.41	175.272	162.986
Hauteluce_(belleville)	184.3	190.3	144	115.4	108.6	117	116.4	113.6	114.03	115.41	173.272	186.986
Lescheraines_(le_pont)	132.3	129.3	118	96.44	94.65	95.98	87.36	80.63	97.03	98.412	142.272	130.986
Montgellafrey	121.3	126.3	94.95	77.44	64.65	62.98	58.36	62.63	62.03	78.412	120.272	120.986
Moutiers	115.3	114.3	88.95	57.44	35.65	37.98	38.36	38.63	49.03	61.412	111.272	118.986
Pralognan_la_vanoise	113.3	114.3	95.95	75.44	68.65	65.98	65.36	58.63	67.03	79.412	110.272	110.986
la_Rochette	116.3	111.3	97.95	77.44	70.65	68.98	65.36	64.63	78.03	86.412	120.272	112.986
st_Alban_des_hurtieres	139.3	137.3	112	95.44	82.65	77.98	83.36	77.63	89.03	90.412	147.272	141.986
st_Jean_d'arves_(entraigues)	101.3	96.27	83.95	58.44	49.65	45.98	42.36	39.63	57.03	65.412	111.272	101.986
st_Jean_de_belleville_(bourg)	114.3	118.3	87.95	59.44	38.65	36.98	59.36	43.63	54.03	62.412	116.272	119.986
ste_Marie_de_cuines_(le_glandon)	125.3	123.3	91.95	62.44	39.65	35.98	40.36	40.63	54.03	69.412	119.272	120.986
st_Martin_de_la_porte	91.3	88.27	63.95	41.44	34.65	25.98	31.36	25.63	43.03	48.412	92.272	90.986
St_Michel_de_maurienne-le_thyl	117.3	117.3	89.95	67.44	46.65	34.98	34.36	33.63	50.03	69.412	107.272	111.986
Avrieux	66.3	68.27	51.95	31.44	23.65	14.98	12.36	9.63	34.03	46.412	72.272	68.986
Bessans	97.3	100.3	82.95	69.44	54.65	41.98	22.36	32.63	46.03	72.412	99.272	101.986
Termignon	79.3	76.27	64.95	46.44	37.65	25.98	16.36	18.63	40.03	55.412	79.272	76.986
Valloire	100.3	100.3	74.95	53.44	42.65	28.98	33.36	30.63	46.03	60.412	96.272	99.986
Ayse(les_mesieres)	103.3	95.27	77.51	65.74	65.57	87.53	67.95	78.6	87.712	85.444	103.572	91.922
le_Biot	132.3	132.3	89.51	92.74	76.57	102.5	85.95	122.6	107.712	97.444	152.572	131.922
Chamonix(le_bouchet)	123.3	120.3	89.51	62.74	58.57	71.53	82.95	93.6	80.712	91.444	116.572	119.922
Les_Contamines_Montjoie	122.3	121.3	80.51	71.74	59.57	84.53	112.9	118.6	95.712	85.444	135.572	114.922
la_Clusaz	180.3	168.3	129.5	101.7	89.57	108.5	93.95	104.6	115.712	123.44	164.572	174.922
Megeve	138.3	145.3	93.51	79.74	59.57	79.53	92.95	103.6	101.712	87.444	149.572	140.922
Morzine	151.3	148.3	102.5	94.74	70.57	102.5	99.95	117.6	106.712	96.444	163.572	147.922
Rumilly	105.3	111.3	79.51	62.74	38.57	59.53	50.95	65.6	89.712	80.444	135.572	104.922
Samoens	150.3	156.3	107.5	93.74	73.57	106.5	110.9	126.6	116.712	96.444	163.572	146.922
Thones	176.3	182.3	125.5	108.7	74.57	107.5	94.95	140.6	130.712	120.44	189.572	178.922
Thonon_(Rives_puis_Chemin_vieux)	89.34	80.27	68.51	50.74	48.57	57.53	37.95	66.6	73.712	74.444	93.572	78.922
Groisy_(Ecole_puis_Gare)	136.3	129.3	106.5	77.74	71.57	73.53	59.95	77.6	94.712	105.44	131.572	133.922
Combloux	133.3	136.3	81.51	67.74	41.57	60.53	75.95	83.6	87.712	78.444	140.572	128.922
les_Gets	189.3	179.3	133.5	99.74	87.57	106.5	101.9	115.6	119.712	128.44	182.572	191.922

Résultats de JCM

lat	long	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
6°	46	19.3	17.27	12.95	-3.556	-22.35	-33.02	-24.64	-39.37	-13.97	-5.588	17.272	14.986
6°	45	21.34	17.27	0.508	-16.26	-43.43	-45.47	-35.05	-41.402	-18.288	-3.556	4.572	10.922

ANNEXE

NUMEROTATION DES STATIONS METEOROLOGIQUES (Températures)

N° de la Station	Nom de la station
1	Aussois
2	Beaufort Arèches
3	Bessans
4	Bour S.Maurice MN
5	Hauteluce Belleville
6	Lescheraines
7	Moutiers centre ville
8	Peisey Nancroix
9	Pralognan Les Darbelays
10	La Rochette Les Cités
11	St.Alban des Hurtières
12	Ste Foy le Miroir haut du villae
13	St.Michel de Maurienne le Thyl
14	Termignon
15	Ugine La Savoisienne
16	Verens Arvey
17	avrieux
18	Valloire barrage du Ley
19	Lanslebour Mont Cenis
20	Abondance
21	Annecy DDE
22	Chamonix Le Bouchet
23	Chamonix le Tour
24	Contamine sur Arve
25	La Clusaz Les Verriers
26	Cluses
27	Combloux Le Perret
28	Groisy
29	Mégève Maison Forestière
30	Rumilly
31	Samoens (La Jaysinia ?)
32	Thones
33	Thonon les Bains Rives

ANNEXE

Comparaison des performances du modèle par station

Les valeurs surlignées en gris dans la dernière colonne montrent les stations retenues pour l'analyse spatiale en logique floue de la dernière partie

	Moyenne	Médiane	Ecart type	Ecart Modèle/Réel en T°
Aussois	0.38	0.25	0.6453361	1.24
Modèle	1.62096653	1.699237058	4.5215764	
Beaufort	2.60	2.74	5.9908441	-0.57
Modèle	2.027833821	1.987525317	4.2717095	
Bessans	-0.42	-0.26	1.0783169	2.17
Modèle	1.755139716	1.759956555	4.1202032	
Bourg st maurice	3.54	3.36	6.0666034	-1.57
Modèle	1.976820194	1.949391615	4.2151296	
Hautluce Belleville	1.29	1.53	5.8075198	0.68
Modèle	1.972755717	1.941712851	4.1834749	
Lescheraines	2.03	2.51	5.7908898	0.19
Modèle	2.220876389	2.133911675	4.2667083	
Moutier	4.74	4.39	6.3465063	-2.69
Modèle	2.046291448	2.007550809	4.2453579	
Peisey Nancroix	2.62	2.91	5.8424864	-0.72
Modèle	1.890879333	1.863549531	4.2049903	
Pralo	0.34	0.92	6.0365647	1.67
Modèle	2.005598796	1.966214466	4.2423154	
La rochette	1.46	1.60	2.0515291	0.75
Modèle	2.21283022	2.142534963	4.3274935	
St alban	2.97	2.70	3.4924364	-0.90
Modèle	2.06727637	2.029191945	4.2745164	
St foy le miroir	1.87	1.97	3.1641106	0.03
Modèle	1.89877011	1.881994837	4.2782663	
St michel de maurienne	2.48	2.44	5.506679	-0.48
Modèle	1.994937035	1.967330993	4.2746722	
Termignon	0.07	0.45	5.4550746	1.90
Modèle	1.973808951	1.944721255	4.1707106	
Ugine la Savoisième	3.79	3.40	4.9810956	-1.60
Modèle	2.183355684	2.129595818	4.3390071	
Verens Arvey	2.69	2.46	3.548175	-0.49
Modèle	2.203675379	2.150727222	4.4028568	
Avrieux	1.72	1.75	3.8212239	0.21
Modèle	1.92740762	1.909256244	4.2450633	
Valloire	0.70	0.92	4.7520082	1.27
Modèle	1.968891653	1.944023581	4.2101335	
Lanslebourg	-0.08	-0.13	2.8227263	2.03
Modèle	1.944310681	1.941551384	4.3327299	
Abondance	0.05	0.03	0.1426054	2.07
Modèle	2.12311087	2.074148142	4.3742633	
Annecy	3.25	2.90	3.914264	-1.08
Modèle	2.171354528	2.11237709	4.26782	
Chamonix le Bouchet	1.13	1.32	6.1001523	0.94
Modèle	2.065065031	2.019199078	4.2473401	
Chamonix le tour	0.51	0.51	2.2808135	1.48
Modèle	1.997014341	1.970561528	4.3247562	
Contamine sur arve	3.50	3.13	4.4965509	-1.31
Modèle	2.185432841	2.121352268	4.2876365	
La Clusaz	1.98	1.86	5.1869733	0.09
Modèle	2.070797224	2.031934883	4.3083065	
Cluses	2.32	2.20	3.067204	-0.16
Modèle	2.158851547	2.091997559	4.2558666	
Combloux le perret	2.21	2.04	4.669356	-0.15
Modèle	2.067659119	2.028964815	4.2967155	
Groisy	3.66	3.37	5.7218258	-1.57
Modèle	2.089481619	2.035392713	4.1598969	
Megève	1.07	1.13	5.8866664	0.98
Modèle	2.046166735	2.007534374	4.2013431	
Rumilly	4.45	3.81	6.0039958	-2.29
Modèle	2.16200697	2.11341971	4.2423189	
Samoens	0.74	0.73	2.4082485	1.42
Modèle	2.157096003	2.098509865	4.2754255	
Thones	1.85	1.80	3.2193015	0.32
Modèle	2.172609339	2.109903458	4.2870699	
Thonon les bains	6.18	5.45	5.7947978	-4.16
Modèle	2.018628641	1.97261573	4.128762	

ANNEXE

Informations sur les domaines skiables de Savoie et Haute Savoie (parmi les 100 premiers français en chiffre d'affaire)

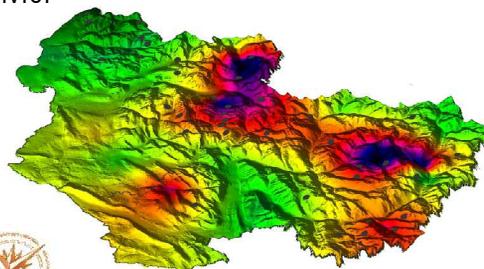
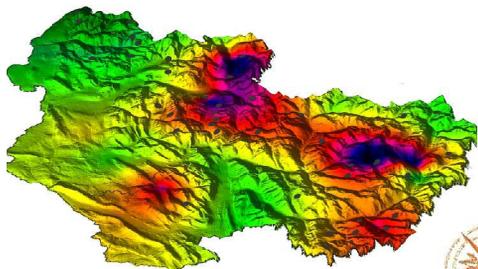
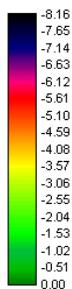
Domaine	Departement	Exploitant	Statut	CA	Nbre pistes	RM	Moment de puissance	Emploi permanents	Emploi saisonniers	lits	Nombre de journées skieurs
Courchevel-méribel mottaret	Savoie	S3V	SEM	56940000	137	68	31776	130	409	62000	2189246
La Plagne	Savoie	SAP	SA	50526000	125	109	30878	126	582	46589	2678160
Val-Thorens	Savoie	SETAM-STOR	SA	39685042	59	30	20024	65	136	24500	1813280
Les Arcs	Savoie	SMA	SA	36324000	143	61	22951	99	416	39981	1913899
Val d'Isère	Savoie	STVI	SAS	35070896	70	49	22157	55	178	27076	1626973
Tignes	Savoie	STGM	SA	33552000	65	48	24445	204	190	26200	1650450
Les Ménuires	Savoie	SEVABEL	SA	32064000	62	42	19686	50	253	25950	1422533
Méribel les allues	Savoie	Méribel-Alpina SA	SA	25260000	39	33	12862	51	182	20562	1071213
Valmorel	Savoie	Dom Skiable Valmorel	SAS	9948055	55	39	10017	40	150	8500	613553
La Rosière	Savoie	Régie tour Autonome	Et public	4849947	32	21	5536	22	72	7500	361460
Pralognan la vanoise	Savoie	SOGESPAL	Régie	1936103	22	13	4095	29	49	6500	166161
Les Saisies	Savoie	Régie des Saisies	Régie	7513602	30	25	5564	27	95	14000	X
Arèche-Beaufort	Savoie	SEMAB	SEM	2057452	30	15	2546	15	60	6000	219200
Valloire	Savoie	RTV	Régie	6860206	74	35	7485	26	110	13500	X
Val-Cenis	Savoie	Syndicat Intercommunal	Autre	4664940	43	22	6735	15	90	7500	399256
La Toussuire	Savoie	SOREMET	SA	3954528	29	16	3685	8	50	8000	277000
Le Corbier St Jean d'Arves	Savoie	SATVAC	SA	3803130	62	25	5368	15	65	9000	X
St François Lonchamp	Savoie	SAGLAT	SA	3575420	26	16	4331	15	70	6000	249490
Valmenier	Savoie	SEMVAL	SAS	3155695	32	14	4745	17	59	4500	279277
Les Karellis	Savoie	Régie autonome RM	Régie	2632601	28	17	3842	11	50	2600	275796
St Sorlin d'Arves	Savoie	SAMSO	SA	2371096	27	14	3411	6	54	4400	X
Valfréjus	Savoie	Transmontagne	SA	2190800	20	12	2942	9	43	4300	270231
La Norma	Savoie	SOGENOR	SEM	1767286	27	16	3563	17	75	4200	160000
Aussois	Savoie	RET	Régie	1740053	21	11	2193	19	71	3000	167173
Bonneval sur Arc	Savoie	Régie municipale RM	Régie	951354	22	10	1815	1	34	1800	83027
Albiez Montrond	Savoie	Régie communale RM	Régie	804016	26	12	2558	6	37	2600	93421
Crest Volland-Cohennoz	Savoie	SA la Métairie	SA	2531541	26	16	2814	5	46	6500	219572
Notre Dame de Bellecombe	Savoie	SEMND de Bellecombe	SEM	1992603	31	19	4095	X	X	7500	168538
Les Aillons	Savoie	SAEM des Bauges	SEM	1625869	42	23	1268	8	60	3620	165327

Chamonix	Haute Savoie	CMB	SA	34676720	111	42	20709	201	415	50000	1097257
Megève	Haute Savoie	SEM des RM megève	SEM	13172204	137	81	13168	60	273	40208	1873095
Les Contamines Montjoies	Haute Savoie	SECMH	SA	7271818	44	25	7323	32	100	14000	620000
Les Houches	Haute Savoie	SEPP	SA	3963674	22	14	3877	15	55	8500	280000
Combloux	Haute Savoie	SAEM Combloux	SEM	3000001	35	13	3346	7	70	9500	217137
Praz sur Arly	Haute Savoie	SDT	SEM	1749810	27	12	2666	7	50	9000	158673
Avoriaz	Haute Savoie	SERMA	SNC	26446677	47	37	13443	42	232	16200	1300611
Chatel	Haute Savoie	SEMRM Chatel	SEM	14443545	72	41	10294	48	237	18000	768451
Les Gets	Haute Savoie	SA GETS SAEM	SEM	8810803	65	26	8150	35	135	12000	576575
Morzine	Haute Savoie	SA Téléphérique Morzine Pleney	SA	6097961	80	23	8083	X	X	16000	418063
Bellevalux -Hirmentaz	Haute Savoie	SESAT SAEML	SEM	899449	34	23	2579	3	31	4145	X
Bernex	Haute Savoie	Régie communale RM	Régie	780383	19	12	2725	4	38	5000	X
Thollon les Mémises	Haute Savoie	SATEM SEREML	SA	697989	14	17	2128	7	50	5000	38756
Flaine-Morillon- Samoens-Sixt	Haute Savoie	Groupe Grand Massif DEV	SA	19585000	106	61	17134	68	297	37500	X
Les Carroz d'Arraches	Haute Savoie	SEM SOREMAC	SEM	5769997	28	15	4835	21	70	14000	1151341
La Clusaz	Haute Savoie	SATELC	SEM	10549472	85	31	12143	33	168	20000	367902
Le Grand Bornand	Haute Savoie	SAEM	SEM	9116451	47	40	11322	30	142	19400	742398
Manigod- Croix- Fry	Haute Savoie	SARL Les téléphérique Croix Fry	SARL	1110722	26	9	1763	2	23	7823	690020

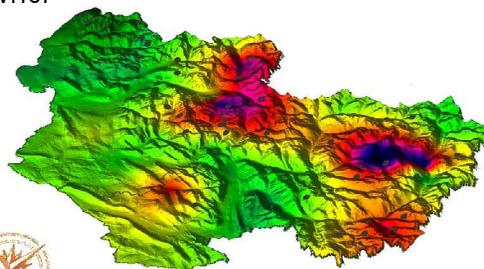
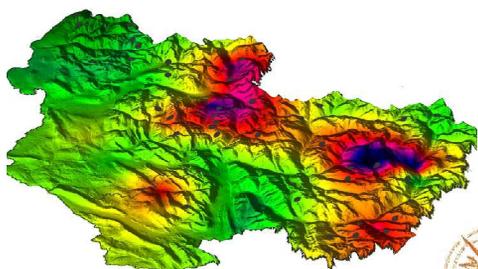
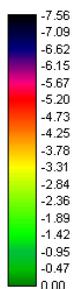
SITUATION MOYENNE MENSUELLE

SIMULATION POUR 2015

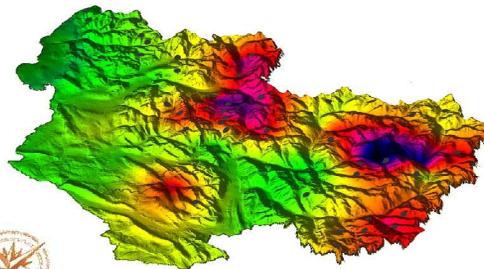
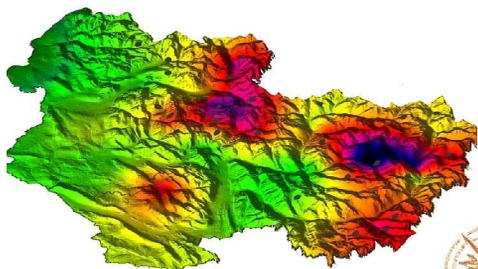
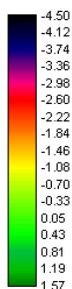
Janvier



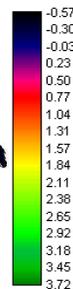
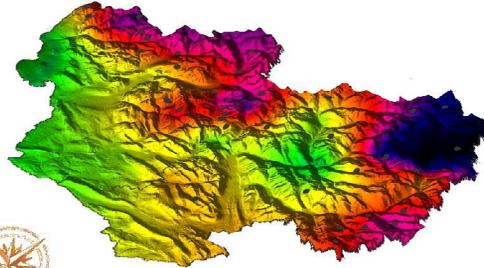
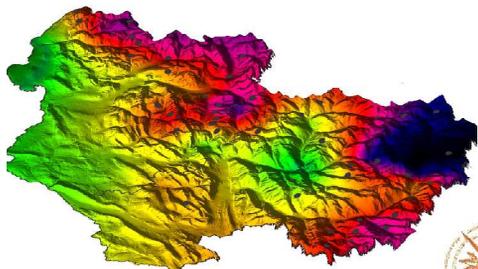
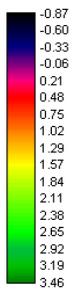
Février



Mars



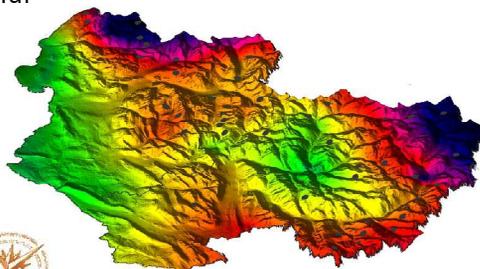
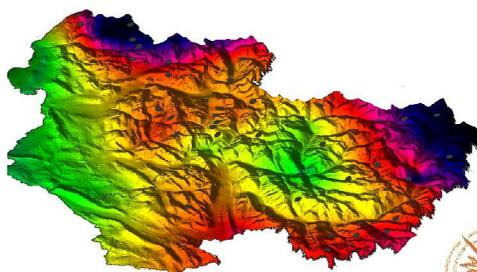
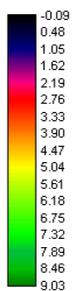
Avril



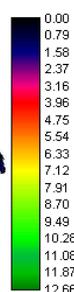
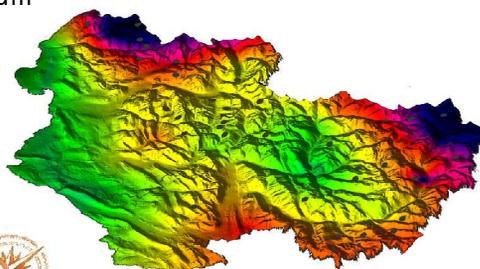
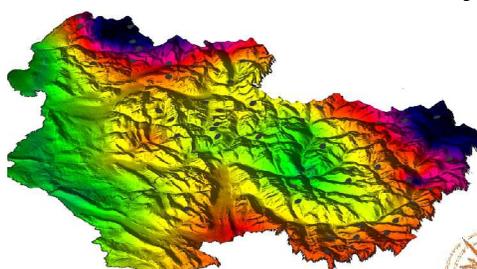
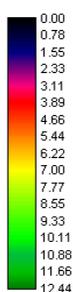
SITUATION MOYENNE MENSUELLE

SIMULATION POUR 2015

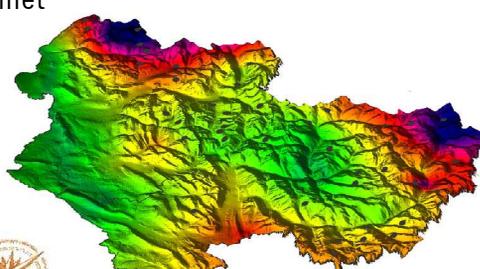
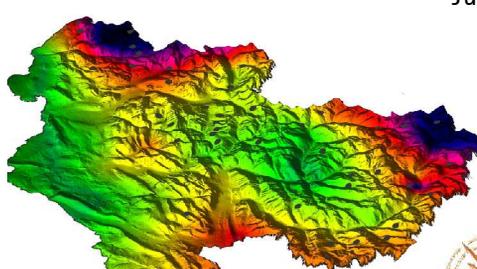
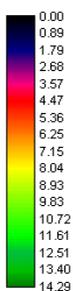
Mai



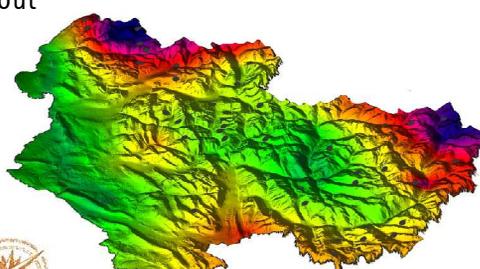
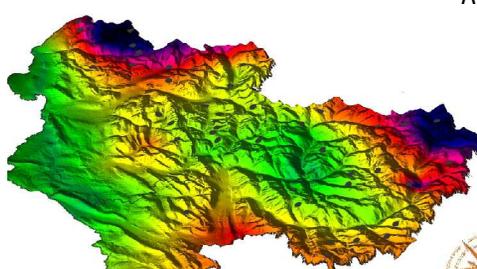
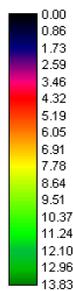
Juin



Juillet



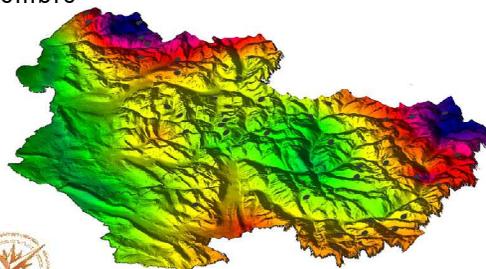
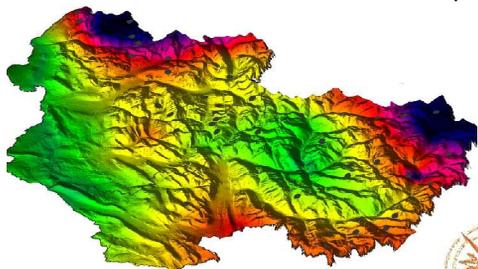
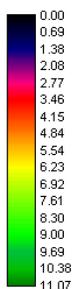
Août



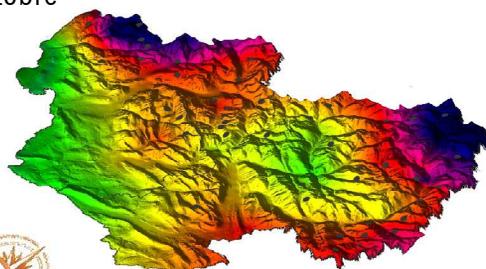
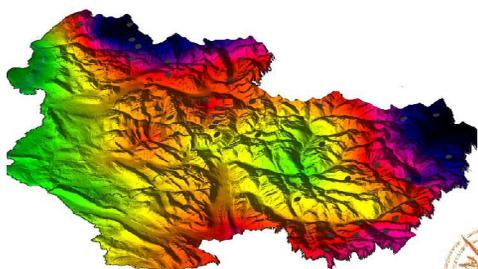
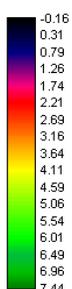
SITUATION MOYENNE MENSUELLE

SIMULATION POUR 2015

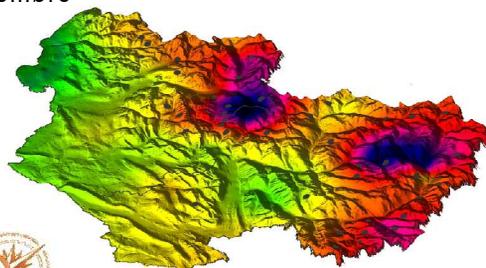
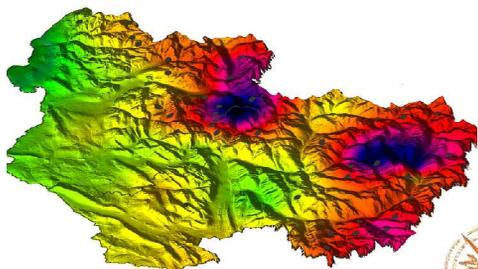
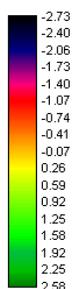
Septembre



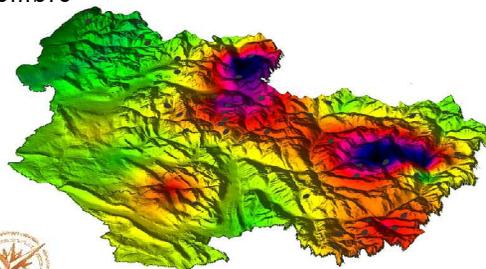
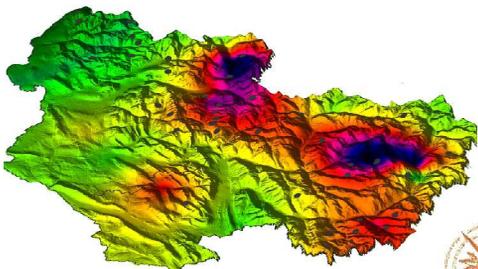
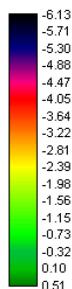
Octobre



Novembre



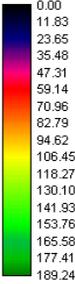
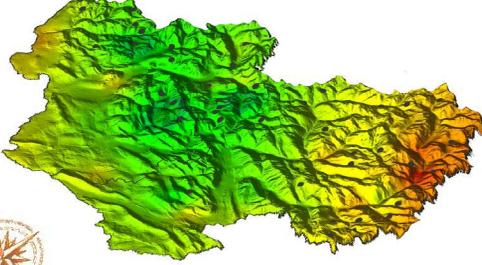
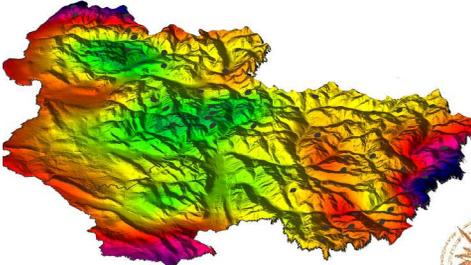
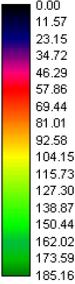
Décembre



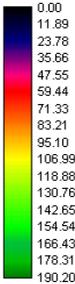
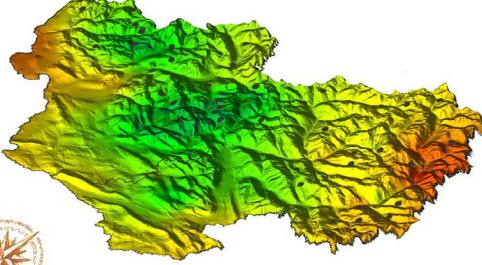
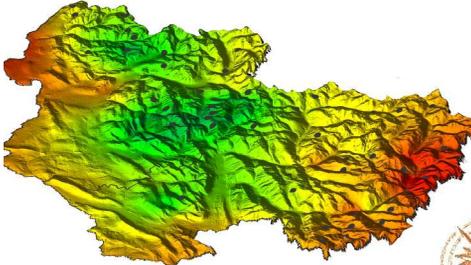
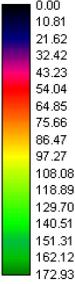
SITUATION MOYENNE MENSUELLE

SIMULATION POUR 2015

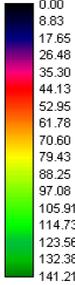
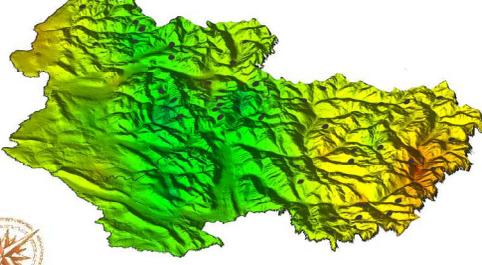
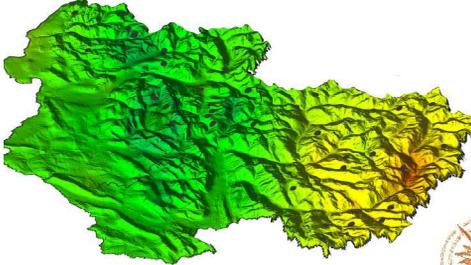
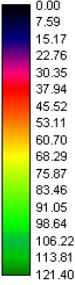
Janvier



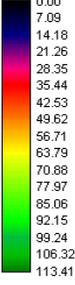
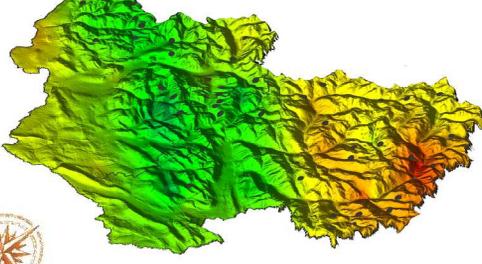
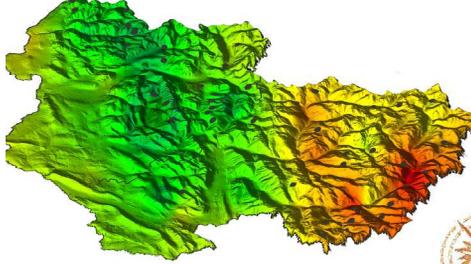
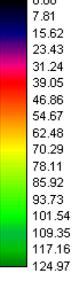
Février



Mars



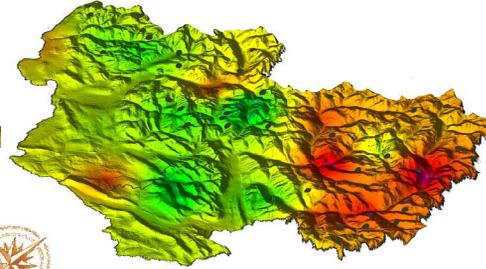
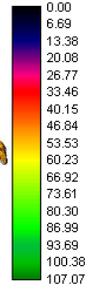
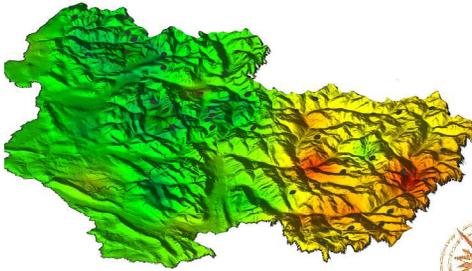
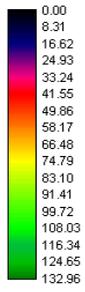
Avril



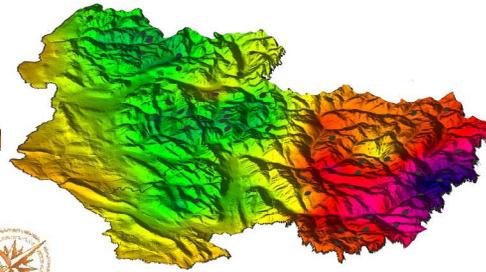
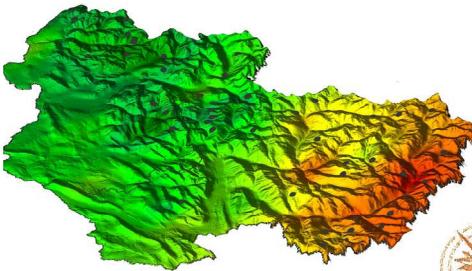
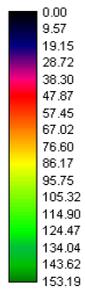
SITUATION MOYENNE MENSUELLE

SIMULATION POUR 2015

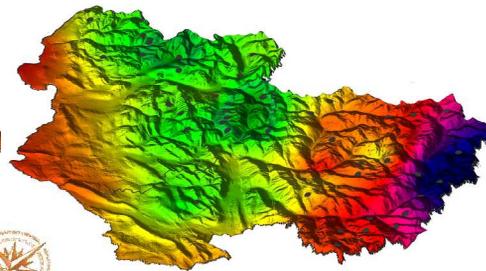
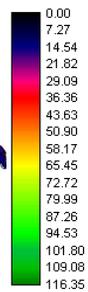
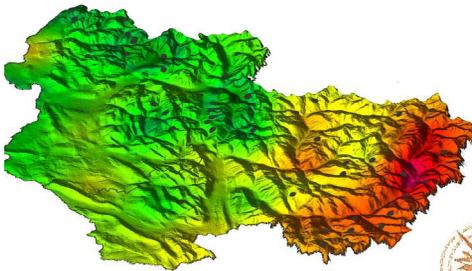
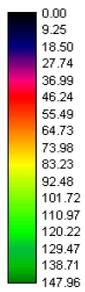
Mai



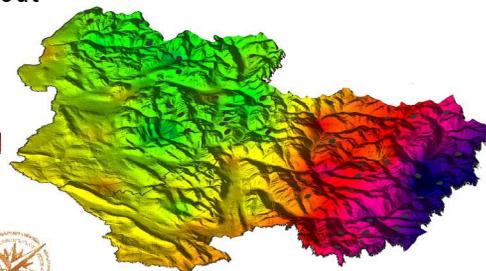
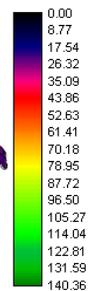
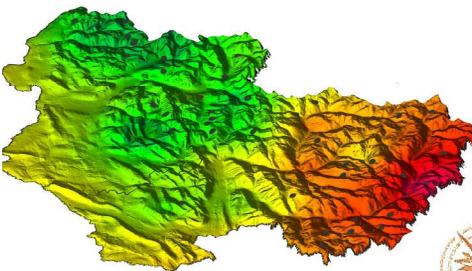
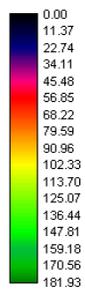
Juin



Juillet



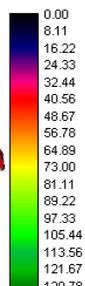
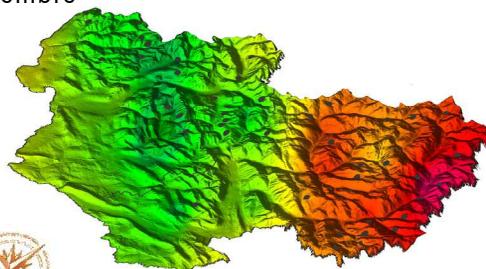
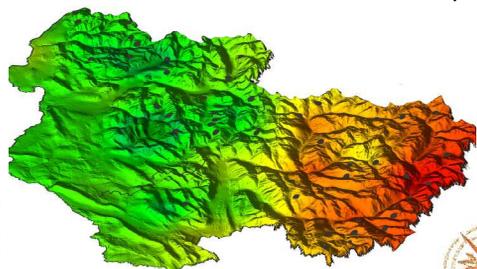
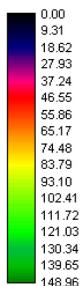
Août



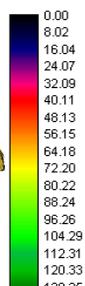
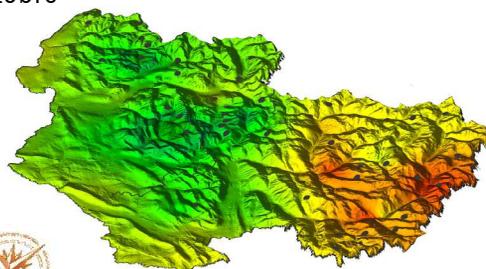
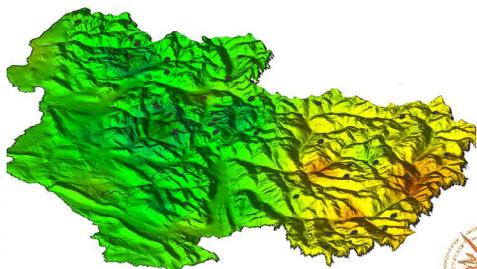
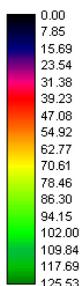
SITUATION MOYENNE MENSUELLE

SIMULATION POUR 2015

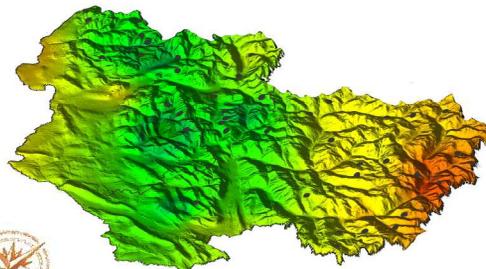
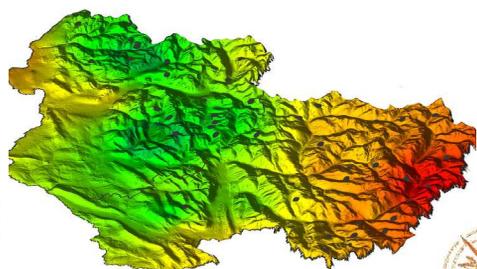
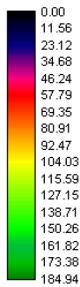
Septembre



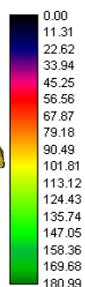
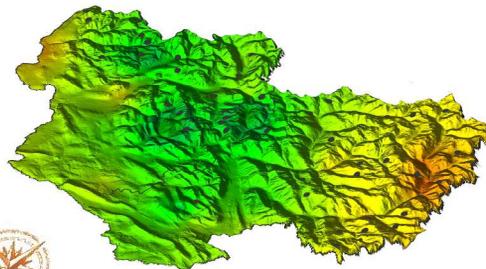
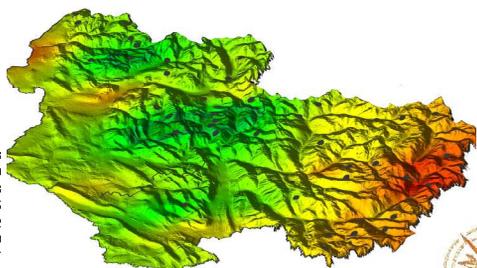
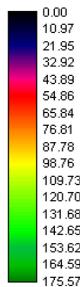
Octobre



Novembre



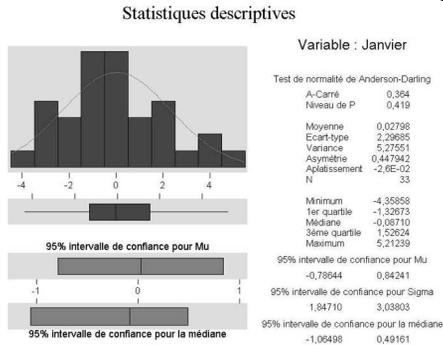
Décembre



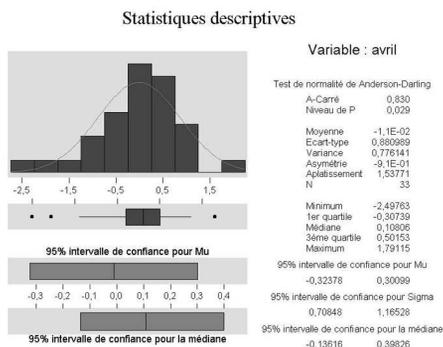
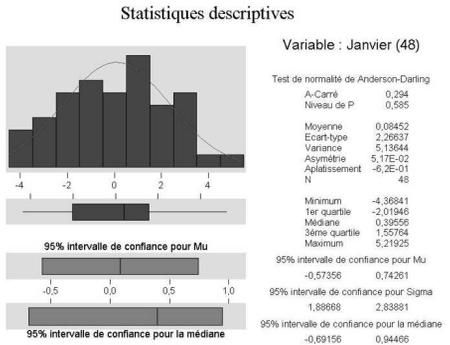
Annexes - Exemples de validation croisées : interpolation des températures

VALIDATION CROISEE SANS AJOUT DE STATIONS VIRTUELLES

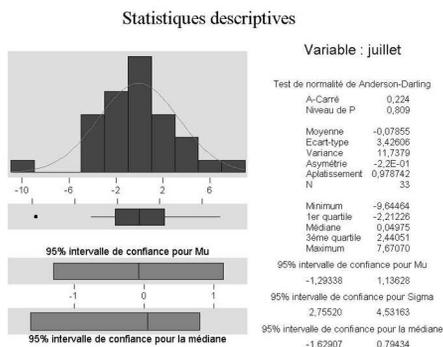
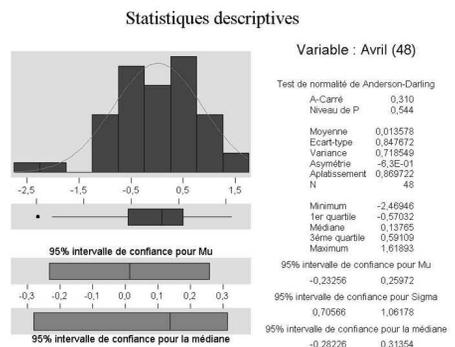
Janvier



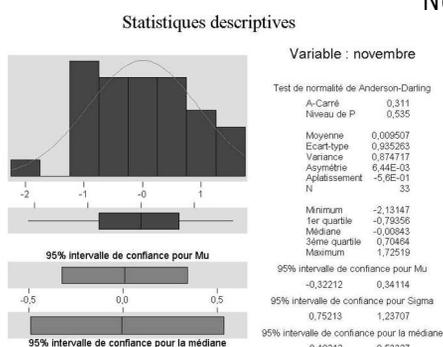
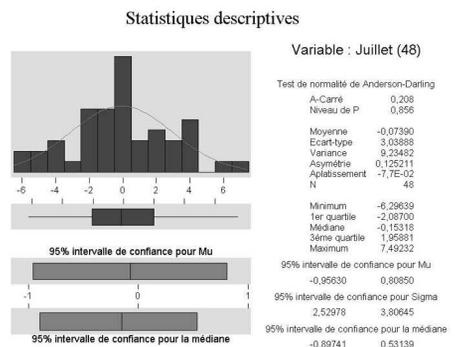
VALIDATION CROISEE AVEC AJOUT DE STATIONS VIRTUELLES



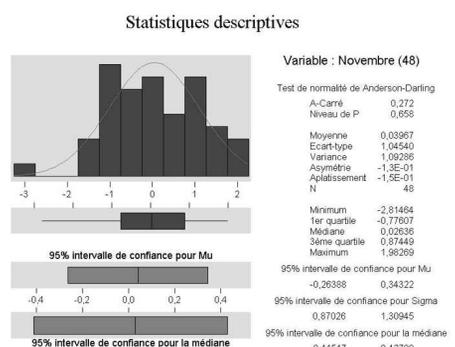
Avril



Juillet



Novembre

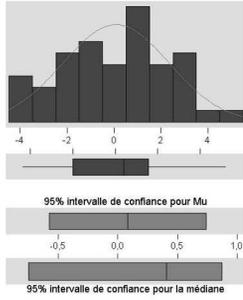


Annexes - Validation croisée interpolation des températures (simulation)

VALIDATION CROISEE POUR LA SIMULATION 2015

Janvier

Statistiques descriptives



Variable : Janvier 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré	0,293
Niveau de P	0,590
Moyenne	0,08364
Ecart-type	2,26993
Variance	5,15256
Asymétrie	4,285-02
Aplatissement	-8,2E-01
N	48
Minimum	-4,37840
1er quartile	-2,01320
Médiane	0,40925
3ème quartile	1,56202
Maximum	5,19209

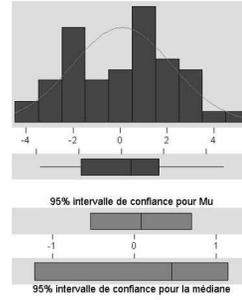
95% intervalle de confiance pour Mu
-0,57547 -0,74276

95% intervalle de confiance pour Sigma
1,88964 2,84326

95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,75547 0,87122

Février

Statistiques descriptives



Variable : Fevrier 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré	0,549
Niveau de P	0,150
Moyenne	0,08573
Ecart-type	2,12741
Variance	4,52589
Asymétrie	4,88E-02
Applatissement	-9,1E-01
N	48
Minimum	-3,84187
1er quartile	-1,88525
Médiane	0,45414
3ème quartile	1,76979
Maximum	4,82655

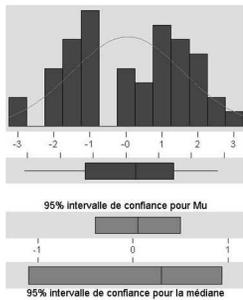
95% intervalle de confiance pour Mu
-0,53201 0,70347

95% intervalle de confiance pour Sigma
1,77101 2,68478

95% intervalle de confiance pour la médiane
-1,22553 1,14258

Mars

Statistiques descriptives



Variable : Mars 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré	0,965
Niveau de P	0,014
Moyenne	0,05261
Ecart-type	1,54919
Variance	2,39689
Asymétrie	-1,3E-01
Applatissement	-1,14031
N	48
Minimum	-3,10932
1er quartile	-1,24707
Médiane	0,29161
3ème quartile	1,44815
Maximum	2,79834

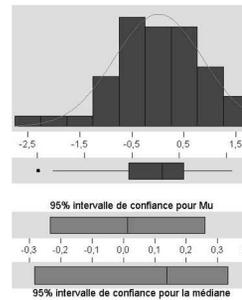
95% intervalle de confiance pour Mu
-0,39574 0,50035

95% intervalle de confiance pour Sigma
1,28882 1,93923

95% intervalle de confiance pour la médiane
-1,10358 0,93019

Avril

Statistiques descriptives



Variable : Avril 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré	0,312
Niveau de P	0,540
Moyenne	0,013351
Ecart-type	0,848178
Variance	0,719405
Asymétrie	-8,3E-01
Applatissement	0,979315
N	48
Minimum	-2,47388
1er quartile	-0,58955
Médiane	0,13794
3ème quartile	0,59871
Maximum	1,62198

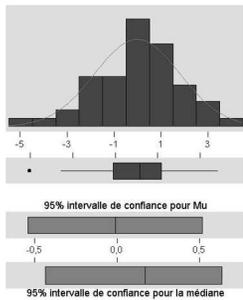
95% intervalle de confiance pour Mu
-0,23292 0,25965

95% intervalle de confiance pour Sigma
0,70608 1,06241

95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,28530 0,33235

Mai

Statistiques descriptives



Variable : Mai 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré	0,253
Niveau de P	0,720
Moyenne	-0,01072
Ecart-type	0,82397
Variance	3,32176
Asymétrie	-3,7E-01
Applatissement	0,354211
N	48
Minimum	-5,03099
1er quartile	-1,06674
Médiane	0,16982
3ème quartile	1,15982
Maximum	3,81011

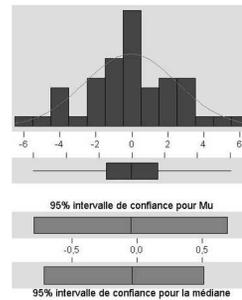
95% intervalle de confiance pour Mu
-0,53994 0,51850

95% intervalle de confiance pour Sigma
1,51723 2,28291

95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,43706 0,63452

Juin

Statistiques descriptives



Variable : Juin 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré	0,249
Niveau de P	0,735
Moyenne	-0,04792
Ecart-type	2,56968
Variance	6,53806
Asymétrie	-4,9E-02
Applatissement	5,47E-02
N	48
Minimum	-6,04911
1er quartile	-1,58268
Médiane	-0,03954
3ème quartile	1,57899
Maximum	6,06558

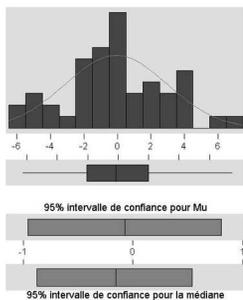
95% intervalle de confiance pour Mu
-0,79039 0,69454

95% intervalle de confiance pour Sigma
2,12859 3,20280

95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,71420 0,50870

Juillet

Statistiques descriptives



Variable : Juillet 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré	0,202
Niveau de P	0,871
Moyenne	-0,07370
Ecart-type	3,04170
Variance	9,25191
Asymétrie	0,126345
Applatissement	-1,9E-02
N	48
Minimum	-6,29841
1er quartile	-2,08747
Médiane	-0,15556
3ème quartile	1,97406
Maximum	7,49332

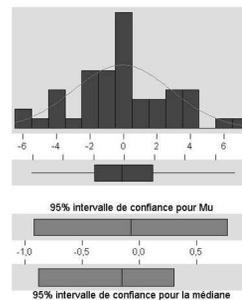
95% intervalle de confiance pour Mu
-0,95692 -0,80951

95% intervalle de confiance pour Sigma
2,53212 3,80997

95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,87652 0,53802

Août

Statistiques descriptives



Variable : Aout 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré	0,251
Niveau de P	0,729
Moyenne	-0,07433
Ecart-type	2,91618
Variance	8,51675
Asymétrie	0,135300
Applatissement	-1,2E-02
N	48
Minimum	-6,13363
1er quartile	-1,97422
Médiane	-0,15390
3ème quartile	1,97555
Maximum	7,28188

95% intervalle de confiance pour Mu
-0,92168 0,77302

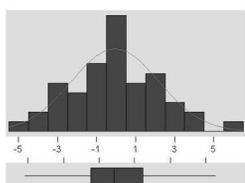
95% intervalle de confiance pour Sigma
2,42929 3,65525

95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,88362 0,30254

VALIDATION CROISEE POUR
LA SIMULATION 2015

Septembre

Statistiques descriptives



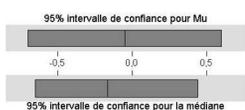
Variable : Septembre 15

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré 0,242
Niveau de P 0,756
Moyenne -0,04967
Ecart-type 2,23977
Variance 5,01857
Asymétrie 3,58E-02
Aplatissement 9,90E-02
N 48

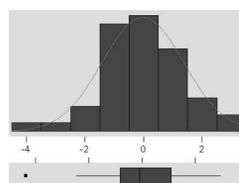
Minimum -5,21208
1er quartile -1,49291
Médiane -0,16920
3ème quartile 1,43599
Maximum 5,54614

95% intervalle de confiance pour Mu
-0,70003 0,60069
95% intervalle de confiance pour Sigma
1,86454 2,80549
95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,65335 0,44056



Octobre

Statistiques descriptives



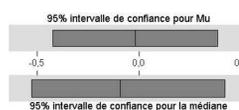
Variable : Octobre 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré 0,387
Niveau de P 0,376
Moyenne -0,01923
Ecart-type 1,89123
Variance 1,93553
Asymétrie -3,3E-01
Aplatissement 1,16310
N 48

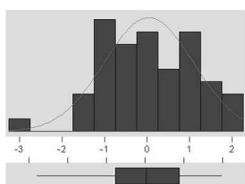
Minimum -4,38271
1er quartile -0,84198
Médiane -0,03251
3ème quartile 1,07481
Maximum 2,95024

95% intervalle de confiance pour Mu
-0,42321 0,38474
95% intervalle de confiance pour Sigma
1,15816 1,74263
95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,52959 0,42008



Novembre

Statistiques descriptives



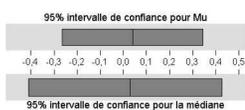
Variable : Novembre 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré 0,271
Niveau de P 0,590
Moyenne 0,03954
Ecart-type 1,04569
Variance 1,09347
Asymétrie -1,3E-01
Aplatissement -1,5E-01
N 48

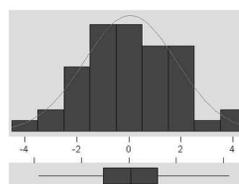
Minimum -2,81889
1er quartile -0,77582
Médiane 0,02788
3ème quartile 0,97227
Maximum 1,98206

95% intervalle de confiance pour Mu
-0,26410 0,34318
95% intervalle de confiance pour Sigma
0,87051 1,30981
95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,41320 0,42546



Décembre

Statistiques descriptives



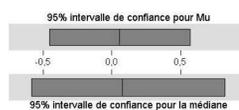
Variable : Décembre 15 ans

Test de normalité de Anderson-Darling

A-Carré 0,120
Niveau de P 0,988
Moyenne 0,05925
Ecart-type 1,79717
Variance 3,12288
Asymétrie 2,84E-02
Aplatissement -1,5E-01
N 48

Minimum -3,83853
1er quartile -1,07864
Médiane 0,07553
3ème quartile 1,20566
Maximum 4,25082

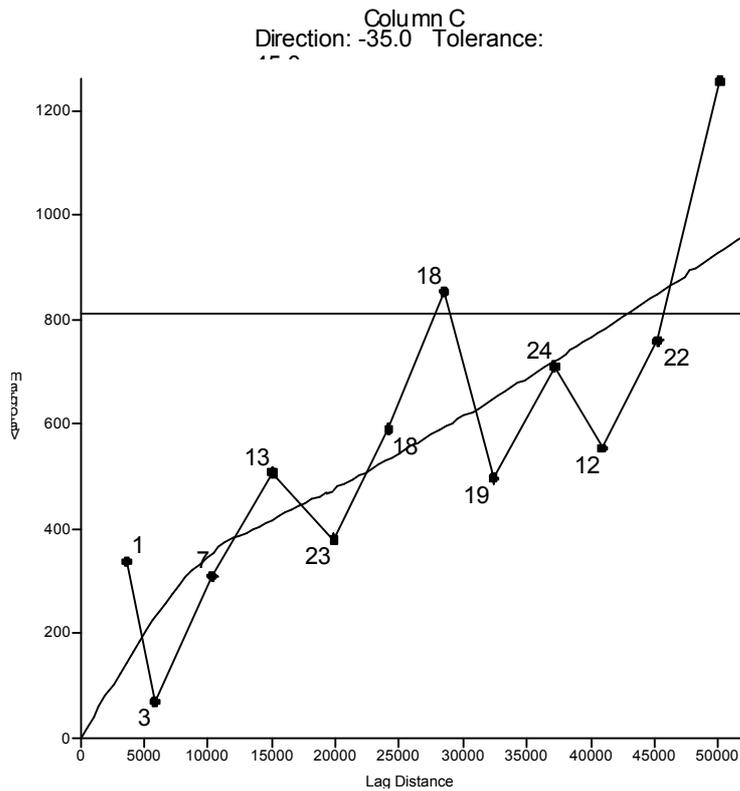
95% intervalle de confiance pour Mu
-0,45488 0,57138
95% intervalle de confiance pour Sigma
1,47111 2,21352
95% intervalle de confiance pour la médiane
-0,58765 0,82214



ANNEXE

(exemple) Qualité du krigeage pour le phénomène des précipitations

janvier



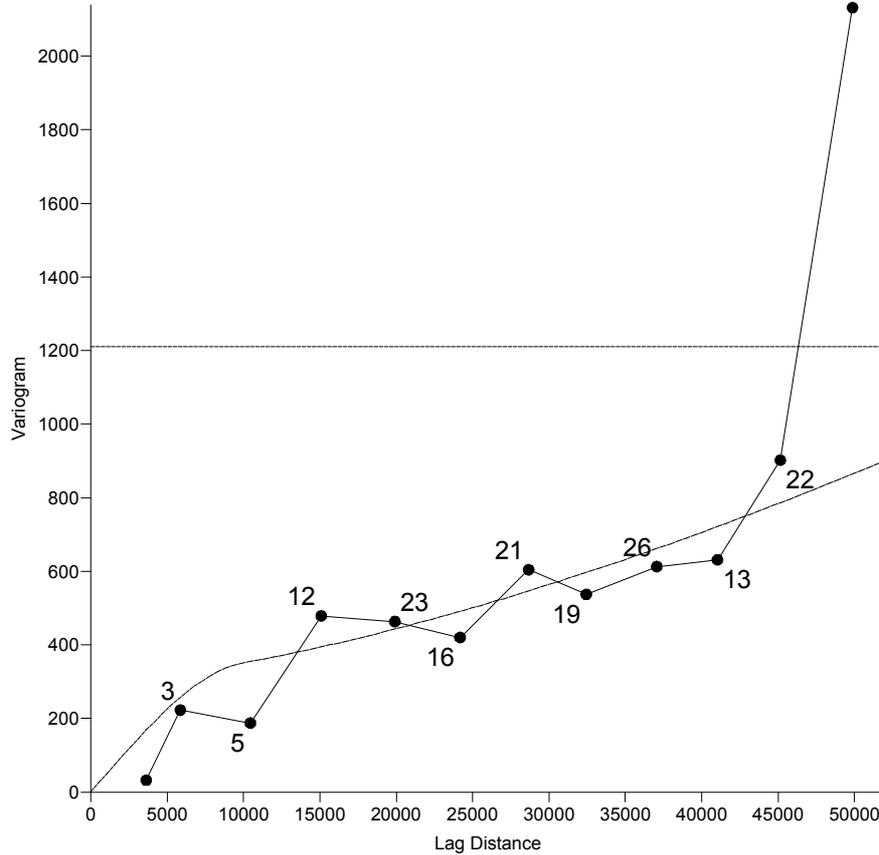
Statistiques descriptives

Variable	N	Moyenne	Médiane	Moyenne TR	EcarType	Moyenne ET
inverse	38	2,47	1,97	2,81	22,20	3,60
krigeage	38	2,09	2,78	2,42	22,35	3,62
rbf mult	38	2,45	1,32	2,03	26,81	4,35
rbf thin	38	1,47	0,67	1,11	35,16	5,70
krig jc	38	1,57	0,06	1,97	22,17	3,60
krig jc2	38	0,89	-0,33	1,29	22,49	3,65
krig jc3	38	1,31	-0,18	1,67	22,29	3,62
krig jc4	38	1,28	-0,27	1,65	22,25	3,61

Variable	Minimum	Maximum	Q1	Q3
inverse	-51,95	49,73	-9,10	17,52
krigeage	-48,49	55,54	-12,86	16,42
rbf mult	-46,67	76,00	-17,95	26,05
rbf thin	-69,39	107,68	-20,74	32,79
krig jc	-50,53	42,86	-11,79	18,60
krig jc2	-51,49	46,13	-11,85	14,05
krig jc3	-50,19	44,35	-12,00	19,10
krig jc4	-50,18	44,02	-11,92	19,12

Août

Column C
Direction: -30.0 Tolerance: 45.0



Statistiques descriptives

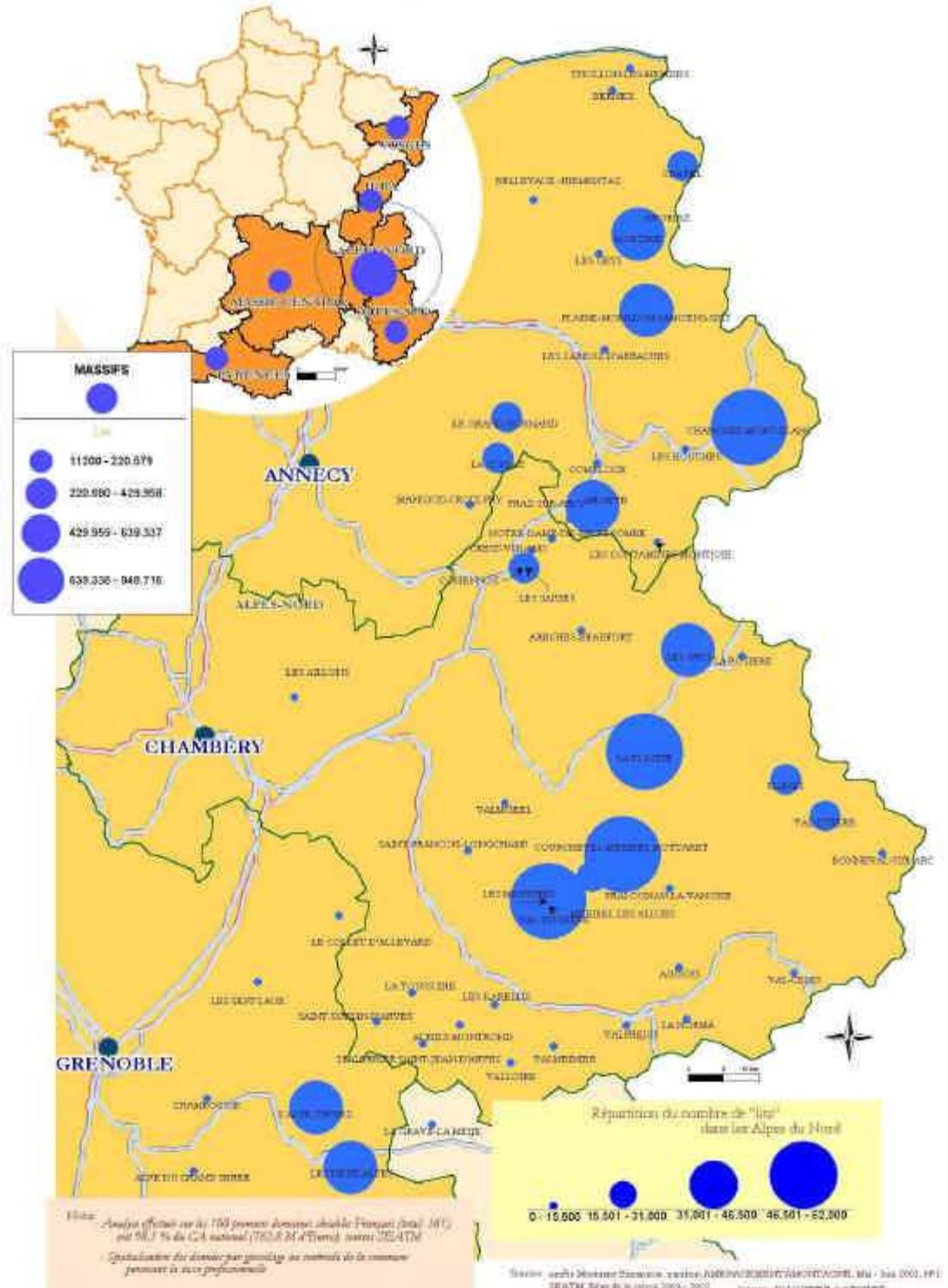
Variable	N	Moyenne	Médiane	Moyenne TR	EcarType	Moyenne ET
inverse	38	0,38	3,21	0,73	17,90	2,90
krigeage	38	1,56	1,55	1,65	19,96	3,24
rbf mult	38	1,98	3,27	1,91	20,96	3,40
rbf thin	38	2,21	4,21	1,85	23,55	3,82
krig jc	38	0,89	-0,16	1,28	19,20	3,12
krig jc2	38	1,38	-0,05	1,33	20,55	3,33
krig jc3	38	0,53	0,58	0,58	19,39	3,14

Variable	Minimum	Maximum	Q1	Q3
inverse	-49,96	35,86	-14,04	13,46
krigeage	-47,90	41,86	-9,14	15,43
rbf mult	-44,88	44,87	-12,13	18,19
rbf thin	-42,08	51,90	-13,96	15,63
krig jc	-47,17	40,82	-9,84	11,70
krig jc2	-46,64	49,05	-11,60	15,69
krig jc3	-47,96	47,26	-13,05	13,14

ANNEXE

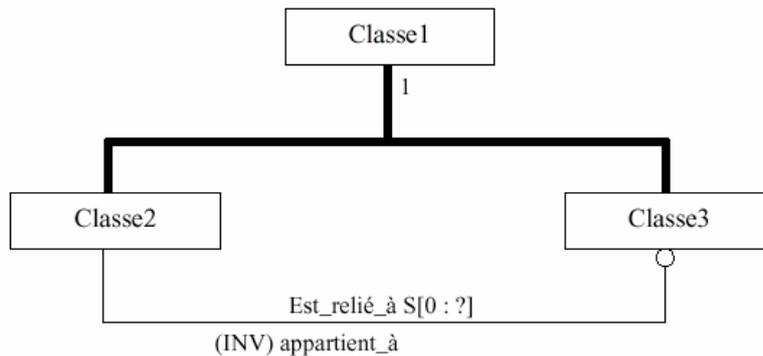
REPARTITION DES "LITS"

Massif des Alpes du Nord - Saison 2001 - 2002



ANNEXE

NOTATION EXPRESS



Cet exemple comprend trois classes, dont deux qui héritent (classe2 et classe3) de la super-classe classe1. La super-classe est repérée grâce au chiffre 1 situé proche du cadre.

Ensuite, la classe2 est reliée à la classe3 grâce à la relation « Est_relié_à ». Le petit rond indique que c'est l'extrémité finale de la relation dans le sens direct. Une relation inverse peut exister (ce n'est pas systématique) et se distingue de la relation directe par le mot clé INV précédant le nom de la relation.

A chaque relation est associée une cardinalité. Dans cet exemple, la relation directe dispose d'une cardinalité quelconque (S pour set : ensemble non ordonné).

Lorsque la cardinalité n'est pas mentionnée, cela signifie qu'un objet de la classe A est relié à un unique objet de la classe B (comme la relation inverse de l'exemple).

Lorsque l'ordre a une importance, on peut utiliser L pour List : liste ordonnée.

ANNEXE

Architecture informatique utilisée

Architecture Matériel

- ✓ Pour le travail d'interpolation, nous avons utilisé un ordinateur DELL

Configuration : Bi-processeurs ACPI 2.40 Ghz chacun
Carte graphique NVIDIA Quadro4 700 XGL
RAM 3 Go

- ✓ Pour la mise en œuvre de l'environnement Simul-Image, nous avons utilisé un ordinateur classique

Configuration : Monoprocésseur 2.40 Ghz
Carte graphique Gforce 4 MX 440 avec AGP8X
RAM 512 Mo

Systèmes d'Exploitations

Windows XP professional edition, 2000, NT de la société Microsoft

Logiciels utilisés en direct dans Simul-Image

- ✓ Système de gestion de bases de données relationnelles :
ACCESS de la société Microsoft (USA) dans sa version professionnelle (logiciel fourni par le pack Office). Le lien établi entre le SIG vecteur Géoconcept utilise la technologie OLE DB de pointage sur le protocole JET (moteur interne d'ACCESS) n°4
- ✓ Système d'Information Géographique en mode image :
IDRISI de Clark laboratoire (USA)
- ✓ Système d'Information Géographique en mode vecteur :
GéoConcept de la société GéoConcept (France)
- ✓ Moteur de Réalité Virtuelle :
VirtualGéo de la société CS Systèmes (France)

Logiciels utilisés indépendamment de l'environnement informatique

- ✓ Logiciel d'analyse spatiale et d'interpolation :
SURFER de la société Golden Software (USA)

ANNEXE

L'enneigement artificiel : systèmes et fonctionnement

Les systèmes de productions de neige de culture se décomposent en deux catégories : haute pression et basse pression. Cette terminologie concerne la technique utilisée pour la fabrication de la neige. Le principe de fabrication est assez simple sur le plan théorique. L'eau est pulvérisée sous la forme de gouttelettes qui vont cristalliser si la température est inférieure à zéro et si le taux d'humidité de l'air n'est pas trop élevé. Cependant, les conditions de fabrications optimale sont restreintes. La neige de culture ne devient rentable qu'à partir de -2° avec un taux d'humidité inférieur à 65%.

- Le système haute pression ou bi-fluide

L'eau et l'air sont conduits jusqu'aux enneigeurs par un système de tuyauteries sous pression. L'eau est alors pulvérisée en gouttelettes fines par des buses puis mélangée à l'air comprimé. Un processus physique transforme le mélange en cristaux au sortir des buses. Ce système présente l'avantage de permettre la gestion automatique de l'enneigement en fonction des conditions météorologiques. En revanche, il se révèle très bruyant et réclame une énergie considérable pour la fabrication.

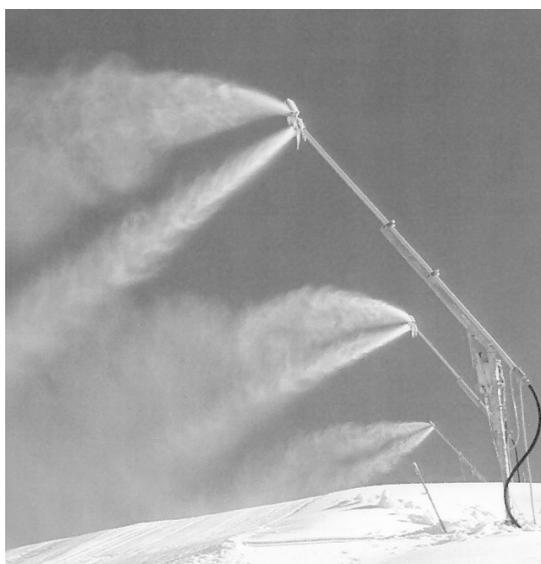


Illustration X: Système bifluides en action

- Le système basse pression ou mono fluide

L'air comprimé n'est pas utilisé. On utilisera en remplacement d'une hélice placée à l'intérieur de l'enneigeur. Le seul fluide amené sera l'eau. Ce procédé présente les avantages de réduire les besoins en énergie et d'être 6 à 8 fois moins bruyant que les systèmes haute pression. En revanche,

chaque enneigeur doit être raccordé à un système de production d'énergie pour l'entraînement de l'hélice. Son usage nécessite de surcroît une importante manutention dans des conditions de travail pénibles car chaque enneigeur doit être installé et raccordé individuellement.

Bien entendu, un domaine skiable peut parfaitement faire cohabiter les deux systèmes de production.



: Système mono fluide en action

- **Les trois modes de gestion d'une installation d'enneigement**

La performance d'une installation d'enneigement artificiel dépend de trois facteurs: la bonne adaptation au site, les conditions climatiques et le choix d'un mode de gestion efficace adopté par l'exploitant. Les deux premiers facteurs sont structurels au système, le dernier facteur est conjoncturel. Trois stratégies de gestions sont possibles.

- Le gestionnaire fait fonctionner son système d'enneigement dès que les conditions le permettent et cela tout le long de la saison. Cette solution matérialise la voie la plus coûteuse mais elle reste aussi la plus sûre pour la garantie d'une couverture jusqu'à la fin de la saison. Cette stratégie peut concerner les domaines où le climat est assez variable et où le manteau peut être sujet à une amplitude thermique importante
- Le système est activé dès que les conditions climatiques sont correctes et tant que le manteau n'est pas stabilisé. C'est à dire principalement en début de saison et dans le cas d'une fonte importante qui oblige à une stratégie de reconstitution. Le reste du temps, les enneigeurs ne sont en action qu'aux périodes les plus économiques.
- Rechercher l'économie maximale en ne faisant fonctionner l'installation qu'aux heures creuses représente la troisième voie. Ce mode de gestion n'est réalisable que dans le cas où le climat ne serait pas trop variable avec un nombre d'heures de froid garanties. L'objectif ici recherchera la prolongation de la période d'ouverture du domaine plutôt que de garantir une couverture nivale déjà présente naturellement.

ANNEXE

Présentation du calculateur de climat Java Climate Model (JCM)

JCM est un calculateur de climat global développé par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement PNUE/GRID (Arendal, Norvège), l'INSTITUT DE GEOPHYSIQUE DE LOUVAIN LA NEUVE (Louvain la Neuve, Belgique), le DANISCH ENERGY AUTORITTY (Copenhague Danemark), le CLIMATE AND ENVIRONMENTAL PHYSICS (Bern, Suisse),

JCM est basé sur des formules scientifiques disponibles et validées par le GIEC. Il permet la simulation à partir d'un client léger (navigateur internet) sur une applet Java.

Dans cet instrument, tout est relié et en interaction, des émissions aux impacts . Il y a 20 modules. JCM est conçu comme outil pour le dialogue global. Ce modèle a déjà des traductions dans dix langues (menu proposé pour chaque module)!

JCM propose une documentation étendue pour aider à utiliser et calibrer chaque module. Cela permet d'expérimenter la variété des approches. Cependant JCM n'est pas un outil simpliste au service d'un message unique. Il a été employé dans des jeux de négociation de climat et possède tous les fondement scientifiques nécessaires pour produire des résultats fiables.

Pour plus d'informations et accéder au modèle:

<http://www.chooseclimate.org/jcm/>

