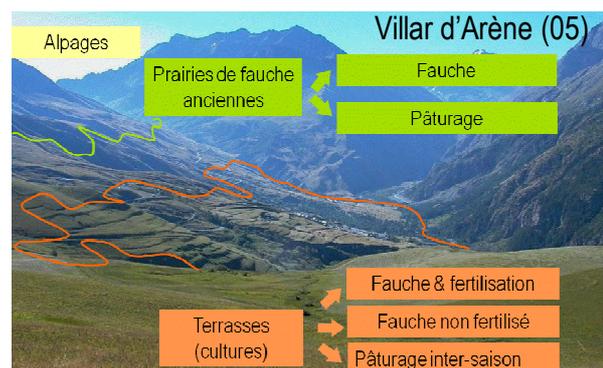
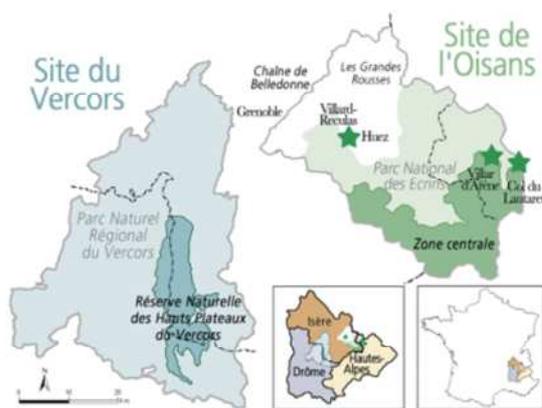


Adaptation des territoires alpins à la recrudescence des sécheresses dans un contexte de changement global (SECALP)

Rapport de fin de contrat, 15 décembre 2011



Responsable/Coordinateur scientifique

LAVOREL, Sandra
Directrice de Recherche, CNRS,
Laboratoire d'Ecologie Alpine (LECA) CNRS UMR 5553
Université Joseph Fourier, BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9, FRANCE
Email : sandra.lavorel@ujf-grenoble.fr

Organisme (s) / Laboratoire (s) impliqué (s) dans le projet

LECA CNRS-Université J. Fourier Grenoble
Cemagref UR Ecosystèmes Montagnards (EM) Grenoble
Cemagref UR Développement des Territoires de Montagne (DTM) Grenoble
Parc National des Ecrins Gap

Table des matières

RESUME	5
I – INTRODUCTION	7
Contexte général	7
Objectifs du projet	8
Structure du projet et questions de recherche	8
Sites d'étude	9
II - Synthèse des résultats et implications	11
Axe 1 - Mécanismes écologiques d'adaptation aux changements climatiques, dont la sécheresse	11
1.1 Analyse des réponses observées sur les 30 dernières années	11
1.2. Mécanismes écologiques de résilience / vulnérabilité	12
1.3. Mécanismes écologiques de résilience / vulnérabilité – Conclusion	14
Axe 2 - Processus d'adaptation des acteurs utilisateurs de l'espace	15
2.1. Processus d'adaptation des acteurs agricoles (éleveurs et bergers)	15
2.2. Processus d'adaptation des acteurs forestiers	16
2.3. Processus d'adaptation des acteurs utilisateurs de l'espace - Conclusion	16
Axe 3 - Orientations et leviers à mobiliser pour une gestion durable des espaces naturels de montagne intégrant le changement climatique	17
Axe 4 – Stratégies d'observation à long terme	19
4.1. Réseaux d'observation	19
4.2. Indicateurs et méthodologies de mesure	19
4.3 Les protocoles de suivi, la détection rapide des changements	19
4.4 Les observatoires comme outils pour accompagner changement	20
Conclusion générale	20
III – COMPTE-RENDU DES RESULTATS OBTENUS	22
Axe 1- Mécanismes écologiques d'adaptation aux changements climatiques, dont la sécheresse	22
1.1 Analyse des réponses observées sur les 30 dernières années	22
1.2. Mécanismes écologiques de résilience / vulnérabilité	25
Axe 2 : Réactions face aux sécheresses subies depuis les années 2000	32
2.1. Modes d'adaptation des éleveurs	32
2.2. Modes d'adaptation des acteurs forestiers	35
2.2.2. Principaux résultats	35
Axe 3 : scénarios et adaptations envisagées ; perspectives pour l'accompagnement des adaptations	36
3.1. Méthodologie	36
3.2. Résultats	38
3.3. Synthèse et perspectives	40

Axe 4 : Stratégies d'observation à long terme.....	43
Méthodologie générale	43
4.1 Evaluation des réseaux d'observation	44
4.2 - Evaluation des indicateurs et méthodologies : Des méthodes en évolution	45
4.3. Des protocoles plus adaptés vers un observatoire de la sécheresse	47
4.4. Les observatoires comme outils pour accompagner changement :	48
Annexe. Présentation des récits élaborés pour chaque scénario prospectif	49
Valorisation.....	55
Bibliographie.....	58

RESUME

L'objectif de SECALP était d'analyser les mécanismes d'adaptation des territoires semi-naturels de montagne face aux changements climatiques, particulièrement la récurrence des sécheresses. Les objectifs spécifiques étaient : (i) d'améliorer la compréhension des mécanismes de résilience et de transformation des écosystèmes, et des processus d'adaptation des acteurs agricoles et forestiers. (ii) de proposer des orientations pour accompagner ces acteurs au travers des politiques publiques agri-environnementales et de développement territorial, et (iii) de proposer des stratégies d'observation à long terme pouvant favoriser l'adaptation des acteurs.

Peu de données sont disponibles pour évaluer les dynamiques écologiques à long terme. L'analyse des données disponibles pour les alpages et par les inventaires forestiers a suggéré une forte résilience aux sécheresses des 30 dernières années. On discerne cependant des réponses du recrutement forestier annonciatrices d'une érosion des limites inférieures d'espèces comme le hêtre et le sapin, et d'un déficit général de recrutement de l'épicéa sur les sols plus superficiels. Ces patrons sont confirmés par les approches expérimentales. Pour la forêt celles-ci ont montré que si la mortalité ne peut pas être directement reliée aux sécheresses sur les stations productives, le recrutement est lui sensible à la compétition pour l'eau avec le tapis herbacé et la canopée, en particulier entre feuillus et semis de résineux. La forte résilience des alpages, dont la dynamique et le fonctionnement sont principalement pilotés par la gestion, résulte de mécanismes d'adaptation physiologique dans ces milieux naturellement variables. Cependant, dans le cas du Vercors une réponse transitoire marquée (éclaircissement du couvert, régression des espèces plus mésophiles) l'année de la sécheresse extrême reflète ce qui a été vécu par les éleveurs et les bergers. Les données d'observation comme les expérimentations ne permettent pas d'exclure des effets plus drastiques à long terme, y compris des effets de seuil et des processus de rétroaction via les sols.

Les enquêtes réalisées auprès des acteurs agricoles et forestiers pour analyser leurs capacités et mécanismes d'adaptation aux sécheresses récentes ont révélé que les conséquences des sécheresses sur les activités d'élevage et forestières sont par nature différentes en relation avec les échelles de temps de leur gestion et de avec leur fonctionnement économique. Les adaptations adoptées par les acteurs de l'élevage restent toutefois limitées à une adaptation des pratiques pour jouer sur la flexibilité des systèmes (alpages, prés de fauche, pâturages) sans modifications structurelles. Les préoccupations des éleveurs et des forestiers se rejoignent sur l'impact à moyen terme des sécheresses, et se focalisent sur les interactions entre recrudescence des épisodes de sécheresse et contexte socio-économique. Ils partagent également leurs incertitudes sur les dynamiques à long terme (possibilités d'effets de seuils) et sur les conséquences de leurs modifications de pratiques pour la durabilité de leurs ressources, qu'elles soient fourragères ou forestières. Enfin, l'accroissement des sécheresses est susceptible de décloisonner les deux groupes d'acteurs, aussi bien par la demande de surfaces boisées « tampon » pour le pâturage, que pour la colonisation des alpages par le pin à crochet.

La construction participative de scénarios combinant modalités climatiques et socio-économiques a permis de mettre en évidence le rôle relatif de ces deux dimensions dans l'adaptation des acteurs. Conformément à ce qui a été observé concernant la perception et l'adaptation aux sécheresses récentes, la réalité du changement est plus prégnante pour les éleveurs que pour les forestiers, ne serait-ce qu'en relation avec les échelles de temps de leurs décisions et la détectabilité des effets des événements récents. De manière générale, les propositions d'adaptation sont en continuité avec les réponses récentes ou les anticipations qu'elles ont suscité. Les éventuels changements plus radicaux mettent en jeu l'attitude face aux aléas et intègrent toujours d'autres facteurs, notamment relatifs à l'évolution du contexte socio-économique, bien que celui-ci reste une incertitude dont le poids est majeur, en particulier dans la position attentiste des acteurs forestiers. Enfin, même s'il reste un facteur crucial d'incertitude, le contexte réglementaire sera décisif dans la capacité des acteurs à mettre en place des adaptations, comme le seront l'accompagnement technique et territorial.

La mise en place d'un système d'observation adapté aux contraintes des milieux de montagne apparaît comme un défi non seulement scientifique, mais une réponse à une demande des acteurs pour soutenir leurs adaptations. L'analyse des réseaux et protocoles existants souligne un foisonnement de réseaux, de dispositifs et de protocoles à de multiples échelles. Sur l'exemple du réseau Alpages Sentinelles, un tel observatoire devra assurer la coordination et la communication entre réseaux, et en particulier entre scientifiques et gestionnaires, et entre protocoles pour les paramètres à combiner sur le climat, les écosystèmes (biodiversité et valeur productive) et les pratiques. Le partage de cette démarche entre gestionnaires des espaces naturels, acteurs agricoles, forestiers, scientifiques, et acteurs territoriaux est essentiel pour sa mise en place et sa pérennité, ainsi que pour accompagner l'adaptation.

Mots-clés : écosystèmes alpins, réchauffement climatique, sécheresse, alpages, dynamique forestière, écotones, pratiques pastorales, adaptation des systèmes d'élevage, adaptation de la gestion forestière, observations à long terme.

I – INTRODUCTION

Contexte général

Les rapports du GIEC (2001, 2007) ont pointé les écosystèmes de montagne comme hautement vulnérables aux changements climatiques planétaires. Les scénarios d'évolution du climat prévoient non seulement une poursuite du réchauffement observée sur les Alpes, mais aussi une augmentation des extrêmes climatiques, en particulier des phénomènes de sécheresse, en particulier dans les zones sous influence méditerranéenne. Les écosystèmes alpins sont considérés comme particulièrement sensibles à ces changements qui risquent d'entraîner des pertes de biodiversité et des modifications des paysages. Cependant les connaissances actuelles concernent principalement les effets des modifications du climat moyen, alors que les effets de la sécheresse commencent seulement à être pris en compte. Du point de vue des activités de production, si l'allongement de la période de végétation pourra permettre une utilisation plus flexible des alpages et pourrait conduire à une augmentation de la production forestière en zone de montagne, le risque de sécheresse estivale accru a un impact dépréciatif sur la production fourragère et sur les peuplements forestiers. L'influence de ces modifications sur les pratiques de gestion, les systèmes d'exploitation et leur durabilité écologique, économique et sociale est inconnue.

Ainsi, il a été noté des changements significatifs, notamment dans les alpages du Parc National des Ecrins (PNE) au cours des années 2000 : modifications des dates de montée et de descente d'alpage, surpâturage dans certains quartiers, reconquêtes d'alpages et de modifications des effectifs inalpés. Ces évolutions révèlent des réactions des éleveurs et des bergers suite aux sécheresses de 2003 et 2005, mais celles-ci ne sont sans doute pas le seul facteur expliquant ces changements. Devant ces constats, l'ensemble des gestionnaires des espaces pastoraux des Alpes se mobilisent pour comprendre et anticiper les changements des systèmes pastoraux dans leurs composantes naturelles et humaines et leurs couplages (p.ex. projet ClimAdapt coordonné par le SUACI Alpes du Nord-Jura.). Le PNE a initié une démarche proactive avec la mise en place depuis 2007 d'un réseau d'alpages « sentinelles » dédiés au suivi à long-terme de la réponse de ces systèmes au changement climatique.

De la même manière, suite à la canicule de l'été 2003, des taux de mortalité exceptionnels ont été constatés pour les résineux de montagne durant l'année 2004. Les chutes de production ont également été très importantes et une reprise des attaques de ravageurs secondaires, dont la tendance était à la diminution, a été observée, avec des conséquences à plus long terme sur la production. L'importance de tels événements a entraîné la mobilisation à l'échelle nationale d'une expertise scientifique collective « sécheresse et canicule 2003 ». Elle a également révélé auprès des forestiers la nécessité de mieux s'organiser pour faire face aux situations de crise. Les dépérissements forestiers entraîneront des pertes économiques considérables. En France, les espèces méridionales sont moins productives que les espèces tempérées et un remplacement d'essence s'accompagnerait d'une diminution de la production. Les gestionnaires forestiers expriment dans ce contexte une demande forte de connaissances en termes d'identification des risques, d'éléments les aidant à faire évoluer leurs pratiques sylvicoles, et de développement de réseaux d'observation.

Dans ce contexte nous nous sommes engagés à produire des connaissances pour appuyer les acteurs, les gestionnaires et les décideurs des territoires alpins à : 1) la réduction des impacts et 2) l'adaptation à la récurrence des sécheresses, dans un contexte de changements du climat et de la conjoncture politique et socio-économique. Les recherches concerneront la résilience et les capacités d'ajustement à ces changements des écosystèmes terrestres (des formations herbacées à la forêt) et des acteurs de leur gestion. Les interactions entre changements climatiques, écologiques et mutations des modes d'exploitation pastorale et forestière seront au cœur du travail. Les résultats des analyses des impacts déjà observés et des mécanismes d'adaptation permettront de promouvoir le développement d'indicateurs et de stratégies d'observation pour la détection rapide des changements, et le soutien à l'adaptation des acteurs locaux afin de réduire l'impact des sécheresses et d'aller vers une gestion durable des milieux. La stratégie de recherche s'appuiera sur la mise en place d'un dialogue structuré avec les acteurs de ces territoires (agriculteurs, forestiers, services pastoraux et les gestionnaires d'espaces naturels). La production et l'utilisation de scénarios de mutation du système couplé homme-environnement, en utilisant les connaissances fondamentales acquises sur le fonctionnement du système et en intégrant les réponses envisagées par les acteurs, seront à un outil majeur du projet. En termes

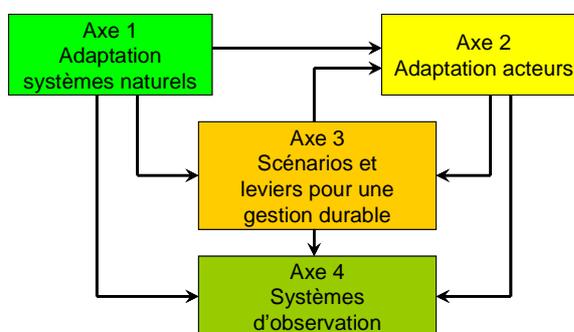
opérationnels, des propositions seront faites pour l'appui aux acteurs en vue d'une gestion durable des territoires alpins, et pour aménager es politiques agri-environnementales et territoriales.

Objectifs du projet

Les territoires alpins sont des mosaïques complexes de milieux forestiers et ouverts résultant d'interactions anciennes entre les sociétés et leurs environnements. Les changements climatiques influenceront directement leur dynamique selon la résilience des différents écosystèmes, mais aussi indirectement en affectant les pratiques des acteurs utilisateurs de ces espaces. L'objectif de SECALP était d'analyser les mécanismes d'adaptation des territoires semi-naturels de montagne face aux changements climatiques, particulièrement la récurrence des sécheresses. Les objectifs spécifiques étaient : (i) d'améliorer la compréhension des mécanismes de résilience et de transformation des écosystèmes, et des processus d'adaptation des acteurs agricoles et forestiers. (ii) de proposer des orientations pour accompagner les acteurs gestionnaires de ces espaces au travers des politiques publiques agri-environnementales et de développement territorial, et (iii) de proposer des stratégies d'observation à long terme pouvant favoriser l'adaptation des acteurs.

Structure du projet et questions de recherche

Le travail de SECALP a été articulé autour de quatre axes de recherches complémentaires et interactifs. Les questions de recherche et les résultats attendus sont présentés par axe ci-après.



Axe 1 - Mécanismes écologiques d'adaptation aux changements climatiques, dont la sécheresse

1.1 Analyse des réponses observées sur les 30 dernières années

- (1) Quelles modifications de biodiversité des formations herbacées et des forêts sont observables à l'échelle de la parcelle ou de la placette, et attribuables à la combinaison réchauffement - occurrence de sécheresses ?
- (2) Comment ces changements climatiques affectent-ils la physionomie des paysages ?
- (3) Quels effets sont observés sur la valeur de production pastorale et forestière ?

1.2 Mécanismes écologiques de résilience / vulnérabilité

- (1) Quels sont les mécanismes de la mortalité des espèces forestières face à la sécheresse ?
- (2) Quels sont les effets de la sécheresse, dans un contexte de réchauffement moyen, sur les processus de recrutement et de colonisation ?
- (3) Quelles sont les interactions entre réponses de la végétation et des sols ?

Axe 2 - Processus d'adaptation des acteurs utilisateurs de l'espace

- (1) Suite aux sécheresses durant les années 2000, quels leviers ont été activés aux plans technique, organisationnel ou économique dans les systèmes fourragers et d'élevage des exploitations, ainsi que dans les unités de gestion forestière ?
- (2) Comment a été préservée la cohérence technique et organisationnelle ?
- (3) Face à des scénarios d'évolution des écosystèmes et du contexte (axe 3), comment les éleveurs et les bergers envisagent-ils d'adapter leurs pratiques, la conduite technique et l'organisation du travail de leurs systèmes fourragers et d'élevage ? Comment notamment pourrait évoluer la phase pastorale (place dans le système de l'exploitation, aspects spatio-temporels des pratiques et de l'organisation du travail) ?
- (4) Quelles sont les leviers d'action (aménagement, pratiques de sylviculture) mobilisés par les gestionnaires forestiers pour préserver la régularité de la production forestière et l'intégrité des écosystèmes forestiers faces

aux changements climatiques de long terme et à la récurrence des événements de crise tels que les sécheresses ?

Axe 3 - Orientations et leviers à mobiliser pour une gestion durable des espaces naturels de montagne intégrant le changement climatique

(1) Quels scénarios prospectifs d'évolution (climat, écosystèmes, contexte socio-économique) concevoir à l'horizon 2015-2020 pour anticiper les réponses des acteurs agricoles et forestiers ?

(2) Quelles adaptations sont envisageables pour une gestion durable des écosystèmes alpins dans un contexte de changement climatique ?

(3) Quelles évolutions des politiques publiques sont-elles souhaitables pour une gestion durable des territoires de montagne ?

Axe 4 - Stratégies d'observation à long terme

4.1 *Quels réseaux d'observations ?* Quelle stratégie doit-on développer pour initier un réseau d'observation des systèmes herbacés d'altitude ? Les réseaux d'observation forestière en place permettent-ils de rendre compte des effets sur les forêts de montagne des sécheresses dans le contexte du changement climatique ? Comment le cas échéant les améliorer ?

4.2 *Indicateurs et méthodologies de mesures :* Quels sont les indicateurs les plus pertinents des effets des sécheresses sur des sites de suivi à long-terme ? Les indicateurs examinés concerneront la météorologie, la végétation (biodiversité, structure et production), les sols, les pratiques pastorale et le de fonctionnement des systèmes d'exploitation agricole, et les stratégies sylvicoles.

4.3 *Les protocoles de suivi pour détecter les changements :* Quelles stratégies d'échantillonnage spatiales et temporelles, avec quelles méthodes d'analyses de données permettent de détecter les réponses à la sécheresse dans un contexte de changement du climat et des pratiques ?

4.4 *Les observatoires comme outils pour accompagner changement :* Comment utiliser les observatoires pour guider l'adaptation ? Quelles stratégies de communication des résultats aux acteurs (et aux décideurs) ? Quels sont les manques de connaissances à combler pour appréhender les processus écologiques et les dynamiques des socio-écosystèmes de montagne dans la perspective du changement climatique ?

Sites d'étude

Les travaux de SECALP ont été mis en œuvre sur les deux sites de la Zone Atelier Alpes, le Vercors (Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors et Parc Naturel Régional du Vercors) et l'Oisans (adret de Villar d'Arène, alpages sentinelles du PNE), tous deux représentatifs des systèmes société-environnement des Alpes intermédiaires gérés à la fois pour la production pastorale et forestière, et comme espaces naturels protégés à forte valeur patrimoniale. Les deux sites se situent sur des limites climatiques critiques où se mêlent les influences océaniques et méditerranéennes, la prédominance de ces dernières ayant augmenté au cours des deux dernières décennies (S. Bigot, non publié). Par exemple depuis 1988, le massif préalpin du Vercors connaît une évolution significative des conditions pluvio-thermiques se traduisant par une augmentation des températures moyennes et une diminution des précipitations (Figure I.1). Les épisodes de sécheresse se sont accrues notamment sur les alpages de la Réserve Naturelle des Hauts-Plateaux du Vercors alors que la pression pastorale est restée globalement stable.

Sur substrat calcaire du Vercors, les Hauts Plateaux (altitude moyenne 1620 m) sont majoritairement herbacés (~4% de forêt), alors que le Parc Naturel Régional (200-2341 m) est fortement forestier. La combinaison des influences pédologiques, climatiques et orographiques entraîne une grande diversité écologique, particulièrement à travers l'étagement de la végétation et les effets des usages qui ont créé une mosaïque de pelouses, de landes et de forêts. L'interaction entre pastoralisme ovin transhumant et conservation est au cœur des enjeux de gestion sur les Hauts Plateaux. En 2000, 1362 exploitations étaient recensées sur l'ensemble du parc naturel régional du Vercors (85 communes). Seul un quart des ménages agricoles exerce une activité agricole exclusive, les autres pratiquant une activité extérieure (de la part du chef d'exploitation ou de son conjoint) ou bénéficiant d'une retraite. Il s'agit d'une agriculture de montagne à caractère extensif qui repose essentiellement sur la valorisation de prairies et parcours. Les systèmes bovins-lait y sont dominants, mais les systèmes allaitants (bovins ou ovins)

peuvent être fréquents selon les zones. Dans la dernière enquête pastorale remontant à 1996, on dénombrait 113 alpages couvrant environ 21000 hectares où estivaient 4000 bovins (génisses et vaches allaitantes) et près de 35000 ovins. 33 alpages étaient gérés sous forme collective par des groupements pastoraux, les autres étant utilisés par les éleveurs à titre individuel. Environ 20000 ovins proviennent d'éleveurs transhumants des zones de piémont ou de Provence. Bien que la charge animale soit relativement stable depuis une quarantaine d'années, les pratiques pastorales ont été notablement modifiées. Certains alpagistes craignent un envahissement des alpages par la forêt, en lien avec l'augmentation prévue des températures et des sécheresses. Sur les zones plus basses les enjeux concernent aussi la gestion des forêts pour leurs fonctions de production, de protection et la conservation. Cet enjeu est important dans un contexte où la forêt privée est très morcelée dans le Vercors (4 ha en moyenne).

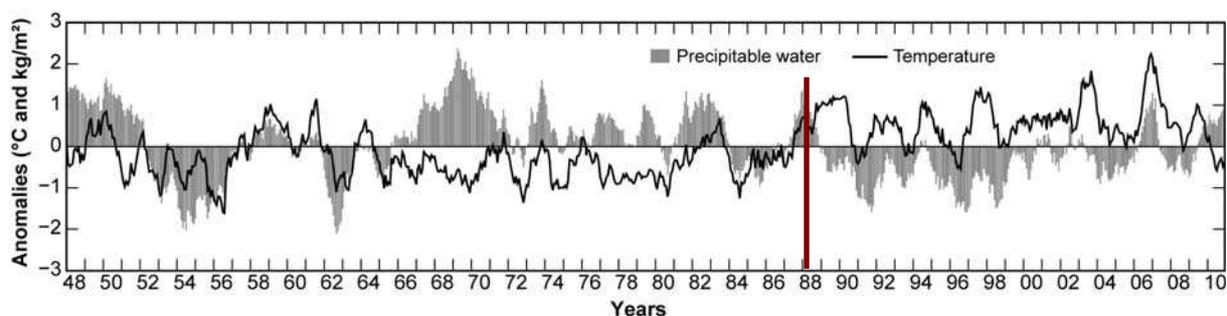


Figure 1.1 : Anomalies thermiques et pluviométriques sur la Réserve des Hauts-Plateaux du Vercors entre 1948 et 2010 (d'après Bigot & Rome 2010).

L'Oisans quant à lui présente une variété de substrats et une plus grande amplitude altitudinale, incluant de vastes zones d'alpages (entre 1450 et 2300 m). Cette diversité de milieux, combinée aux pratiques anciennes et actuelles, a favorisé une biodiversité exceptionnelle. L'Oisans a connu une profonde déprise agricole des zones les plus basses (anciennes terres cultivées ou fauchées) depuis les années 50 accompagnée par des transformations importantes des systèmes d'élevage et des pratiques. Par contre, cette déprise n'affecte pas le domaine pastoral d'altitude dont le cheptel utilisateur a même augmenté entre les années 70 et 80, avec comme pour le Vercors des pratiques en évolution. La récente augmentation de la demande pour les alpages du PNE soulève d'importantes questions pour la gestion de ce parc national et ses zones périphériques, dont certaines sous Natura 2000. Les enjeux se situent autour du maintien d'une activité pastorale durable. Les études menées pour le projet SECALP se sont concentrées sur Villar d'Arène, commune du Parc National des Ecrins de 271 habitants et d'une superficie de 77,5km². Son adret composé majoritairement de prés de fauche et de pâture d'intersaison (118 ha) dans la partie basse et d'alpages (600 ha) dans la partie haute est utilisé actuellement par 9 éleveurs (dont un à la retraite) et un berger transhumant malgré l'altitude élevée de la zone (1650-2500 m). Le cheptel de 400 bovins et 900 ovins est complété l'été par environ 1000 ovins transhumants. Actuellement l'élevage bovin concerne pour moitié des éleveurs de génisses (à destination des zones AOC de Savoie et Haute-Savoie) et pour l'autre moitié des éleveurs allaitants. Une particularité de la commune est la gestion collective des prés par une association foncière pastorale mise en place depuis 1976 qui a permis aux agriculteurs d'échanger des parcelles afin de faciliter leur travail. Les alpages sont quant à eux gérés par des groupements pastoraux.

II - Synthèse des résultats et implications

Cette partie reprend l'ensemble des résultats et les confronte aux objectifs et hypothèses du projet de recherche. Cette synthèse proposée pour chacun des Axes de travail, est suivie par une tentative de synthèse transversale. Les détails des méthodologies et résultats pour chacune des composantes du projet sont présentés dans la partie III du rapport.

Axe 1 - Mécanismes écologiques d'adaptation aux changements climatiques, dont la sécheresse

1.1 Analyse des réponses observées sur les 30 dernières années

L'analyse des données de sites d'étude à long terme sur la Réserve Naturelle des Hauts Plateaux du Vercors (Réserve Biologique Intégrale du Vercors et dispositif de défens du Cemagref) a permis pour la première fois de décrire dans le cadre des Alpes françaises les effets du climat sur la dynamique de la végétation.

1.1.1. Résilience de la biodiversité et de la valeur d'usage des formations herbacées

Objectifs : Déterminer la sensibilité des végétations d'alpage dans un contexte de recrudescence des sécheresses sur le moyen terme (~25 ans). Analyser les interactions avec les pratiques pastorales sur la réponse de ces végétations dans ce même contexte.

Hypothèse : Le pâturage accentue les effets négatifs des épisodes de sécheresses sur la végétation en comparaison de zones non pâturées.

Résultat : L'analyse de la composition floristique et des trajectoires dynamiques identifiées sur 30 ans en situation de pâturage vs. d'abandon suggère que les végétations d'alpage étudiées présentent une stabilité relativement importante à la recrudescence des sécheresses observées sur la période. La pratique pastorale a à ce jour un effet supérieur à celui de l'évolution du climat. Plutôt qu'un facteur de risque de dégradation suite aux épisodes de sécheresse elle apparaît comme un élément stabilisateur améliorant la résistance/résilience des couverts au changement climatique et le maintien de leur valeur pastorale.

Implications : Les pratiques pastorales apparaissent comme un élément déterminant dans la résistance/résilience des végétations d'alpage sur le moyen terme (25 ans) et du maintien de leur valeur pastorale. Certaines espèces caractéristiques des prairies plus fraîches peuvent constituer des indicateurs de la sensibilité de ces pelouses aux sécheresses et d'une perte potentielle de valeur pastorale.

1.1.2. Résilience des écotones forestiers le long d'un gradient d'altitude

Objectifs : Identifier les patrons d'évolution des communautés forestières, des écotones forêt/forêt et de l'écotone forêt/alpages à la suite d'épisodes de sécheresse. Identifier les communautés forestières les moins résilientes après sécheresse (déperissements, difficultés de régénération, changements d'essences), et les prairies les moins résistantes à la colonisation par les ligneux.

Hypothèses : Sur les 30 dernières années, les communautés forestières ont montré une résilience plus faible aux épisodes de sécheresse : en limite inférieure des aires de distribution (proche des écotones) ; dans les zones les plus sèches et sur les sols les plus contraignants ; et dans les plantations d'épicéa, sapin et pin à basse altitude. La colonisation ligneuse des prairies devrait être accélérée par le réchauffement en haute altitude et limitée par la sécheresse en basse altitude.

Résultat : On observe un décalage entre les niches climatiques de régénération des espèces forestières et les niches climatiques de présence des adultes. Sapin et érable pourraient présenter des signes de remontée en altitude alors que le pin à crochet pourrait bénéficier d'une moindre compétition à sa marge inférieure. Les difficultés méthodologiques rencontrées nous empêchent cependant d'apporter des réponses fermes à ces questions. Notre hypothèse de faible résilience en limite inférieure de l'aire semble donc être confirmée pour les espèces compétitives mais peu tolérantes au stress (sapin, érable), en lien avec un effet température. La résilience est faible également pour les espèces peu tolérantes (épicéa, hêtre), quand elles sont situées sur sol superficiel (effet sécheresse), mais il s'agit plutôt de la limite supérieure de l'aire de distribution de ces espèces.

Nos hypothèses ne sont par contre pas confirmées pour le pin à crochet, espèce tolérante au stress et située sur sol superficiel, car il profite d'un facteur anthropique autre (diminution du pâturage) et peut être d'une diminution de la compétition par le sapin et l'épicéa.

Implications : La dynamique spatiale de la régénération des essences forestière est difficile à appréhender. Un effort d'observation et de suivi particulier de la régénération est nécessaire pour améliorer notre capacité de prédiction de la réponse de la régénération au changement climatique. Nos premiers résultats suggèrent que la régénération des essences commerciales, en particulier épicéa et sapin, est peu dynamique à la fois à la limite inférieure et à la limite supérieure de leur étage, ce qui compromet l'avenir de leur production dans un contexte de changement climatique. Le Pin à crochet se régénère bien mais reste actuellement localisé dans des zones d'altitude difficiles d'accès et protégées (réserve intégrale) et n'est donc pas concerné par la production forestière. Le maintien des alpages peut par contre nécessiter de lutter dans certains cas contre son envahissement.

1.1.3. Réponses observées sur les 30 dernières années – Conclusion :

Même pour des espaces protégés où la récolte de données pour les analyses sur le long terme est une priorité, les modifications de la biodiversité au changement climatique et en particulier aux sécheresses restent difficile à appréhender. L'importance des interactions avec la gestion, qui ne peuvent être quantifiées que par des approches expérimentales à long terme telles que celle menée sur les alpages, ou évitées dans des situations de protection intégrale, compromet la détection des effets du climat *per se*. Au vu des données disponibles, la dynamique de la végétation des alpages du Vercors est aujourd'hui contrôlée par la gestion pastorale plutôt que par le climat. Le maintien de cette gestion permet la stabilité de la biodiversité et de la valeur pastorale qui en son absence se sont dégradées sur les 30 dernières années. Pour autant, les approches expérimentales ont échoué pour évaluer la colonisation de ces alpages par les ligneux (pin à crochet). Dans le cas des forêts, on commence à percevoir des effets du réchauffement sur la régénération du sapin et de l'érable, mais aussi du hêtre et de l'épicéa. A long terme, la filière bois pourrait donc souffrir d'une tension sur les résineux de montagne, et la surveillance de la régénération paraît essentielle. Les résultats de nos analyses suggèrent que la physionomie des paysages pourrait évoluer vers une contraction relative des espèces emblématiques de l'étage montagnard : hêtre, sapin, épicéa et une tendance à la fermeture des alpages par une expansion vers le bas du pin à crochet dont la régénération semble peu sensible au stress climatique.

1.2. Mécanismes écologiques de résilience / vulnérabilité

Le recours à des approches expérimentales fines ont permis d'identifier les mécanismes contrôlant les réponses des espèces alpines herbacées et arborées à la combinaison sécheresse-réchauffement. Complétées par l'analyse des données de mortalité forestière, elles ont également permis de faire la part entre effets de la recrudescence des épisodes de sécheresse et les effets soit d'autres facteurs climatiques, soit d'autres perturbations naturelles ou par la gestion.

1.2.1. Dynamique des formations herbacées

Objectifs : Identifier les mécanismes à l'origine des modifications de caractéristiques des communautés et de la ressource fourragère en réponse aux sécheresses dans les prairies d'altitude. Evaluer l'importance des effets d'interaction entre pratiques et événements climatiques extrêmes.

Hypothèse : Le mode d'exploitation de la végétation (fauche, pâturage) accentue les effets négatifs de la sécheresse sur la végétation (diminution importante du recouvrement végétal et de la diversité).

Résultats : Les végétations étudiées présentent une résistance parfois limitée mais une très forte résilience aux phénomènes de sécheresses même extrêmes simulés par des dispositifs d'interception de la précipitation. Cette forte capacité d'adaptation peut s'expliquer d'une part par l'ajustement intra-spécifique des traits fonctionnels qui contribuent à compenser les effets négatifs de la sécheresse, d'autre part par l'adaptation physiologique des espèces de pelouse subalpine aux contraintes abiotiques, dont la sécheresse mais aussi le froid.

Les effets du pâturage ou de la fauche sont suffisamment importants pour minimiser ceux de la sécheresse, selon une relation de prédominance et non d'amplification comme émis dans notre hypothèse. De ce fait, les effets du changement climatique sur les prairies d'altitude et les alpages sont susceptibles d'être principalement indirects, via les réponses des éleveurs et des bergers aux années de sécheresse en termes de changement de pratiques.

Implications : L'enjeu majeur sur ces milieux est de pouvoir gérer la production l'année de la sécheresse. Maintenir un niveau raisonnable de pâturage peut-être positif pour la capacité de réponse de ces milieux. Un plan d'action pour les années de sécheresse pour compenser les pertes de fourrages sera probablement nécessaire. Si les années de sécheresses verront des réductions de la quantité et de la qualité des fourrages, les réponses à moyen terme de la valeur d'usage seront donc plutôt déterminées par les adaptations des éleveurs et des bergers à la récurrence des sécheresses.

1.2.2. Quantification des phénomènes de mortalité en forêt

Objectif: Quantifier la mortalité des différentes espèces forestières en lien avec les épisodes de sécheresse, les facteurs stationnels (en particulier sol), la position par rapport à l'aire de distribution de l'espèce et le stade de développement.

Hypothèses : Certaines communautés forestières connaissent de fortes mortalités pendant et après les sécheresses. On attend: (i) une sur-mortalité après sécheresse pendant plusieurs années (attaques de pathogènes) ; (ii) une mortalité particulièrement forte pour les espèces réputées « sensibles » ou étendues en périphérie de leur aire naturelle : Epicéa, Sapin, Pin sylvestre ; (iii) un lien à l'échelle de l'arbre entre mortalité et contraintes locales du sol.

Résultats : Nous avons mis au point une méthode d'estimation des stocks et des taux de mortalité en volume annuels à l'échelle de parcelles forestières depuis le début du 20^e siècle à partir de documents de gestion. Les variations annuelles de mortalité – qui est faible en moyenne : autour de 0.2%/an - s'expliquent essentiellement par les événements de tempête, et les sécheresses ne jouent qu'un rôle secondaire sur stations productives. Dans certaines forêts, on peut néanmoins mettre en évidence une interaction entre sécheresse et tempête, indiquant le fait que la sécheresse peut fragiliser le peuplement quand elle intervient l'année précédant la tempête. Au niveau des facteurs stationnels, les mortalités semblent plus élevées en pessière qu'en hêtraie et plus élevées sur les stations à faible réserve hydrique. Les modèles statistiques obtenus ont permis d'améliorer le modèle de dynamique forestière Samsara, pour lequel ils permettent d'améliorer la représentation de la mortalité des arbres de diamètre > 25 cm (commercialisables).

Implications : Les taux de mortalités accidentelles observés dans les forêts de production du Vercors sur le 20^e siècle ont été faibles en moyenne et ont été peu influencés par les événements de sécheresse. Sur stations productives, on peut donc estimer que les forêts du Vercors sont peu vulnérables aux sécheresses. Des successions de sécheresses sur plusieurs années n'ont cependant pas été observées durant le 20^e siècle et il n'est pas possible de prévoir aujourd'hui la réponse des forêts à ce type de scénario extrême. Le point faible des forêts du Vercors pourrait donc être plus lié à des difficultés de régénération résineuse en limites d'étages (1.1.2) qu'à la mortalité des adultes. Une augmentation des prélèvements par crainte de dépérissements ne semble donc pas nécessaire. Les documents de gestion forestière (inventaires et sommiers) constituent des sources d'information très précieuses sur l'histoire des peuplements forestiers. Des améliorations au niveau du renseignement et de l'archivage de ces documents sont souhaitables.

1.2.3. Effets des déterminants climatiques sur le recrutement des espèces arborées

Objectifs: Quantifier les capacités de recrutement des espèces arborées en fonction des variables climatiques (température et disponibilité en eau du sol), des interactions biotiques et des pratiques pastorales.

Hypothèses : Le recrutement est limité par la sécheresse aux limites inférieures des étages des espèces et favorisée par une augmentation de température aux limites supérieures. Les interactions entre plantes (strate arborée ou strate herbacée) sont déterminantes pour le recrutement et peuvent moduler les effets des changements climatiques (la colonisation par des espèces des étages inférieurs peut être limitée par la compétition des communautés en place).

Résultats : Notre expérimentation manipulant les couverts arborés et herbacés sur des gradients d'altitude pour 7 espèces forestières a montré que les effets compétitifs directs de la canopée et de la végétation herbacée sur les semis augmentaient dans les milieux plus chauds, ce qui suggère que ce mécanisme opère en particulier à la base de l'étage de végétation. Une augmentation de la température et de la sécheresse augmentent cette compétition, en plus de l'effet direct négatif de la sécheresse sur les semis. Ce résultat est cohérent avec l'observation d'une limitation recrutement aux limites inférieures des étages des espèces. Une facilitation indirecte de la régénération par la canopée (via une limitation de la végétation herbacée) apparaît également en

conditions plus chaudes. En haut de l'étage, le recrutement est limité avant tout par l'effet direct de la température et une augmentation de celle-ci peut être bénéfique, sauf pour les espèces dont la limite supérieure correspond à des sols superficiels (voir 1.1.2).

Le modèle de survie des plantules selon la température, l'ombrage par les arbres adultes, la présence de végétation herbacée, et les interactions arbres adultes x herbacées développé pour six espèces (chêne, hêtre, sapin, épicéa, mélèze, pin sylvestre, pin à crochet) nous permet de mieux comprendre les mécanismes en jeu. Cependant il s'avère insuffisant pour améliorer le modèle Samsara qui simule la régénération depuis la graine jusqu'au recrutement d'un arbre adulte, et devra en complément recourir à des données d'inventaires.

Implications : L'effet de la végétation au sol est déterminant pour la régénération dans les conditions plus chaudes mais est contrôlé par la fermeture de la canopée. Pour la plupart des espèces, les conditions de régénération les meilleures sont donc dans de petites ouvertures ou sous un couvert léger. Au vu des difficultés de régénération des résineux (épicéa et sapin) (1.1.2), dans le cadre d'une augmentation de température et de fréquence des événements de sécheresse il faut donc envisager sur le long terme soit une réduction de leur place dans la production, soit une augmentation des travaux les favorisant par rapport à la végétation herbacée et aux feuillus. En outre, la facilitation indirecte, qui augmente aussi avec la température, doit être prise en compte pour l'adaptation de la gestion forestière dans le contexte du réchauffement climatique : la sylviculture doit veiller à limiter des ouvertures trop importantes de la canopée qui pourraient favoriser un développement de la végétation au sol et bloquer la régénération. De manière générale, ces implications du changement climatique pour le recrutement, et leurs conséquences pour l'adaptation sont probablement sous-estimées par les acteurs forestiers (Axe 3).

1.3. Mécanismes écologiques de résilience / vulnérabilité – Conclusion

Les réponses de la biodiversité au changement climatique et en particulier aux sécheresses restent difficile à appréhender. L'importance des interactions avec la gestion, ou avec d'autres événements comme les tempêtes ou la prédation, compromet la détection des effets du climat *per se*. Toutefois, les écosystèmes alpins ont globalement montré une résilience importante par rapport aux événements de sécheresse, même pour la simulation expérimentale d'événements extrêmes pour les alpages.

Dans le cas des prairies, plusieurs mécanismes fonctionnels liés à l'adaptation à la variabilité climatique (dont le froid) assurent la résilience de la composition floristique et du fonctionnement de l'écosystème qui déterminent la valeur d'usage. Les effets de la gestion sont suffisamment importants pour minimiser ceux de la sécheresse. De ce fait, d'une part l'enjeu majeur sur ces milieux est de pouvoir gérer la production l'année de la sécheresse ; d'autre part les effets du changement climatique sur les prairies d'altitude et les alpages sont susceptibles d'être principalement indirects, via les réponses des éleveurs et des bergers aux années de sécheresse en termes de changement de pratiques.

Dans le cas des forêts, la mortalité observée au cours du 20^{ème} siècle sur les stations productives n'est pas liée aux sécheresses sauf si elles précèdent une tempête. Les mortalités semblent néanmoins plus élevées en pessière qu'en hêtraie et plus élevées sur les stations à faible réserve hydrique. Pour la régénération, les effets compétitifs de la végétation herbacée pour l'eau du sol augmentent avec la température et pourraient être exacerbés par des sécheresses. Les travaux de réduction de la strate herbacée et des feuillus seront donc un élément essentiel d'adaptation au changement climatique pour maintenir la production de résineux. Les approches expérimentales pour évaluer les interactions entre sécheresse et colonisation des alpages du Vercors par le pin à crochet ont échoué, et ont plutôt souligné le rôle de la prédation.

Pour autant, les effets à long terme, en particulier de successions d'années de sécheresse à caractère exceptionnel, restent inconnus, en particulier via les interactions avec les sols.

Axe 2 - Processus d'adaptation des acteurs utilisateurs de l'espace

Nous avons choisi de présenter ici uniquement les résultats concernant les adaptations aux sécheresses récentes (Etape 1), les résultats concernant les adaptations envisagées (Etape 2) face aux scénarios de sécheresses futures et de leur contexte socio-économique étant présentés avec la synthèse pour l'axe 3.

2.1. Processus d'adaptation des acteurs agricoles (éleveurs et bergers)

Objectifs : Identifier les changements techniques, y compris dans l'organisation du travail qui se sont produits lors des sécheresses récentes et en comprendre les déterminants, aux niveaux de l'alpage et de l'ensemble de l'exploitation agricole. Identifier les anticipations déjà prises par les éleveurs et les bergers.

Hypothèses : Les leviers activés face aux sécheresses vont différer selon (i) les comportements des éleveurs et des bergers face à l'incertitude et leur perception du risque, (ii) la place de la phase pastorale dans le système d'élevage, (iii) les dispositifs de sécurisation du système fourrager et l'organisation du travail.

Résultats : Les éleveurs et bergers rencontrés sont préoccupés par l'impact du pâturage sur le renouvellement de la ressource pastorale. En systèmes d'élevage de haute montagne et pour les exploitations de type "fourrager", les leviers activés suite aux sécheresses durant les années 2000 sont surtout conjoncturels et réversibles : achats de foin pour compenser une baisse des stocks récoltés et quelques réaffectations d'usage en cours de campagne (pâturage de surfaces destinées initialement à la fauche). Dans les systèmes plus pastoraux (avec une durée d'hivernage réduite, donc des besoins inférieurs en stocks), les éleveurs ont joué sur la flexibilité de leur système à base de parcours en tirant parti de la diversité des milieux utilisés et de leur sensibilité différenciée aux épisodes de sécheresse. Quelques adaptations structurelles apparaissent dans ces systèmes pastoraux (agrandissements ou diminution du cheptel).

Les ajustements sont réversibles d'une année sur l'autre, ce qui a permis de préserver la cohérence technique et organisationnelle du système. Bon nombre de ces exploitations sont conduites par des ménages qui pratiquent la pluriactivité et peuvent "encaisser" un coup dur. Les achats de foin pénaliseraient la viabilité du système s'ils devaient se répéter d'année en année. On n'observe pas de mise en place d'activités de diversification susceptibles de modifier l'organisation du travail dans les exploitations enquêtées.

Sur les alpages, des adaptations conjoncturelles en cours d'estive ont généralement suffi pour surmonter les étés secs. Dans plusieurs cas, une diminution structurelle de la charge pastorale a été décidée en anticipation de futures sécheresses éventuelles.

Implications :

Sur les exploitations : limiter les achats de foin pour l'alimentation hivernale (agrandissement, amélioration de la productivité des prairies, reports de stocks) ; au pâturage jouer sur la flexibilité du système (espaces tampons, pâturage de surfaces de fauche).

Sur les alpages : Préserver la ressource pastorale en alpages (ajustement de la conduite du pâturage, des chargements, améliorations pastorales). Les préconisations de gestion et la réalisation des aménagements devront préserver, voire renforcer la flexibilité dans la conduite, les équipements et aménagements pastoraux sont étant essentiels pour desserrer les contraintes, par ex. : sécurité d'approvisionnement en eau pour l'abreuvement du troupeau ; implantation de cabanes, équipements de parcs et clôtures pour mieux prospecter certains secteurs et mieux utiliser la ressource pastorale). Les changements de conduite en alpage ne sont pas raisonnés indépendamment des modes de fonctionnement des exploitations qui les utilisent, à titre individuel ou sous forme collective. Les éventuelles préconisations de changements de pratiques doivent donc tenir compte de la place de la phase pastorale d'alpage dans le fonctionnement des exploitations utilisatrices.

Dans les situations les plus sensibles aux sécheresses, des suivis pluriannuels de la ressource pastorale mériteraient d'être mis en œuvre en s'appuyant sur des diagnostics pastoraux préalables, qui soient à la fois intégrés (objectifs pastoraux collectifs et individuels, enjeux environnementaux, enjeux liés au multi-usage) et partagés entre les différents acteurs (gestionnaires d'espaces protégés, éleveurs, bergers, collectivité locale,...).

2.2. Processus d'adaptation des acteurs forestiers

Objectifs : Identifier la perception par les *gestionnaires et propriétaires forestiers* du Vercors des changements climatiques et les adaptations des stratégies sylvicoles envisagées et/ou déjà appliquées à la suite de l'épisode de 2003.

Hypothèses : Les mesures prises face aux sécheresses vont différer selon : (i) la perception du risque par le gestionnaire et le propriétaire (ii) l'importance relative des différentes fonctions de la forêt pour son propriétaire et l'influence des différentes catégories d'utilisateurs de la forêt, (iii) l'adéquation peuplement / station et les infrastructures héritées de l'histoire.

Résultats : Les enquêtes menées auprès de différentes catégories d'acteurs, et les analyses des documents de gestion suggèrent que bien qu'ils se sentent concernés par le changement climatique annoncé à l'échelle du globe, les acteurs forestiers n'en percevaient en 2010 que des conséquences relativement limitées à court terme sur le Vercors. Nous n'avons donc pas pu identifier de réorganisations significatives des interventions sylvicoles. Les forestiers publics ont poursuivi les principes d'une gestion respectueuse de l'équilibre écologique de la forêt : adéquation des essences à la station et développement des mélanges qui vont dans le sens d'une bonne résilience de la forêt aux perturbations en général. Les forestiers privés ont été peu touchés par les événements de 2003 et sont pour l'instant assez attentistes. On remarque cependant un infléchissement du discours des acteurs entre 2009 et 2011 avec une préoccupation grandissante par rapport au changement climatique.

Implications : La faible mobilisation des acteurs forestiers par rapport au changement climatique est cohérente avec l'absence d'événements de très forte mortalité qui donne une impression de résilience. Cependant, bien que les sécheresses n'aient pas eu un impact trop marqué sur les forêts du Vercors sur les dix dernières années, l'épisode climatique de 2003 doit être considéré comme un avertissement sérieux. La mise en route d'une réflexion collective sur la prise en compte du changement climatique dans la politique forestière locale, allant au-delà du principe de respect de l'équilibre écologique de la forêt avec son milieu, serait souhaitable. En outre, il serait essentiel d'identifier les étapes de la gestion forestière dans lesquelles l'occurrence d'événements exceptionnels de type sécheresse peut être anticipée : aménagements forestiers, surveillance de la forêt, programmation des coupes, martelage, procédures de crise.

2.3. Processus d'adaptation des acteurs utilisateurs de l'espace - Conclusion

Les conséquences des sécheresses sur les activités d'élevage et forestières sont par nature différentes. Si la baisse annuelle de la production végétale a des conséquences immédiates et problématiques pour les éleveurs qui doivent assurer l'alimentation de leurs troupeaux toute l'année et tous les ans, l'impact de quelques années sèches (moindre croissance des arbres et mortalités des jeunes semis) sera minime à l'échelle de temps de la gestion forestière. Par ailleurs, la forêt n'est généralement pas la source de revenu principale des propriétaires forestiers, contrairement à la production fourragère pour les agriculteurs.

Les préoccupations des éleveurs et des forestiers se rejoignent toutefois sur l'impact à moyen terme des sécheresses sur les écosystèmes. Les éleveurs sont très soucieux de l'impact couplé des sécheresses et des pratiques de pâturage sur l'évolution de la ressource fourragère; c'est pourquoi ils veillent à ajuster leurs pratiques pour éviter de dégrader les surfaces pastorales utilisées. Les forestiers s'interrogent sur la façon de gérer les substitutions d'essences qu'ils commencent à observer, et sur leurs conséquences pour les filières. Ils identifient avant tout des contraintes à leurs possibilités d'adaptation (contraintes financières, de structure, manque de visibilité sur les effets du climat sur la forêt à long terme, manque de solutions clés en main ...). Ils redoutent également des effets seuils qui conduiraient à des dégradations de la forêt (fragilisation des arbres et augmentation de la sensibilité aux tempêtes, ravageurs...). Si les acteurs forestiers publics commencent à anticiper ces risques, le secteur privé demeure pour l'instant attentiste et ne modifie pas ses pratiques.

Nous avons constaté un cloisonnement assez fort entre les acteurs agricoles et forestiers du Vercors, et dans leur perception de l'intersection de leurs activités. Pourtant un des leviers régulièrement activé par les éleveurs est le recours accru au pâturage d'espace "tampons" boisés, dont certains sont gérés par les acteurs forestiers. En alpage de nouvelles problématiques émergent autour de la place de l'arbre pour préserver la ressource pastorale. Les deux groupes d'acteurs devront donc sans doute d'avantage se côtoyer à l'avenir pour une gestion concertée des milieux et un partage des ressources.

Axe 3 - Orientations et leviers à mobiliser pour une gestion durable des espaces naturels de montagne intégrant le changement climatique

Objectifs : Elaborer des scénarios prospectifs d'évolution (climat, écosystèmes, contexte socio-économique) à l'horizon 2015-2020, à proposer aux acteurs agricoles et forestiers. Identifier les adaptations envisagées par ces acteurs face à des scénarios de sécheresses à venir et aux processus écologiques associés. En complément d'une approche technique analyser le rapport des acteurs au changement et leur façon d'agir en situation d'incertitude (réactions et anticipations). Evaluer les conséquences des scénarios sur la durabilité de la gestion des écosystèmes alpins. Proposer des orientations pour accompagner l'adaptation des acteurs agricoles et forestiers vers un mode de gestion durable.

Hypothèses : Les réactions face aux sécheresses récentes peuvent préfigurer des voies d'adaptation à des événements subis et imprévus mais ne déterminent pas forcément les attitudes des éleveurs et des bergers face à des scénarios prospectifs qui peuvent révéler des anticipations s'inscrivant dans le moyen terme.

Les changements de contexte plus globaux (évolution de la PAC options de modulation retenues, marchés et intrants, foncier, changements "internes" à l'exploitation) orientent les voies d'adaptation à long terme.

Résultats :

(1) Scénarios prospectifs d'évolution à l'horizon 2015-2020 : Deux modalités climatiques et les deux modalités socio-économiques ont été combinées en quatre scénarios. Dans la modalité climatique « *intermittente* » des sécheresses de printemps ou d'été alternent avec des années normales, tandis que quatre années de sécheresses se succèdent dans la modalité « *choc* ». Dans la modalité socio-économique « *globale* », les territoires et leurs acteurs sont confrontés à la poursuite de la mondialisation et de la concentration urbaine, et l'agriculture et la foresterie ne sont soutenues que pour leur rôle de production de services environnementaux globaux (ex. stockage de carbone). Dans la modalité socio-économique « *territoriale* », les citoyens montrent un intérêt grandissant pour leur territoire et les activités sont aidées dans leur rôle de production qualité tout en respectant des exigences environnementales fortes. Les quatre scénarios narratifs ont été traduits en termes de modifications attendues des écosystèmes et des ressources exploitables.

(2) Adaptation des éleveurs et des bergers : La modalité climatique intermittente s'apparente aux situations auxquelles les acteurs de l'élevage ont dû s'adapter ces dernières années. La flexibilité de leur système fourrager et les adaptations déjà mobilisées ou envisagées devraient suffire. En cas de modalité climatique choc, la réduction des ressources fourragères conduirait à un ajustement des pratiques (fauche, fertilisation, surfaces tampons) et des troupeaux, et les éleveurs chercheraient à compenser les pertes de revenu soit par un travail à l'extérieur en cas de modalité socio-économique globale, soit par une meilleure valorisation des animaux restants voire, pour certains, par des activités touristiques dans la modalité territoriale. Sur ces grandes lignes, nous avons ainsi mis en évidence trois grandes stratégies individuelles d'adaptation applicables aux deux sites d'étude : "je diversifie pour maintenir le revenu en diminuant l'impact économique des sécheresses", "je m'adapte mais je reste avant tout éleveur", "je ne changerai pas de système". Dans tous les cas, peu de ruptures sont envisagées en relation notamment avec la conception du métier : tout comme certains éleveurs du Vercors n'envisagent pas de ne plus avoir d'animaux, la majorité des agriculteurs de Villar d'Arène ne souhaitent pas arrêter la fauche. En outre, la comparaison entre une approche par entretien (Vercors) et une approche de jeu avec interactivité entre acteurs (Villar d'Arène), souligne que ces stratégies individuelles doivent être mises en regard d'une dimension collective, territorialisée qui peut agir comme contexte décisionnel (rôle décisionnel des collectifs locaux) et comme contrainte (ex. saturation des marchés). Enfin, l'approche par jeu a mis en évidence l'importance de l'apprentissage inter-annuel.

(3) Leviers d'action mobilisés par les gestionnaires forestiers : En cas de modalité climatique intermittente, les acteurs forestiers pratiqueraient une surveillance sanitaire accrue afin d'exploiter rapidement les arbres dépérissants pour éviter la propagation de ravageurs. Ils adopteraient une attitude plutôt attentiste, s'efforçant de favoriser les essences se développant naturellement, en s'appuyant sur la régénération naturelle et non sur des plantations. Un risque important de diminution de la place des résineux de montagne menaçant à terme toute la filière forestière du Vercors, apparaît cependant dans ce scénario. La modalité choc préoccupe particulièrement les acteurs forestiers car elle remet en question à court terme le rôle de protection de la forêt contre les risques naturels. Les acteurs forestiers semblent moins sensibles à l'évolution du contexte socio-économique qu'aux modalités climatiques, soulignant qu'aucune étude ne peut prédire la situation économique de la filière dans 20

ou 30 ans. La prise de conscience d'un environnement en évolution remet en cause les connaissances des acteurs forestiers sur l'autécologie des essences. Le fait que sur sa durée de vie, un arbre puisse expérimenter des changements profonds de climat décourage leurs velléités de trouver des essences adaptées à la fois aux conditions actuelles et aux conditions futures, et conforte leur prudence par rapport à l'application locale d'objectifs nationaux de prélèvements

En conclusion, Les adaptations des acteurs forestiers comportent une grande part d'attentisme. Les éleveurs, confrontés de plein fouet aux sécheresses récentes, ont dû s'adapter, mais il s'agit souvent de simples ajustements réversibles. Les adaptations structurelles, contraintes par le contexte local, sont plus rares. On note quand même des agrandissements, voire des diminutions d'effectifs envisagées et, peut-être surtout, une mobilisation de savoir-faire et une capitalisation d'expérience pour tirer parti de la flexibilité du système et de ses marges de manœuvre. Les éventuels changements plus radicaux mettent en jeu l'attitude face aux aléas et intègrent toujours d'autres facteurs, en particulier relatifs à l'évolution du contexte socio-économique. Cela est beaucoup moins prégnant chez les acteurs forestiers qui se situent sur du plus long terme et ignorent quelle pourraient être l'évolution des contextes économiques sur la filière bois.

(4) Implications pour les adaptations pour une gestion durable et les évolutions des politiques publiques

Élevage : Le besoin des éleveurs n'est pas uniquement/forcément financier. Ils sont demandeurs de conseils techniques (effet de la fertilisation sur la quantité de foin produite en cas de sécheresse, irrigation, scénarisation économique y compris demande locale en produits, expérience de sécheresses par des éleveurs d'autres zones d'études...). Les adaptations de l'élevage demanderont l'accompagnement du développement des transformations fermières et des circuits courts : maintien des abattoirs locaux, création de salles de découpe collective et de magasins de vente...

Les éleveurs seraient prêts à s'engager dans des MAE exigeantes au plan environnemental reposant sur une obligation de résultat, dans la mesure où ce résultat est maîtrisable par eux (contrôle d'états de végétation) et qu'il traduit une reconnaissance sociale de leur savoir-faire. En revanche, ils peuvent être profondément heurtés par des mesures allant à l'encontre de leur conception du métier d'éleveur.

En forêt, les scénarios mettent en évidence un risque de dégradation du caractère multifonctionnel de la forêt (production de bois de résineux, protection, biodiversité). Les propriétaires privés n'investiront pas dans leurs forêts sans aides publiques, tandis que l'ONF poursuivra vraisemblablement sa politique de récolte des bois dans les forêts soumises, facilement accessibles. Pour s'adapter, les acteurs forestiers expriment un besoin de suivi des écosystèmes et de connaissances sur les changements en cours, parfois discrets à court terme mais lourds de conséquences à long terme (régénération), et sur les capacités d'adaptation à moyen terme des essences forestières autochtones et de reboisement à un climat changeant.

Interactions agriculture-forêt : les parcours plus ou moins boisés soumis au régime forestier, déjà utilisés face aux sécheresses depuis une dizaine d'années, pourraient être des espaces-tampons pour l'élevage.

La poursuite des analyses des données dans les 12 mois qui viennent permettra de formaliser les questions et pistes d'approfondissement (lacunes de connaissances et de données) à aborder pour améliorer la capacité à prédire les effets de la sécheresse sur le territoire étudié, y compris en faisant évoluer le suivi à long terme des écosystèmes et de la gestion pastorale et forestière, et pour satisfaire les demandes exprimées par les acteurs.

(5) Orientations et leviers pour la gestion durable des espaces naturels de montagne – Conclusion

La construction par une démarche participative de scénarios combinant modalités climatiques et socio-économiques de manière factorielle a permis de mettre en évidence le rôle relatif de ces deux dimensions dans l'adaptation des acteurs de la gestion des espaces naturels. Conformément à ce qui a été observé concernant la perception et l'adaptation aux sécheresses récentes, la réalité du changement est plus prégnante pour les éleveurs que pour les forestiers, ne serait-ce qu'en relation avec les échelles de temps de leurs décisions et la détectabilité des effets des événements récents. De manière générale, les propositions d'adaptation sont en continuité avec les réponses récentes ou les anticipations qu'elles ont suscité. Les éventuels changements plus radicaux mettent en jeu l'attitude face aux aléas et intègrent toujours d'autres facteurs, en particulier relatifs à l'évolution du contexte socio-économique, bien que celui-ci reste une incertitude dont le poids est majeur, en particulier dans la position attentiste des acteurs forestiers. Enfin, même s'il reste un facteur crucial d'incertitude, le contexte réglementaire sera décisif dans la capacité des acteurs à mettre en place des adaptations, comme le seront l'accompagnement technique et territorial.

Axe 4 – Stratégies d’observation à long terme

L’analyse de l’existant et la mise en œuvre d’une base de données des réseaux et des protocoles sont les bases indispensables pour la constitution d’un réseau d’observation. C’est sur son travail et le début de son exploitation que se sont concentrés les efforts de SECALP. L’exploitation de ce jeu de données considérable se poursuivra dans les 12 mois à venir afin d’affiner les réponses aux questions posées pour la mise en place d’un réseau d’observation à long terme des sécheresses et de leurs effets sur les écosystèmes de montagne.

4.1. Réseaux d’observation

Objectif : Evaluer les réseaux d’observation existants ou en cours d’installation sur la zone d’étude selon des critères soit de représentativité de l’exposition climatique, des milieux et des processus écologiques attendus, et des systèmes de gestion, soit de valeur en tant que système d’alerte (ou sentinelle).

Résultats : L’analyse des réseaux en place met en évidence les faibles interconnexions entre réseaux, que ce soit entre territoires ou entre secteurs d’activité (élevage / forêt / protection de la nature). Une stratégie d’observation intégrée devra renforcer la communication et les liens opérationnels entre les réseaux comme le tente actuellement le réseau Alpages Sentinelles. Pour la forêt en particulier plusieurs réseaux se juxtaposent car ils s’intéressent à des espaces différents (forêt gérée, espaces forestiers protégés), à des processus différents (suivi écophysiologique, régénération, bois mort, croissance...), et sont gérés par des acteurs différents. La collaboration des gestionnaires au sein de réseau scientifiques permet des échanges de savoir-faire importants. Cette collaboration est primordiale dans la mise en place de suivis à long terme.

4.2. Indicateurs et méthodologies de mesure

Objectifs : Définir une série d’indicateurs de la météorologie, de la végétation (biodiversité, structure et production), des sols, des pratiques et des systèmes d’exploitation pastoraux, et de la gestion forestière.

Résultats : L’analyse des protocoles en cours sur le territoire pour le suivi de la météorologie, de la végétation (biodiversité, structure et production), des sols, des pratiques et des systèmes d’exploitation pastoraux, et de la gestion forestière souligne qu’aucun n’a été mis en place initialement pour le suivi de la sécheresse et de ses effets. Ces protocoles ne sont donc pour la plupart valorisables que par croisement entre observations, en particulier avec les observations climatiques. En outre, nombre de protocoles développés au niveau national ou international ne sont pas adaptés aux conditions spécifiques de la montagne, ou simplement trop lourds à mettre en œuvre pour un suivi à long terme à l’échelle territoriale. L’adaptation et la réalisation de protocoles spécifiques sont donc nécessaires pour la mise en œuvre d’un observatoire.

Par exemple, l’analyse des données à long terme (Axe 1) a montré que la mise en place de dispositifs légers (tous les 5 ans) de suivis floristiques sur des zones adaptées peut constituer un mode de veille de la sensibilité des milieux pastoraux aux modifications du climat. En forêt, un effort de suivi de la régénération est nécessaire pour améliorer la prédiction de la réponse de la régénération au changement climatique. Les documents de gestion forestière (inventaires et sommiers) constituent des sources d’information très précieuses sur l’histoire des peuplements forestiers. Il est essentiel que ces documents continuent à être renseignés de manière précise et archivés sur le long terme pour pouvoir être mis en relation avec l’histoire climatique. La centralisation et l’archivage, y compris informatique, des documents de gestion anciens et récents de l’ONF doivent être soutenues.

4.3 Les protocoles de suivi, la détection rapide des changements

Objectifs : Mettre en place des protocoles de suivi permettant la détection rapide des changements et tenant compte de la faisabilité par des agents de terrain (espaces protégés, services agricoles et pastoraux). Etablir des outils de diagnostics.

Résultats : Le suivi des évolutions climatiques, dont les phénomènes de sécheresse, et des changements de pratiques nécessitent la mise en place d’indicateurs pertinents et robustes pour prendre les meilleurs décisions en vue d’une gestion durable de la ressource et de la biodiversité. La montée en puissance des problématiques liées au changement global exige de pouvoir mobiliser des jeux de données pluridisciplinaires (végétation, climat,

sol, faune, gestion ...) se rapportant à de mêmes unités spatiales, et de mettre en cohérence des observations nécessairement à des pas de temps différents selon les processus. Pour ce faire, il est indispensable de renforcer la cohérence entre réseaux en termes de protocoles et de répartition spatiale des placettes. De tels progrès ont été réalisés dans le cadre des réseaux comme Alpages Sentinelles. Au niveau forestier, deux acteurs sont particulièrement structurants : l'Inventaire Forestier National, et l'Office National des Forêts. De manière générale, chaque réseau obéit à une logique et des contraintes qui lui sont propres. Impulser une vraie dynamique de coordination des réseaux demande des outils adaptés (Bases de données, Systèmes d'Information Géographiques) et une mobilisation des acteurs qui ne pourra se faire qu'au travers d'un projet collectif structuré et pourvu du budget correspondant.

4.4 Les observatoires comme outils pour accompagner changement

Objectifs : Identifier comment l'observation peut guider l'adaptation et réduire ses limites (Axe 3). Définir des stratégies de communication des résultats aux acteurs et aux décideurs.

Résultats : L'animation et une implantation territoriale fortes sont des garanties du succès d'un réseau d'observation sur la sécheresse dans les Alpes. L'établissement de diagnostics partagés entre gestionnaires des espaces naturels, acteurs agricoles, forestiers, scientifiques, et acteurs territoriaux est essentielle pour accompagner l'adaptation. Ceux-ci doivent aussi conduire à la définition commune de priorités de recherche et d'observation qui permettront non seulement de combler les manques de connaissances des processus écologiques et des dynamiques des socio-écosystèmes de montagne dans la perspective du changement climatique, mais de réduire les incertitudes qui freinent l'adaptation des acteurs. La communication régulière et la vulgarisation des résultats des suivis et des conclusions sur les dispositifs d'observation doivent impliquer une collaboration étroite entre chercheurs et partenaires techniques (conseillers agricoles, services pastoraux, mission durable de l'ONF, CRPF).

Conclusion générale

Les réponses des écosystèmes de montagne au changement climatique et en particulier aux sécheresses restent difficiles à appréhender. Toutefois, ces écosystèmes ont globalement une résilience importante par rapport aux événements de sécheresse, récente ou simulée expérimentalement. Pour autant, de premières réponses sont perceptibles concernant les processus de recrutement forestier. Les effets à long terme, en particulier de successions d'années de sécheresse exceptionnelle, sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes alpins restent inconnus, en particulier via leurs interactions avec les sols. Notre analyse a souligné une cohérence importante entre réponses écologiques observables selon les échelles de temps, réponses d'adaptation récentes des acteurs, et anticipations sur la base de scénarios combinant sécheresse et contexte sociétal.

Dans le cas des systèmes herbacés, si la résilience de la biodiversité et de la valeur d'usage des alpages apparaît forte grâce à des mécanismes d'adaptation à la variabilité climatique, les réponses à court terme peuvent être marquées, au moins en termes de production, voire de sa qualité. De ce fait, l'enjeu majeur sur ces milieux est de pouvoir gérer la production et l'alimentation du cheptel l'année de la sécheresse, et c'est bien cette phase critique qui mobilise l'attention des éleveurs et des bergers. Leurs réponses aux sécheresses récentes jouent sur la flexibilité des systèmes de production, sur l'exploitation (fauche, pâturage) comme sur l'alpage (conduite, chargement), sans réorganisation significative. A moyen terme, les effets écologiques de la gestion sont suffisamment importants pour minimiser ceux de la sécheresse, si bien que les effets du changement climatique sur les prairies d'altitude et les alpages sont susceptibles d'être principalement indirects, via les changements de pratiques des éleveurs et des bergers en réponse aux années de sécheresse, et surtout à leur éventuelle récurrence. Ces réponses, bien que n'impliquant pas de remise en cause fondamentale du mode de gestion et faisant appel aux marges de manœuvre déjà identifiées, pourront avoir des conséquences importantes en termes de gestion de l'espace à l'échelle territoriale. Les modalités de leur faisabilité dépendront fortement du contexte socio-économique, des politiques de soutien et des cadres réglementaires. Le développement des structures pour la valorisation des produits et l'appui technique pour la gestion durable de la ressource apparaissent comme des éléments clés dépendant de ce contexte.

Dans le cas des forêts la mortalité au cours du 20^{ème} siècle sur les stations productives n'est pas liée aux sécheresses sauf si elles précèdent une tempête. A contrario, on discerne une réponse de la régénération au changement climatique conforme aux attentes et aux mécanismes identifiés expérimentalement, mais celle-ci est encore peu perceptible pour les acteurs. Les observations confirment une vulnérabilité du sapin et de l'épicéa qui questionnent la viabilité à long terme de leur exploitation, mais ne justifient pas une augmentation des prélèvements. Le maintien de la production demandera en particulier une surveillance et une gestion de la régénération pour limiter la compétition par les feuillus et la strate herbacée, tout en évitant des trouées importantes. De plus, un scénario climatique sévère ('choc') mettrait non seulement en danger la production mais aussi la multi-fonctionnalité des forêts (biodiversité, protection) La progression du pin à crochet dans les alpages est confirmée, et son interaction avec la gestion de la strate herbacée par le pâturage sera un élément clé du maintien des alpages et de la physionomie des paysages. Face à cette situation, et aux lacunes de connaissances sur les dynamiques à plus long terme et sur d'éventuels effets de seuils, les acteurs forestiers, en particulier privés, adoptent une position attentiste et ne modifient pas leurs pratiques. Ils montrent certes une conscience croissante du changement climatique et de ses conséquences potentielles pour leurs ressources, mais identifient avant tout des contraintes à leurs possibilités d'adaptation. Les propriétaires privés n'investiront pas dans leurs forêts sans aides publiques, tandis que l'ONF poursuivra vraisemblablement sa politique de récolte des bois dans les forêts facilement accessibles. Pour s'adapter, les acteurs forestiers expriment un besoin de suivi des écosystèmes et de connaissances sur les changements en cours et à attendre.

Nous avons constaté un cloisonnement assez fort entre les acteurs agricoles et forestiers du Vercors, et dans leur perception de l'intersection de leurs activités. La réalité du changement est plus prégnante pour les éleveurs que pour les forestiers, ne serait-ce qu'en relation avec les échelles de temps de leurs décisions et la détectabilité des effets des événements récents. Les préoccupations des éleveurs et des forestiers se rejoignent toutefois concernant les modalités, relativement linéaires, et les conditions générales socio-économiques et réglementaires de leur adaptation à moyen terme à la recrudescence des sécheresses. Ils partagent aussi des interrogations sur les effets écologiques à long terme, et de forts besoins d'appui technique. Sachant que le pâturage d'espace "tampons" boisés constitue un levier d'adaptation important, et qu'en alpage de nouvelles problématiques émergent autour de la place de l'arbre pour préserver la ressource pastorale, les deux groupes d'acteurs devront collaborer à l'avenir pour une gestion concertée des milieux et un partage des ressources. Ajouté à la nécessité probable de diversification des activités des ménages, y compris avec le tourisme, ceci souligne l'importance que prendra une gestion et la prise de décisions à l'échelle territoire.

La mise en place d'un système d'observation adapté aux contraintes des milieux de montagne et aux besoins de leurs acteurs apparaît comme un défi non seulement scientifique, mais une réponse à une demande des acteurs pour soutenir leurs adaptations. L'analyse des réseaux et protocoles existants souligne un foisonnement complexe de réseaux, de dispositifs et de protocoles, dont le principal défi est l'intégration. Sur l'exemple du réseau Alpages Sentinelles, un tel observatoire devra assurer la coordination et la communication entre réseaux, et en particulier entre scientifiques et gestionnaires, entre protocoles pour les paramètres à combiner sur le climat, les écosystèmes (biodiversité et valeur productive) et les pratiques. La multiplicité des échelles spatiales et des pas temporels d'observation pour ces différentes facettes du système est un défi, tout comme le reste la continuité des observations sur le long terme (y compris archivage), et dans l'espace (maintien de réseaux de stations). Le partage de cette démarche entre gestionnaires des espaces naturels, acteurs agricoles, forestiers, scientifiques, et acteurs territoriaux est essentiel pour sa mise en place et sa pérennité, ainsi que pour accompagner l'adaptation.

III – COMPTE-RENDU DES RESULTATS OBTENUS

Axe 1- Mécanismes écologiques d'adaptation aux changements climatiques, dont la sécheresse

1.1 Analyse des réponses observées sur les 30 dernières années

1.1.1. Résilience de la biodiversité et de la valeur d'usage des formations herbacées

Méthodologie

Les deux objectifs principaux sont ici (i) d'analyser l'évolution du couvert prairial sur la période 1988-2011 dans ce contexte de réchauffement global et d'épisodes de sécheresses plus fréquents et (ii) de déterminer si les pratiques pastorales influencent la réponse de la végétation à cette évolution climatique. La difficulté majeure est de dissocier les effets respectifs du climat de ceux des autres facteurs, notamment le pâturage. Nous avons donc choisi de nous appuyer sur un réseau de 16 sites expérimentaux constitués de placettes pâturées ou mises en défens depuis 1988 et ré-échantillonnées en 2001. Etant donné que la pression pastorale sur l'alpage n'a pas évolué sur cette période nous pouvons faire l'hypothèse qu'à pression pastorale constante sur ce milieu les conditions climatiques changeantes constituent le moteur principal de la dynamique de végétation. Cette approche a été complétée par la réalisation de relevés indépendants du dispositif sur 7 autres sites déjà échantillonnés en 1988 ou 1989 soit au total 23 sites représentant les communautés végétales d'intérêt pastoral les plus abondantes sur l'alpage.

Principaux résultats

Dynamique globale de la végétation : L'analyse globale de l'ensemble des relevés effectués en 1988, 2001 et 2011 permet de différencier trois types de végétations contrastées : pelouses sèches, pelouses fraîches et pelouse pré-forestière (Figure III.1.2). Les dynamiques temporelles de ces végétations sont de faible amplitude par rapport aux différences entre communautés. Un effet fort attendu des sécheresses répétées aurait été que la composition des pelouses fraîches se rapproche au cours du temps de celles des pelouses sèches xériques, ce qui n'a pas été observé. Les dynamiques de la composition entre 2001 et 2011 sont souvent dissociées de celles observées entre 1988 et 2001, suggérant ainsi l'existence de fluctuations dues aux conditions climatiques ou à d'autres facteurs, mais qui sont réversibles dans le temps. Une analyse statistique montre que les changements de végétation sur la période considérée sont plus importants dans les défens qu'en situation pâturée ($p < 0.05$). Même dans un contexte de recrudescence des sécheresses, le pâturage demeure un facteur de stabilité du couvert en empêchant le phénomène de succession végétale.

Diversité spécifique : La richesse et la diversité floristiques ont augmenté significativement entre 1988 et 2011 ($p < 0.001$). L'augmentation est plus nette entre 1988 et 2001 qu'entre 2001 et 2011, dénotant d'une évolution non linéaire au cours du temps. Il se dessine toutefois une interaction positive ($P < 0.1$) entre pâturage et diversité. L'action conjointe du climat et des usages pastoraux peut ainsi favoriser la coexistence ou l'apparition de nouvelles espèces sur ces milieux fortement naturellement contraints.

Composition du couvert et valeur pastorale : L'évolution des différents groupes morphologiques et des principales espèces sont parfois dépendantes de l'usage pastoral. La diminution significative de l'ensemble des graminées au profit des dicotylédones notamment des légumineuses est plus prononcée dans les zones d'exclusion du pâturage. Au niveau spécifique peu d'espèces dominantes présentent une évolution significative sur la période considérée. Toutefois les espèces les plus sensibles sont des espèces caractéristiques des pelouses fraîches (*A. capillaris*, *F. rubra*, *G. nudicaulis*) dont les abondances diminuent surtout en absence de pâturage. Ces résultats confirment le probable rôle stabilisateur du pâturage sur la composition du couvert face à la recrudescence des épisodes secs. Ces changements de composition ne sont pas encore suffisamment importants pour influencer significativement la valeur pastorale globale.

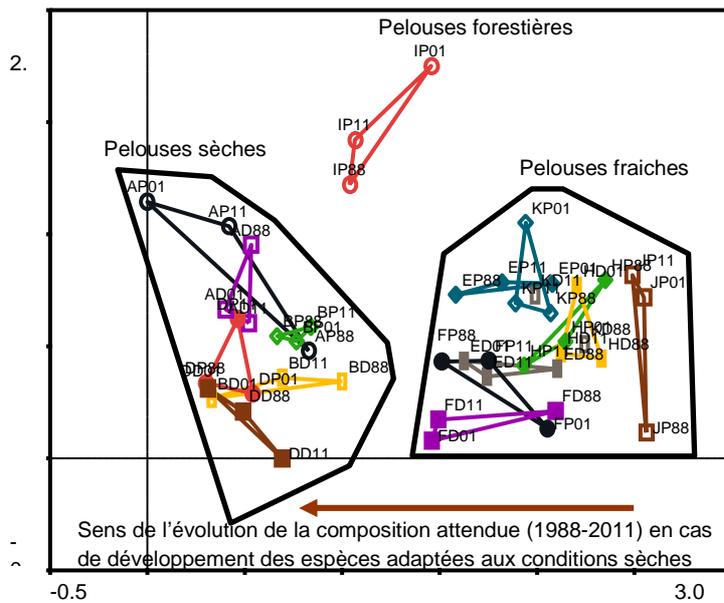


Figure III.1. 2 : Représentation dans le plan 1-2 (31% d'inertie expliquée) de la dynamique des sites étudiés sur la base de leur composition floristique. La surface de chaque triangle représente l'étendue de la dynamique floristique sur la période de 23 ans considérée pour site échantillonné..

1.1.2. Résilience des écotones forestiers le long d'un gradient d'altitude

Méthodologie

Nous avons conduit une première étude pour identifier la dynamique des niches climatiques de 5 espèces forestières du Vercors (*Picea abies*, *Acer pseudoplatanus*, *Fagus sylvatica*, *Pinus uncinata* et *Abies alba*) en comparant la distribution des adultes et de la régénération le long d'un gradient de température (Portier, 2009). Nous avons utilisé les données de 395 placettes d'observation installées en 2005 et 2006 dans la réserve biologique intégrale du Vercors selon le protocole de suivi des espaces naturels protégés. Pour chaque placette, les adultes sont mesurés dans un cercle de 10 m et la régénération est mesurée sur trois sous-placettes de rayon 1,5 m. Nous avons regroupé la régénération en deux stades : semis de moins de 50 cm de haut (stade 1) quantifiés par leur couvert dans les données, et semis compris entre 50cm de haut et 7,5 cm de diamètre (stades 2 et 3) quantifiés par le nombre de plantules dans les données. Nous avons utilisé les données climatiques du modèle climatique AURELHY de Météo-France interpolé à 100m. Nous avons modélisé la distribution de la régénération en utilisant une régression quantile. Nous avons estimé respectivement le rapport entre couvert de petits semis (stade 1) et surface terrière adulte et le rapport entre nombre de plantules (stades 2 et 3) et surface terrière des adultes comme des distributions normales des températures (GDD = somme des degrés jours).

Dans une deuxième étude, nous avons voulu tester la possibilité d'une remontée de l'écotone forêt-alpage sur les hauts plateaux du Vercors. Nous avons conduit une expérimentation sur l'effet de la sécheresse sur la résistance des pelouses à la colonisation du Pin à crochets (*Pinus uncinata*). Notre hypothèse était qu'une recrudescence des sécheresses pourrait favoriser de manière indirecte une installation de jeunes plantules de Pin dans les pelouses, en limitant le couvert et/ou l'abondance des espèces de pelouses qui sont habituellement en compétition avec le pin. Cette expérimentation a utilisé le dispositif présenté en détail pour les pelouses dans la tâche 121. Nous avons semé des graines de pin à crochet dans 32 placettes selon 4 modalités croisant un traitement sécheresse (asséchée / arrosée) et un traitement sur la communauté herbacée (communauté en place / élimination manuelle des herbacées) et 8 réplifications par modalité.

Principaux résultats

La distribution des adultes des 5 espèces le long du gradient de température est cohérente avec l'écologie de ces espèces (espèces subalpines comme le pin à crochet vers le pôle froid, espèces montagnardes comme l'érable vers le pôle chaud) (Figure III.1.3). Comme les arbres doivent d'abord passer par un stade régénération

avant d'atteindre un stade adulte, on s'attend à ce que la niche de régénération soit plus large que celle des adultes (mortalité des semis en marge de niche). Un décalage entre niche de régénération et niche des adultes peut indiquer un front de colonisation (présence de régénération sans adultes) ou de régression (présence d'adultes sans régénération) (Woodall *et al.*, 2009; Dullinger *et al.*, 2004; Beckage *et al.*, 2008). Dans nos données, les niches de régénération apparaissent plus étroites que celles des adultes, mais ceci peut être lié à une difficulté à détecter les semis quand ils sont rares, en marge de niche. Pour le pin à crochet, l'optimum de température pour la régénération apparaît plus chaud (altitude plus basse) que l'optimum pour le développement des adultes. Pour le sapin et l'érable, les optima de température pour la régénération apparaissent plus froids (altitudes plus élevée) que les optima pour le développement des adultes. Ces résultats semblent aller dans le sens de notre hypothèse d'une faible résilience de ces espèces en limite inférieure de leur aire, là où une augmentation des températures peut faire basculer cette variable à un niveau défavorable à ces espèces, mais où les sols sont peu contraignants. Pour autant, plus que le facteur sécheresse, le facteur thermique est peut être à invoquer ici. Pour l'épicéa, les optima de température sont proches pour la régénération et les adultes. Pour le hêtre s'est surtout une contraction de la niche de régénération par rapport à celle des adultes qui frappe. Pour le hêtre et l'épicéa, la contraction de la niche de régénération par rapport à celle des adultes indique une résilience faible à la fois en limite inférieure de l'aire (stress thermique) mais également en limite supérieure de l'aire où les sols sont le plus souvent superficiels avec affleurement de la dalle calcaire et où le facteur sécheresse peut être important. Le pin à crochet présente quand à lui une bonne résilience sur toute son aire, malgré son développement sur des sols superficiels.

Ces résultats permettent de formuler les hypothèses d'une remontée en altitude du sapin et de l'érable, d'une descente du pin à crochet et d'une contraction du hêtre. Les remontées pourraient être interprétées en lien avec le réchauffement climatique. La descente du pin à crochet, s'explique éventuellement par une diminution du pâturage et de la compétition par les espèces des étages inférieurs (sapin et épicéa), plus sensibles à une augmentation du déficit hydrique. Ces résultats sont cependant très préliminaires car les données utilisées proviennent de placettes petites qui peuvent conduire à des biais dans l'estimation de la densité des semis. Par ailleurs le relief du Vercors présente un changement de pente marqué entre les étages montagnard et subalpin qui peuvent perturber l'analyse. Enfin, pour chaque espèce, le nombre de placettes portant de la régénération est faible, ce qui a limité le développement de modèles plus fins. Seul un suivi dans le temps du devenir de la régénération pour chaque espèce permettrait d'affiner ces résultats. C'est l'objectif de la tâche 1.2.3.

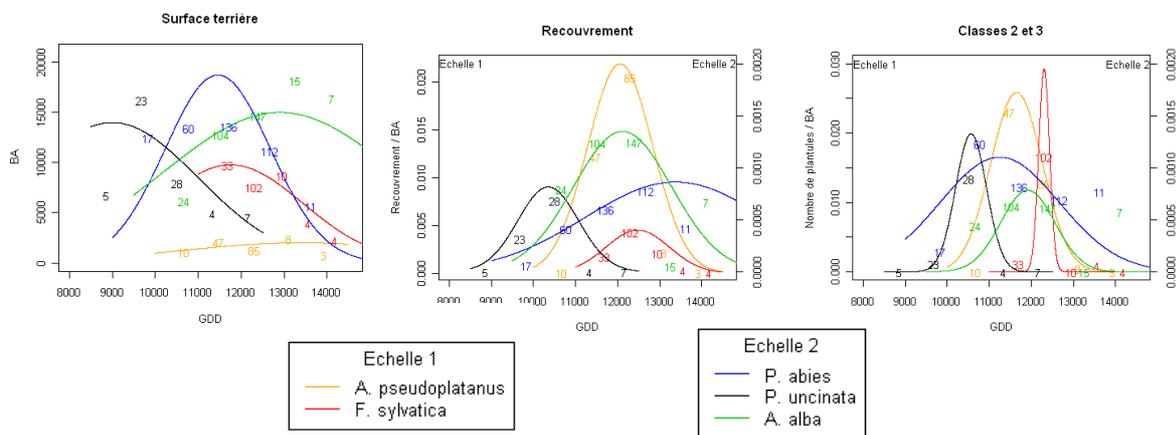


Figure III.1.3 - Distribution de la surface terrière adulte ; du recouvrement de la régénération de moins de 50 cm de haut, ramené à la surface terrière adulte ; et, du nombre de plantules de classe 2 et 3 (entre 50 cm de haut et 7.5 cm de diamètre) ramené à la surface terrière adulte ;, le long du gradient de température (GDD : Somme des degré-jours).

La deuxième étude n'a malheureusement pas pu fournir de résultat. Un taux de germination très faible (<0.1%) a empêché toute analyse de cette expérimentation malgré un test préliminaire en laboratoire où nous avons obtenu plus de 90% de germination. L'une des hypothèses expliquant cette déconvenue serait une prédation possible de nos graines par des insectes juste après la germination. Néanmoins, l'expérimentation réalisée sur les effets interactifs du climat et de la compétition (1.2.3) confirme que le pâturage a deux effets

contradictoires sur le recrutement: effet négatif par abrutissement des semis mais effet positif par réduction de la compétition herbacée. Le développement actuel du Pin à crochet à la base de son étage, dans un contexte de réduction du pâturage en alpages, laisse donc penser que l'effet négatif du pâturage sur la régénération l'emporte

1.2. Mécanismes écologiques de résilience / vulnérabilité

1.2.1. Dynamique des formations herbacées

Méthodologie

A l'aide de deux dispositifs expérimentaux complémentaires (Figure III.1.4) nous avons cherché à identifier les mécanismes de réponses des couverts prairiaux d'altitude à des sécheresses simulées dans différents contextes d'utilisation agricole : fauche (Lautaret) et pâturage (Hauts-Plateaux du Vercors). Les objectifs principaux étaient de déterminer la sensibilité des communautés végétales (composantes taxonomique et fonctionnelle), des processus écosystémiques (décomposition de la litière, minéralisation de l'azote, mycorhization...) et de la valeur agronomique de ces couverts.

La résistance et la résilience des couverts ont été évaluées en réponse à une modalité de sécheresse extrême correspondant à un épisode de sécheresse équivalent à celui de 2003. Le modèle de prévision climatique HadCM3 B1 prédit que la fréquence d'occurrence d'un tel événement sur la période 2050-2100 sera multipliée par 3 par rapport à la période 1950-2010.

Le site expérimental de la réserve des Hauts-Plateaux du Vercors (Alpage de la Grande Cabane) (44°52'02 N ; 5°28'36 E) est situé à 1520m d'altitude et présente des précipitations annuelles de 1380 mm et des températures moyennes journalières de 11.4°C en juillet et -2.2°C en janvier. La période d'enneigement s'étend en général de fin novembre à début avril. La prairie subalpine mésophile sur laquelle a été installée l'expérimentation est caractérisée par une forte richesse spécifique (50 à 70 espèces pour 100m²) les espèces dominantes étant *Carex sempervirens*, *Globularia spp*, *Festuca nigrescens* et *Festuca ovina*. L'alpage est pâturé de façon extensive par des troupeaux d'ovins depuis plusieurs centaines d'années sur la période de juin à octobre avec un taux de consommation sur la saison assez faible (20-40% de la production). Quatre serres de 32 m² chacune ont été positionnées sur des zones de végétation représentatives de la ressource pastorale dominante du site. Les précipitations ont été interceptées durant une période estivale de 8 semaines en 2010. Sous chacune de ces serres quatre traitements ont été définis (i) arrosé non coupé, (ii) arrosé coupé, (iii) asséché non coupé et (iv) asséché coupé. Pour éviter les biais dus à d'éventuelles conditions contrastées entre les serres et des zones hors-serres l'ensemble des traitements a été positionné sous les serres. La moitié des plots de chaque serre étant arrosée avec l'eau issue des précipitations du site suivant une pluviométrie équivalente à la moyenne observée sur une période de 50 ans (190 mm). L'autre moitié a été arrosée suivant une pluviométrie équivalente à celle mesurée lors de la sécheresse de 2003 (70 mm) sur la même période.

La seconde expérimentation a été réalisée dans une prairie subalpine à fétuque paniculée (*Festuca paniculata*) située à la Station Alpine Joseph Fourier, au col du Lautaret (6°24'01 E et 45°02'13 N), à une altitude de 2120m. La pluviométrie annuelle atteint 900 mm, avec une période d'enneigement s'étendant généralement d'octobre à mai (\pm 3 semaines). Bien que traditionnellement utilisées pour la récolte estivale de foin, entre mi-juillet et fin août, la fauche de ces prairies est de plus en plus souvent abandonnées. Leur communauté herbacée est caractérisée par la dominance de *Festuca paniculata* qui devient particulièrement abondante suite à l'arrêt de la fauche. La prairie étudiée n'a pas été fauchée depuis 1974 et est pâturée au mois d'août en un seul passage de faible intensité. Le couvert moyen de *Festuca paniculata* y atteignait 50 % lors de la mise en place du dispositif expérimental en 2008. Nous avons appliqué un dispositif en split-plot à deux facteurs (climat et régime de fauche), comprenant 8 parcelles de 6 x 3 m, elles-mêmes subdivisées en deux sous parcelles de 2 x 2 m. Le traitement climatique a été appliqué pendant la saison de végétation (juin – septembre) en 2009 et 2010. Le contrôle de la température moyenne et des précipitations a été réalisé à l'aide d'un système de stores placés au-dessus de chaque parcelle. Le réchauffement saisonnier moyen était contrôlé par l'ouverture nocturne des stores sur les parcelles placées en climat futur, le confinement du rayonnement infrarouge du sol et de la végétation se traduisant par une hausse de la température (environ +1°C). Le contrôle des précipitations était réalisé par

l'ouverture des stores au-dessus de chaque parcelle lors d'évènements de pluie et la redistribution de l'eau à l'aide d'un système de micro-asperseurs, selon les volumes calculés pour le traitement correspondant (moyennes sur 30 ans pour le « climat actuel » ou valeurs obtenues par le modèle HadCM3 B1 pour le « climat futur »). Durant l'été 2009 nous avons simulé une phase de canicule de 3 semaines pendant lesquelles les parcelles « climat futur » n'ont reçu aucune précipitation et une hausse de la température de la canopée d'environ 6°C a été obtenue à l'aide de lampes céramiques fonctionnant jour et nuit. Chaque été depuis 2008, les sous-parcelles concernées par le traitement de fauche ont été récoltées en août, conformément aux pratiques des agriculteurs.



Figure III.1.4 – Dispositifs de manipulation de la pluviométrie sur l'Alpage de la Grande Cabane (à gauche) et au Col du Lautaret (à droite)

Sur les deux dispositifs trois grands types de suivis ont été réalisés pour évaluer à la fois la résistance des couverts, *ie* la capacité du système à ne pas être affecté par la contrainte climatique ; et leur résilience, *ie* la capacité du système à retrouver son état initial un an après la contrainte climatique :

- structure des communautés végétales : diversité spécifique, composition taxonomique, dynamique d'espèces cibles/clés, mesures de traits fonctionnels de plantes, diversité fonctionnelle.
- processus écosystémiques en lien avec l'acquisition et la disponibilité des ressources pour le couvert : dynamique de l'azote et du carbone, décomposition de la litière, mycorhization d'espèces cibles, diversité des micro-organismes du sol.
- propriétés agronomiques des couverts : production, qualité du fourrage

Les analyses concernent la réponse de ces différents paramètres à la fois l'année n de la sécheresse provoquée et l'année $n+1$.

Principaux résultats:

Réponse de la structure des communautés

Composition et diversité spécifique : Sur le site du Vercors les effets les plus importants mesurés sont observés l'année même de la sécheresse révélant une résistance limitée de la communauté (Tableau III.1.1) qui se traduit par une modification de la composition floristique : régression des espèces de milieu frais au profit d'espèces caractéristiques de pelouses xériques, et diminution de la diversité spécifique. Sur le site du Lautaret la prairie à fétuque paniculée s'avère très résistante et ne montre que des réponses physiologiques transitoires. La résilience du couvert est très élevée sur les deux sites, la communauté retrouvée sa composition et sa diversité initiale dès l'année suivante. Sur le Vercors la réponse de la communauté est toutefois modulée par la fauche qui améliore la résistance en limitant l'effet de la sécheresse sur la diversité et la composition floristique. Ce phénomène fait écho à ce qui été observé en l'alpage, suggérant l'existence d'un effet compensatoire du pâturage des effets négatifs de la sécheresse. En revanche au Lautaret, la fauche a un effet dominant sur celui de la modification climatique (et non interactif), et réduit rapidement la dominance par *F. paniculata*, augmentant ainsi la diversité spécifique comme c'est la cas en situation agricole. La fauche favorise en particulier des espèces de meilleure valeur fourragère telles que la flouve (*Anthoxantum odoratum*), par ailleurs marginalement plus sensibles au climat que la fétuque.

Tableau III.1.1 : Présentation synthétique des différentes réponses à la sécheresse des paramètres mesurées au niveau de la structure des communautés (en vert), des processus écosystémiques (en marron) et des valeurs d'usage (en bleu) pour l'année n (résistance) et l'année n+1 (résilience). 0 = pas de réponse significative ; + = augmentation significative ; - = diminution significative. Sans précision supplémentaire, cela signifie que la tendance est générale indépendamment de la fauche.

Caractéristiques mesurées	Richesse spécifique	Diversité spécifique	Composition floristique	Trait moyen	Diversité fonctionnelle	
Vercors Année n (en fonction fauche)	0	- (sans fauche) 0 (fauche)	- (sans fauche) 0 (fauche)	SSF : - TMS : + TCF : + TNF : 0	SSF : 0 TMS : 0 TCF : 0 TNF : 0	
Vercors Année n+1 (en fonction fauche)	0	0	0	Non mesuré	Non mesuré	
Lautaret Années n et n+1	0	0 (mais + sous fauche)	0 (mais + sous fauche)	0	En cours	
Caractéristiques mesurées	Minéralisation de l'azote	Mycorhization	Diversité microbienne	Décomposition de la litière	Densité du couvert	Biomasse
Vercors Année n (en fonction fauche)	Non mesuré	Non mesuré	En cours	+ (sans fauche)	-	- (sans fauche) 0 (avec fauche)
Vercors Année n+1 (en fonction fauche)	0	En cours 4 espèces parmi les dominantes	En cours	Non mesuré	0	0
Lautaret Années n et n+1	0	Non mesuré	En cours	-	-	0 (- avec fauche)

Composition fonctionnelle : La résistance limitée de la composition floristique du Vercors s'accompagne de changements significatifs à l'échelle de la communauté de certains traits fonctionnels des plantes (Tableau III.1.1). Les traits moyens mesurés traduisent une augmentation significative de la teneur en carbone et en matière sèche des tissus foliaires ainsi qu'une diminution significative de la surface spécifique foliaire en réponse à la sécheresse. Les variations de composition floristique ne sont pas suffisantes pour expliquer cette réponse ; nous avons pu montrer qu'elle est en grande partie due à l'existence d'une forte variabilité intraspécifique : pour une même espèce les valeurs de traits varient fortement sous l'effet de la sécheresse. Ainsi, cette variabilité intraspécifique (ajustement physiologique) jouerait un rôle important dans les mécanismes de résistance et résilience des communautés.

Au Lautaret le traitement de modification climatique s'est traduit par une augmentation de la sénescence foliaire et une réduction de la croissance des espèces dominantes, mais ces réponses physiologiques ne se sont pas traduites au niveau des traits foliaires. Une analyse ciblée des composés carbonés non-structuraux a montré leur importance dans la résistance de *F. paniculata* à la sécheresse, et dans sa sensibilité à la fauche qui épuise ces réserves.

Réponses des processus écosystémiques : Pour les deux sites les modalités de sécheresse n'ont pas influencé significativement la minéralisation de l'azote. Par contre d'autres processus en lien avec le cycle des nutriments et leur disponibilité sont affectés par la sécheresse comme la décomposition de la litière. Pour le Vercors, une expérimentation en laboratoire sur la base de litière récoltées au sein des placettes soumises à la sécheresse ou non a permis de reconstituer des mélanges de litière sur la base des assemblages floristiques observés *in situ*. Les premiers résultats (analyses en cours) révèlent que les litières issues des placettes ayant subi la sécheresse se décomposent mieux. Ce résultat surprenant présente un fort intérêt puisqu'il suggère des mécanismes de compensation qui permettraient de limiter les effets négatifs de la sécheresse sur ces écosystèmes. Sur le site du Lautaret nous avons utilisé des litières standard pour tester s'il existait des modifications de l'environnement de décomposition selon le traitement climatique des parcelles. La modification climatique ralentit comme attendu la décomposition, et ce d'autant que les litières sont plus décomposables. Contrairement au Vercors, et même si

cet effet n'a pas pu être détecté pour la minéralisation de l'azote, la sécheresse induirait donc une boucle de rétroaction négative vers le recyclage des nutriments, conduisant à favoriser les espèces ayant une stratégie de conservation des nutriments. Cet effet est par contre cohérent avec une baisse des activités microbiennes observées sur ces parcelles dans le cadre du projet VALIDATE (F. Poly et al., en préparation). Des analyses sont encore en cours pour la description de la diversité microbienne sur le site du Vercors.

Réponse des caractéristiques agronomiques : Le principal effet négatif mesuré sur le Vercors correspond à une perte significative de densité du couvert l'année de la sécheresse qui se traduit notamment par une tendance à la diminution de la biomasse disponible. Toutefois ces effets sont totalement résilients l'année suivante démontrant encore une fois la forte capacité de tolérance de ces milieux. Les effets de la sécheresse sont donc fortement impactant sur ces couverts d'altitude l'année même de la sécheresse, du fait de la diminution de la ressource et de sa qualité (augmentation de la teneur en carbone), mais ces effets ne sont pas rémanents et s'estompent dès l'année suivante. En revanche, sur le site du Lautaret aucun impact sur la production de biomasse n'a été observé, même pendant les deux années où une sécheresse 'extrême' a été appliquée. Cette absence d'effet est imputée au fonctionnement physiologique de l'espèce dominante, *Festuca paniculata*, dont le démarrage de la croissance est précoce et particulièrement rapide (F. Baptist et al. soumis). Après 3 ans de traitement climatique (2011), nous observons néanmoins une baisse de la densité des couverts, suggérant la possibilité d'effets à long terme.

1.2.2. Quantification des phénomènes de mortalité en forêt

Méthodologie

Quantifier la mortalité des arbres adultes est difficile car ce processus est marqué par des événements de chablis exceptionnels. Nos travaux ont donc inclus une composante importante de développement méthodologique pour tenter de résoudre ce problème. Il est essentiel de disposer de suivis de long terme pour disposer de références stables pour chaque forêt. Par ailleurs, pour mettre en relation mortalité et événements climatiques nous avons besoin de séries temporelles avec des données annuelles. Nous avons rejeté l'utilisation de photographies aériennes successives qui n'offrait pas une précision suffisante et l'analyse des cernes de croissance à l'échelle individuelle qui aurait demandé un travail de terrain et de laboratoire très lourd pour dater des événements de mortalité. Nous avons opté pour une méthode innovante à l'échelle du peuplement : l'utilisation de données historiques de gestion à l'échelle de parcelles forestière. Les forêts publiques françaises disposent en effet d'inventaires réalisés lors des révisions d'aménagements (tous les 30 ans environ) et de sommiers sur lesquels sont retranscrit année par année les coupes et les produits accidentels (mortalité naturelle d'arbres commercialisables). Lors de travaux préliminaires réalisés sur deux forêts de Savoie (Queige et Lanslebourg) nous avons réussi à obtenir des sommiers continus sur une durée d'un siècle et plusieurs inventaires. L'acquisition de données sur le Vercors s'est malheureusement avérée moins facile, et nous avons mis plus d'un an pour identifier les forêts et les peuplements sur lesquels des données complètes étaient disponibles pour l'analyse de mortalité. Nous avons cependant pu reconstituer des séries temporelles de mortalité en volume depuis le début du siècle à Engins, Méaudre, Autrans et Lente (Bartalucci, 2011a).

Le stock sur pied n'étant connu que lors des inventaires avec une périodicité d'environ 30 ans, il est nécessaire d'interpoler les stocks entre deux inventaires. Nous avons développé une méthode basée sur l'utilisation d'un modèle Bayésien d'Espace d'Etats qui permet de reconstituer les variations de stock liés aux coupes et aux forts événements de mortalité. Ce modèle permet d'estimer une distribution de probabilité pour les stocks et les taux de mortalité pour chaque année de la série temporelle (Seignobosc et al., in prep.). Nous avons ensuite étudié la relation entre le taux de mortalité annuelle et deux variables climatiques : l'occurrence d'une tempête et l'intensité de la sécheresse durant l'année. L'occurrence de tempête a été évaluée à partir de chroniques météorologiques de 1900 à nos jours (essentiellement basée sur des coupures de presse) tandis que les sécheresses et les précipitations ont été reconstituées à partir des séries temporelles modélisées par le CRU (Climatic Research Institute, Norwich). Enfin nous avons démarré une comparaison entre forêts et entre parcelles pour détecter un éventuel effet de la station sur les mortalités en utilisant d'une part les cartes de station disponibles dans les aménagements forestiers et d'autre part une carte de réserve hydrique estimée à partir des données de profondeur du sol de l'Inventaire Forestier national.

Nous avons initialement l'intention d'analyser l'effet des sols sur la mortalité à l'échelle de l'arbre, ce qui n'a pas été possible suite au choix méthodologique portant sur l'analyse à l'échelle peuplement et ses conséquences en termes de temps de travail. Un travail sur l'écologie des sols a été engagé en parallèle sur lequel nous comptons nous appuyer pour faire le croisement sol x mortalité. Les sites échantillonnés pour les sols se sont malheureusement révélés trop décalés des peuplements sur lesquels nous avons un historique et nous avons donc dû renoncer à un croisement dans le délai imparti.

Principaux résultats

Les séries temporelles des stocks et des taux de mortalité ont pu être estimées pour chaque parcelle des forêts étudiées. Nous représentons ici les séries moyennes pour quatre forêts (Figure III.1.5).

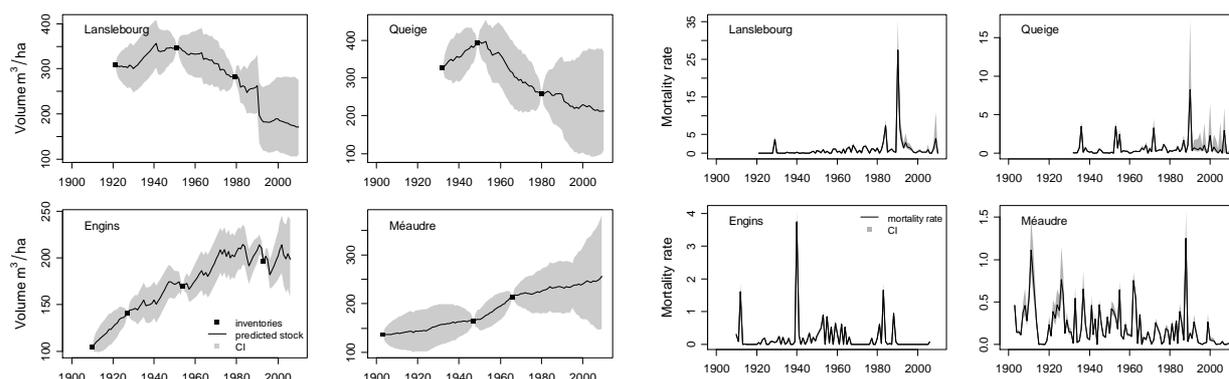


Figure III.1.5- Séries temporelles moyennes des volumes sur pied et des taux de mortalité estimés pour chaque année sur le 20^e siècle pour quatre forêts de Savoie (Lanslebourg et Queige) et du Vercors (Engins et Méaudre).

Les taux de mortalité apparaissent très variables dans le temps. Des années de mortalité exceptionnelle ressortent, mais aucune tendance de long terme ne se dégage clairement. De fortes différences de taux moyen de mortalité entre sites apparaissent avec une mortalité très faible dans le Vercors (0.19 à Engins et 0.22 à Méaudre) par rapport à la Savoie (0.67 à Queige et 1.13 à Lanslebourg). Notre méthode apparaît performante pour reconstituer les séries temporelles annuelle de stock et de mortalité sur une période d'un siècle mais souffre de deux limites importantes : d'une part les informations sont discontinues ou mal archivées dans de nombreuses forêts, d'autre part les informations ne sont généralement disponibles que pour les forêts les plus productives sur lesquelles l'effort de gestion est le plus important.

L'analyse des relations entre mortalité et variables climatiques fait ressortir un effet prépondérant des tempêtes dans toutes les forêts. Les sécheresses et les précipitations ont rarement un effet direct détectable sur la mortalité, ce qui contredit l'hypothèse d'une vulnérabilité importante des forêts des Alpes aux sécheresses. Dans certaines forêts un effet d'interaction entre les tempêtes d'une part et les sécheresses ou les précipitations d'autre part apparaît néanmoins : une sécheresse l'année précédente rendrait la forêt plus sensible aux tempêtes, de même que de fortes précipitations la même année que les tempêtes (Bartalucci, 2011b). Nous reprenons actuellement ce travail en intégrant en amont une standardisation des évolutions de stock qui semble conduire à des réponses plus homogènes des différentes parcelles aux variables climatiques (Csillery *et al.*, in prep.). Au niveau des facteurs stationnels, pour les deux forêts du Vercors, les mortalités sont significativement plus élevées en sapinière-pessière (moyenne : 0.3%, IC :0.26-0.35%) qu'en hêtraie-sapinière (moyenne : 0.19% - IC :0.17-0.22%). Les mortalités semblent légèrement plus élevées sur stations sèches (moyenne :0.26%) que sur station humide (moyenne :0.24%) mais ces différences n'apparaissent pas significatives.

Le modèle de mortalité du simulateur de dynamique forestière Samsara (Courbaud, 2004) a été modifié pour intégrer les résultats de l'analyse de mortalité. Samsara reposait sur une probabilité annuelle de mortalité de chaque arbre dépendant de son diamètre et de son accroissement l'année précédente (Vieilledent *et al.*, 2010) (paramètres fixés pour les Alpes du Nord). Les effets du diamètre et de l'accroissement sont cependant marqués surtout pour les arbres de petit diamètre (< 25 cm), pour lesquels nous avons gardé le modèle initiale, mais négligeables pour les plus gros arbres. Les analyses de mortalité effectuées dans SECALP ont permis d'obtenir des taux de mortalité moyens pour les arbres de dimension commercialisable (diamètre > 25 cm) dans chacune

des forêts étudiées. Nous avons donc modifié Samsara en le remplaçant modèle initial par les probabilités moyennes observées dans chacune des forêts pour ces arbres. Ce nouveau modèle est plus fiable et mieux adapté à chacune des forêts pour lesquelles nous avons des données.

1.2.3. Effets des déterminants climatiques sur le recrutement des espèces arborées

Les capacités de recrutement des espèces arborées sont déterminantes pour la vulnérabilité des forêts aux sécheresses récurrentes et plus généralement aux changements climatiques en cours. Ces capacités de recrutement vont en effet déterminer le renouvellement ou non des espèces présentes et l'installation de nouvelles espèces. Le stade jeune plantule est une phase particulièrement critique car les individus sont très sensibles à la fois aux contraintes abiotiques (sécheresse, gel, ...) mais aussi aux interactions biotiques (compétition du couvert des arbres adultes, de la végétation au sol, ...). Les contraintes climatiques peuvent affecter le recrutement directement par des événements type sécheresse ou gel mais elles peuvent aussi affecter le recrutement par le biais d'une modification des interactions avec les plantes du voisinage (plus forte compétition avec la végétation au sol). Nos connaissances de ces deux types d'effets des contraintes climatiques restent cependant extrêmement limitées.

Méthodologie

Nous avons mis en place une expérimentation pour analyser ces effets des contraintes climatiques sur les capacités de recrutement (germination, survie et croissance) des espèces arborées dominantes (*Fagus sylvatica*, *Quercus petraea*, *Picea abies*, *Abies alba*, *Pinus sylvestris*, *Pinus uncinata*, *Pinus cembra*, *Larix decidua*). Cette expérimentation utilise la variabilité spatio-temporelle du climat sur 10 sites répartis à des altitudes contrastées et le long d'un gradient de précipitation entre Alpes externes et Alpes internes (massifs du Vercors, Belledonne et Cerces). Dans chaque site, des graines des espèces ont été semées chaque année d'expérimentation (2008 à 2010) dans 6 couples de placettes de 1m² (strate herbacée enlevée ou non) établi le long d'un gradient d'ouverture de la canopée (mesuré par photos hémisphérique). Germination, survie et croissance ont été suivies 3 fois par saison de végétation. Nous avons par ailleurs suivi la variabilité spatio-temporelle de la température et de l'humidité relative du sol (sondes TDR et capteur de température ibutton®) sur chaque placette. En utilisant des régressions Bayésiennes hiérarchiques nous avons ensuite analysé comment les effets compétitifs de la végétation au sol et de la strate adulte varient avec le climat. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux interactions indirectes (i.e. la strate adulte affecte la survie des plantules via une modification de l'effet compétitif de la végétation au sol) car elles sont importantes pour la régénération forestière (Pages et al. 2003). Pour explorer les mécanismes sous jacents aux effets compétitifs. Nous avons ensuite analysé l'effet de la strate adulte et de la végétation au sol sur la disponibilité en eau du sol, la température minimum et le déficit de saturation de vapeur d'eau de l'air de la saison de végétation. Les données obtenues ont permis d'analyser la survie pour 5 espèces, des phénomènes de prédation ou une absence de germination ayant limité les données disponibles pour les trois autres espèces (pour les expérimentations futures nous envisageons de coupler l'utilisation de graines à de jeunes semis germé en serre pour pallier à ce problème).

Principaux résultats

Notre analyse indique que la végétation au sol et la strate adulte ont des effets compétitifs directs particulièrement forts dans les milieux plus chauds (et en moyenne plus secs) (Figure III.1.6). Cet effet compétitif diminue et parfois bascule même vers un effet de facilitation dans les milieux plus froids. A l'inverse les résultats montrent un effet de facilitation indirecte par la strate adulte (via une suppression de la compétition herbacée) principalement dans les milieux plus chauds où la compétition directe est dominante, ceci uniquement pour les espèces de basse altitude, le hêtre et le chêne. Les mesures de paramètres microclimatiques confirment ces interprétations en mettant en évidence l'effet de la canopée sur la lumière et la ressource en eau disponibles pour la végétation herbacée et les semis. L'effet de compétition de la végétation au sol se fait principalement par une compétition pour l'eau et pourrait donc être exacerbé par des sécheresses récurrentes.. Ce travail a donné lieu à un article soumis (Defossez *et al.*, submitted to the Journal of Ecology).

Le modèle de survie des plantules selon la température, l'ombrage par les arbres adultes, la présence de végétation herbacée, et les interactions arbres adultes x herbacées développé pour six espèces (chêne, hêtre, sapin, épicéa, mélèze, pin sylvestre, pin à crochet) nous permet de mieux comprendre les mécanismes en jeu. Il ne porte cependant que sur les deux premières années de vie des plantules et les difficultés d'expérimentation nous ont fait renoncer à un suivi de plus long terme. Pour Samsara, dans lequel nous avons besoin de simuler le développement de la régénération depuis la graine jusqu'au recrutement d'un arbre adulte, nous nous orienterons donc vers l'exploitation d'autres types de données (Inventaire Forestier National, données de placettes permanentes Cemagref et données ONF) qui ne comportent pas une information aussi précise sur la survie des plantules et la végétation herbacée mais ciblent le recrutement des arbres adultes.

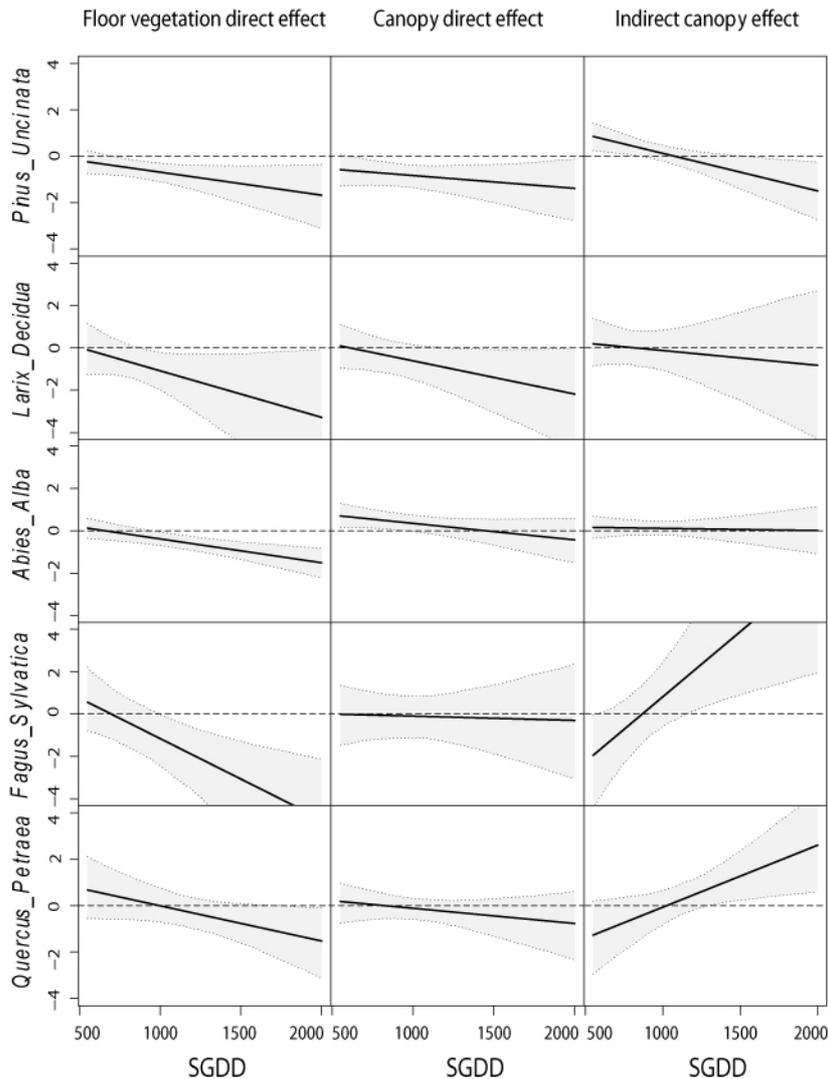


Figure III.1.6 - Variation de l'effet direct de la végétation au sol, de l'effet direct de la canopée des arbres adultes et de l'effet indirect canopée-végétation en fonction d'un gradient de température mesuré par la somme des degrés jours (SGDD). Une valeur positive indique un effet de facilitation et une valeur négative un effet compétitif. L'enveloppe grisée indique l'intervalle de confiance à 95% de l'effet.

Axe 2 : Réactions face aux sécheresses subies depuis les années 2000

L'objectif de l'axe 2 était de comprendre la façon dont les éleveurs et les acteurs de la filière forêt ont réagi face aux sécheresses des années 2000 et d'analyser si ces adaptations sont conjoncturelles et réversibles ou si elles s'inscrivent de façon plus stratégique.

2.1. Modes d'adaptation des éleveurs

2.1.1. Méthodologie

Les travaux de l'axe 2 ont été menés en parallèle sur les deux terrains (Adret de Villar d'Arène et Massif du Vercors), avec des bases méthodologiques similaires. Des enquêtes en exploitation et auprès de bergers en alpage ont été conduites pour reconstituer le fonctionnement du système fourrager, que nous définissons comme un système d'information et de décision visant à équilibrer tout au long de l'année les ressources et les besoins en fourrage pour atteindre un objectif de production et à assurer le renouvellement de la ressource sur un pas de temps pluriannuel (Duru *et al.*, 1988, Fleury *et al.*, 1996). Nous repérons les évolutions de ce fonctionnement et le considérons par rapport à l'ensemble des activités du ménage. Le choix a été fait de pratiquer des entretiens semi-directifs pour comprendre les raisons des pratiques et des changements de pratiques des éleveurs et des bergers et de nous intéresser à la cohérence des systèmes d'élevage. Cela nous a permis d'identifier et de caractériser les leviers activés face aux sécheresses, mais surtout de comprendre les choix des leviers (facteurs externes et internes aux exploitations), et de comparer les exploitations et les territoires. L'analyse du fonctionnement du système fourrager, en termes d'ateliers de production (Coléno et Duru, 2005) ou de saisons-pratiques (Bellon *et al.*, 1999), nous a permis de caractériser la sensibilité à la sécheresse des exploitations et de la mettre en regard des leviers activés (Nettier *et al.*, 2010).

Sur l'adret de Villar d'Arène, le nombre d'exploitations agricoles et la superficie du terrain sont limités, et les évolutions possibles des écosystèmes sont étudiées dans l'Axe 1 sur l'ensemble de la surface agricole utilisée. Nous avons donc fait le choix de réaliser un travail exhaustif en enquêtant toutes les exploitations utilisatrices des espaces agricoles sur ce terrain (neuf agriculteurs et un berger transhumant). Nous avons pu enregistrer les pratiques et leur évolution depuis 2003 par parcelle et à l'échelle de l'exploitation.

Sur le massif du Vercors, il était naturellement impossible d'avoir une telle approche exhaustive. Les enjeux en termes de biodiversité se situant principalement sur les écosystèmes des alpages (étudiés dans l'axe 1), nous avons choisi d'échantillonner une diversité d'alpages en termes de localisation au sein du massif, de conduite pastorale (type d'animaux et mode de gardiennage) et d'exploitations utilisatrices (exploitations du plateau, des contreforts du Vercors, ou grands transhumants). La gestion de l'alpage étant liée à celle des exploitations, nous nous sommes là aussi intéressés au fonctionnement des exploitations dans leur ensemble, avec un focus sur le fonctionnement et la place de l'alpage dans les systèmes fourragers. 18 exploitations ont été enquêtées, utilisatrices de 8 alpages différents. Au total, 27 exploitations ont été enquêtées dans le projet (Tableau III.2.1) Pour compenser le nombre restreint d'alpages, nous avons en outre mobilisé d'autres travaux pour l'analyse de la gestion des alpages (enquêtes réalisées par l'Association Drômoise d'Economie Montagnarde dans le cadre du réseau Pastor@lpes et enquêtes réalisées par le Cemagref dans le cadre du projet DIVA 2 MAE-R), pour arriver à un total de 35 enquêtes (éleveurs et bergers) concernant 17 alpages différents..

Tableau III.2.1 - Nombre d'éleveurs enquêtés et systèmes d'élevage

	Villar d'Arène	Vercors
Ovin allaitant	3	10
Bovin non laitier	3 (élevage de génisses laitières vendues prêtes à vêler)	3
Mixte ovin et bovin	2 (élevage de génisses)	3 (+ atelier caprin pour 1)
Bovin lait	1 (alpagiste prenant des animaux en pension en été)	2

2.1.2. Résultats

Réponses sur les exploitations : Les éleveurs et bergers ont tous une perception précise des effets de la sécheresse. Si la conséquence la plus visible est d'abord une baisse de la ressource fourragère l'année de la sécheresse, pour beaucoup d'éleveurs du Vercors l'abreuvement des animaux, sur les alpages en particulier, a été un problème majeur. Quelques-uns attribuent au moins en partie aux sécheresses des évolutions durables de la végétation, comme le développement de plantes indésirables (*Cirsium eriophorum* et *Veratrum album* en alpage, *Rhinanthus alectorolophus* dans les prairies), ou des dégradations du couvert végétal, observées en alpage sur des zones restreintes aux sols très superficiels. Les leviers activés par les éleveurs et les bergers ont donc visé à la fois à compenser cette baisse de la ressource fourragère et en eau, et à éviter ou limiter les dégradations des végétations en alpage (qui pourraient remettre en cause le renouvellement de la ressource).

Pour bien comprendre les réactions des éleveurs, il est apparu essentiel de repositionner les exploitations dans leur contexte de relief, d'altitude, et de climat. Celui-ci va conditionner à la fois les possibilités d'adaptation, mais aussi le fonctionnement des systèmes fourragers et leur sensibilité à la sécheresse. Sur les terrains étudiés, on distingue trois grands types de réactions face aux sécheresses (Tableau III.2.2).

Tableau III.2.2 - Principaux modes d'adaptation face aux sécheresses subies depuis 2003.

	Exploitations de haute montagne	Exploitations "fourragères"	Exploitations "pastorales"
Sites	Villar d'Arène	Plateau du Vercors, Plaine et coteaux de l'Isère	Sud Vercors, Diois Régions méditerranéennes (transhumants)
Systèmes	Ovins, bovins allaitants	Ovins, bovins allaitants Bovins lait	Ovins allaitants
Sensibilité aux sécheresses	Hiver long (plus de 6 mois) ⇒ forte sensibilité à la baisse de production de foin, car les surfaces de fauche mécanisables sont limitées + problème de campagnols terrestres dégradant les prairies de fauche. Pâturages surdimensionnés par rapport aux besoins du troupeau	Proportion de surfaces mécanisables plus élevée. Niveau d'autonomie fourragère variable. Peu de surfaces pastorales	Beaucoup de surfaces pastorales. Durée d'hivernage réduite Surfaces de fauche parfois limitées par rapport aux besoins
Adaptations	* Achats de foin quasi exclusivement (mais cela pénalise la trésorerie de l'exploitation). * Quelques délocalisations (limitées en superficie) : foin dans la vallée (allongement période de végétation, étalement du chantier de récolte). * "Ruptures" envisagées : arrêt de la fauche et transhumance hivernale en Provence, mais non souhaité car remise en cause de la conception du métier d'éleveur et préjudiciable pour le patrimoine (entretien des terrasses par la fauche) et la biodiversité.	* En fonction du niveau d'autonomie fourragère, ajustements en cours de campagne : pâturage de prés initialement destinés à la fauche, distribution de foin au pâturage. * Reports de stocks d'une année sur l'autre (pour les exploitations autonomes en "année normale"). * Achats de foin si nécessaire * Pas de changements structurels	* Les éleveurs ont tiré parti de la souplesse d'utilisation des parcours et ont mobilisé des surfaces pastorales "de régulation" (Guérin <i>et al.</i> , 2009) : repousses de céréales, pâturage de sous-bois, de glands, ... * Modifications structurelles : agrandissements, conventions de pâturage avec l'ONF, modification de l'assolement, ajustement des effectifs animaux, ... * Parfois recours à des achats de foin, mais besoins assez faibles

Dans tous les cas, la sécheresse n'est qu'un des facteurs qui influence les décisions des éleveurs. L'avenir des subventions, la volatilité des prix, mais aussi des projets personnels ou professionnels comptent autant, sinon plus, et les adaptations réalisées ou envisagées sur chaque exploitation sont aussi à mettre en regard des ces paramètres.

Réponses en alpage : Sur les alpages du Vercors, on peut distinguer plusieurs niveaux d'ajustements selon la sensibilité à la sécheresse (Tableau III.2.3). Les leviers concernent l'ajustement de la conduite en alpage et/ou la diminution de la charge pastorale. Sur quelques alpages, des améliorations pastorales ont pu être apportées en complément (agrandissement, équipements) mais plus selon les opportunités de financement qu'en fonction des besoins.

Les changements dans la conduite des alpages dépendent donc de la prudence dans la gestion de l'alpage avant la période de sécheresses (certains alpages disposaient de secteurs-tampons quand d'autres étaient quasiment raclés tous les ans), mais aussi des possibilités d'adaptation sur les exploitations. Le souci premier d'assurer le renouvellement de la ressource sur l'alpage est systématique chez les éleveurs et bergers enquêtés, qui diminuent la charge pastorale s'ils le jugent nécessaire, au détriment de leur exploitation. La bonne résilience de la végétation des alpages, constatée dans l'axe 1, conduit à s'interroger sur cette attitude qui pourrait paraître trop prudente. Mais nos expérimentations (cf. axe 1) présentent des limites : résultats sur du court terme, parcelles de petite dimension, simulation d'une sécheresse estivale uniquement et pas sur les sols les plus superficiels, l'effet d'une fauche sur la végétation est différent de l'impact du pâturage et du piétinement par les troupeaux...

En conclusion, que ce soit en alpage ou sur le parcellaire de l'exploitation, les surfaces de régulation, qui peuvent être de nature très diverses, s'avèrent déterminantes pour s'adapter durablement dans un contexte de sécheresses récurrentes. Les exploitations ne disposant pas de ces surfaces de régulation se trouvent contraintes de recourir à des achats massifs de fourrages, ce qui pose des questions quant à leur pérennité si ces sécheresses devaient persister ou se renouveler à un rythme plus fréquent.

Tableau III.2.3: Synthèse des adaptations pastorales face aux sécheresses de 2003

Nb alpages (Vercors)	Ressource pastorale les années sèches	1 ^{er} levier : Ajustement de la conduite du pâturage sur l'alpage	2 ^{ème} levier : transfert de charge pastorale de l'alpage vers les exploitations
4	Ressource insuffisante, dégradation dès la première année	Mobilisation du savoir-faire du berger pour optimiser l'utilisation de la ressource : exploration de secteurs difficiles, utilisation optimisée des écarts de phénologie des différentes végétations, à une échelle pluriannuelle préservation de secteurs tampons et amélioration de la ressource par le pâturage	Descente des animaux en urgence (en 2003), puis diminution structurelle de la charge pastorale dès 2004
3	Ressource suffisante, mais renouvellement compromis		À partir de 2004 ou 2005
4			Ajustement du système fourrager pour diminuer la charge pastorale sur l'alpage uniquement les années sèches.
5 (+ alpage de Villar d'Arène)	Ressource suffisante sans compromettre le renouvellement		Pas d'adaptation
1	Surplus	Pas d'adaptation	Non : augmentation du chargement de l'alpage les années sèches pour préserver les prairies à proximité des sièges d'exploitation

2.2. Modes d'adaptation des acteurs forestiers

2.2.1. Méthodologie

Les stratégies d'adaptation mises en œuvre par les acteurs forestiers lors d'épisodes de sécheresse passées ont été analysées à partir d'une enquête réalisée auprès des acteurs forestiers du Vercors (Rodron *et al.*, 2010). Vingt-cinq entretiens semi-directifs de 1h30 ont été conduits dans la première étude auprès d'acteurs variés de la forêt dans le Vercors : 3 personnels du Parc Naturel Régional (PNR), 8 personnels Office National des Forêts (ONF), 3 personnels du Centre Régional de la Propriété Forestière (CRPF), 6 propriétaires privés, 2 élus, 2 personnels de la Coopérative Forestière COFOR, 1 expert forestier, 1 entrepreneur de travaux forestiers. Trois questions principales ont été posées : quelles adaptations à la sécheresse les acteurs ont-ils pratiquées dans le passé (en particulier en 2003) ? Quels indices de changement climatique ont-ils repérés sur le Vercors ? Quelles stratégies d'anticipation sont-ils prêts à mettre en place ? Un ensemble de documents de gestion forestière ont également été consultés, en particulier Directives Régionales d'Aménagement Forestier, Aménagements Forestiers locaux et Chartes Forestières.

2.2.2. Principaux résultats

Les acteurs forestiers du Vercors ont observé des effets immédiats importants en 2003 : des roussissements de feuilles ont été observés sur des versants entiers dès le mois d'Aout et deux incendies de forêts se sont déclenchés : l'un à Pont-en-Royans et l'autre sur le mont Néron (à proximité immédiate du Vercors). Les mortalités liées aux dépérissements ont cependant été limitées, même si des attaques de ravageurs localisées (sur épicéa, sapin et hêtre) ont eu lieu dans les années qui ont suivi. Par ailleurs, les beaux peuplements sur sols profonds ont été relativement épargnés et les dépérissements ont concerné essentiellement des versants secs peu productifs. La forêt du Vercors a démontré une bonne résilience dans les années qui ont suivi. Les événements climatiques de 2003 ont donc eu un impact limité sur la filière bois du Vercors, même s'ils ont éveillé une certaine vigilance de la part des acteurs forestiers. Ceux-ci s'accordent à dire qu'une recrudescence des sécheresses dans le futur pourrait avoir des conséquences très négatives sur la forêt, en particulier si les arbres n'avaient pas le temps de reconstituer leurs réserves entre deux sécheresses. Néanmoins, ils considèrent pour l'instant que 2003 est un événement isolé. Les acteurs forestiers du Vercors sont préoccupés par le réchauffement climatique observé à l'échelle de la planète, mais n'en voient pas beaucoup de signes concrets sur le Vercors, à l'échelle de leur propriété ou de leur unité de gestion. En termes d'adaptation, les acteurs de la forêt publique ont renforcé leur surveillance sanitaire depuis 2003. Les principes de la gestion conduite depuis plusieurs décennies visent à favoriser la multifonctionnalité des forêts (production, protection contre les risques naturels, préservation de la biodiversité et des paysages) et vont dans le sens d'une bonne résilience des peuplements aux perturbations. Ces principes semblent plutôt renforcés par l'épisode 2003 et la perspective du réchauffement climatique. L'adéquation des essences avec la station, préconisée pour des raisons écologiques et économiques, est un objectif qui se renforce. Les Directives Régionales d'Aménagement (Office National des Forêts - Direction Territoriale Rhône-Alpes, 2006) préconisent ainsi une réduction du sapin et de l'épicéa aux basses altitudes où ces essences ont été introduites artificiellement, en cohérence avec la perspective d'une remontée de ces essences en altitude liée au changement climatique. Le mélange d'essences est favorisé pour la biodiversité mais il va également dans le sens d'une logique de répartition des risques sur des essences de sensibilités différentes aux dépérissements. Une forte augmentation de la récolte est recherchée actuellement dans un contexte de tension économique pour la forêt publique mais peut être également justifiée comme permettant de réduire la durée d'exposition des peuplements aux aléas climatiques. Les forestiers privés ont, quant à eux, été très passifs après les événements de 2003 et ont apparemment subi des dégâts limités. Ils affirment ne pas avoir la capacité d'investissement nécessaire à une gestion normale de leur forêt et ne sont donc pas prêts à réaliser des investissements supplémentaires à des fins d'adaptation au changement climatique.

On remarque cependant un infléchissement du discours des acteurs entre 2009 et 2011 avec une préoccupation grandissante par rapport au changement climatique. Ceci est lié au fait que depuis 2003, de nombreuses périodes sèches ont eu lieu en début d'été sur le Vercors, heureusement compensées par des pluies de fin d'été. Certains évoquent désormais de nouveaux scénarios assez alarmistes, tels qu'un dépérissement des pins cembro et à crochets sur les hauts plateaux du Vercors, entraînant une mise à nu des sols et une perte rapide de productivité.

Axe 3 : scénarios et adaptations envisagées ; perspectives pour l'accompagnement des adaptations

3.1. Méthodologie

Pour l'élaboration des scénarios selon une démarche prospective (de Jouvenel, 1999), nous avons proposé initialement de coupler évolutions climatiques (récurrence d'épisodes de sécheresses) et évolutions du contexte socio-économique. L'intérêt de cette approche nous a bien été confirmé par les enquêtes réalisées dans l'Axe 2 : en effet, les adaptations des acteurs face aux sécheresses subies depuis 2003 et leurs projets ne se référaient pas seulement aux aspects climatiques mais intégraient aussi l'évolution du contexte socio-économique (notamment pour les éleveurs la réforme de la PAC en 2013). En revanche, l'élaboration envisagée d'un scénario au fil de l'eau sans changement du contexte socio-économique est apparue peu pertinente. Nous avons donc opté pour 4 scénarios (3 prévus initialement) couplant deux modalités climatiques et deux modalités socio-économiques. En outre, les enquêtes de l'Axe 2 nous ont aidés à définir les forces motrices dans les scénarios.

La difficulté pour l'élaboration des scénarios reposait essentiellement sur le choix de modalités contrastées mais plausibles et sur la façon de les décliner localement pour qu'elles aient du sens pour les acteurs en intégrant les spécificités des terrains d'étude. Nous avons donc cherché à co-construire ces scénarios avec un groupe d'experts locaux (Tableau III.3.1). En complément des avis de ces experts, nous nous sommes appuyés sur d'autres sources : (i) pour l'élaboration des modalités climatiques, nous avons sollicité des hypothèses sur les conséquences sur les milieux auprès des collègues impliqués dans l'axe 1 ; (ii) pour les modalités socio-économiques, nous avons consulté des études prospectives nationales et internationales et nous avons choisi deux modalités : l'une basée sur la poursuite de la mondialisation dans une économie libérale et d'un processus de concentration urbaine (cf. scénario *Global orchestration* du *Millenium Ecosystem Assessment*, *G0* d'Agrimonde et *Scénario 1* des Nouvelles Ruralités) et la seconde sur l'émergence du "fait territorial" (cf. *Adapting mosaic* du *MEA* et le *Scénario 4* des Nouvelles ruralités). Ces éléments ont ensuite été repris et affinés par un groupe de chercheurs du projet pour être compilés sous forme de récits d'une page maximum (*storylines*) avant d'être soumis au groupe d'experts initial et élargi à d'autres experts pour validation.

Tableau III.3.1. Acteurs et experts impliqués dans les travaux des Axes 2 et 3

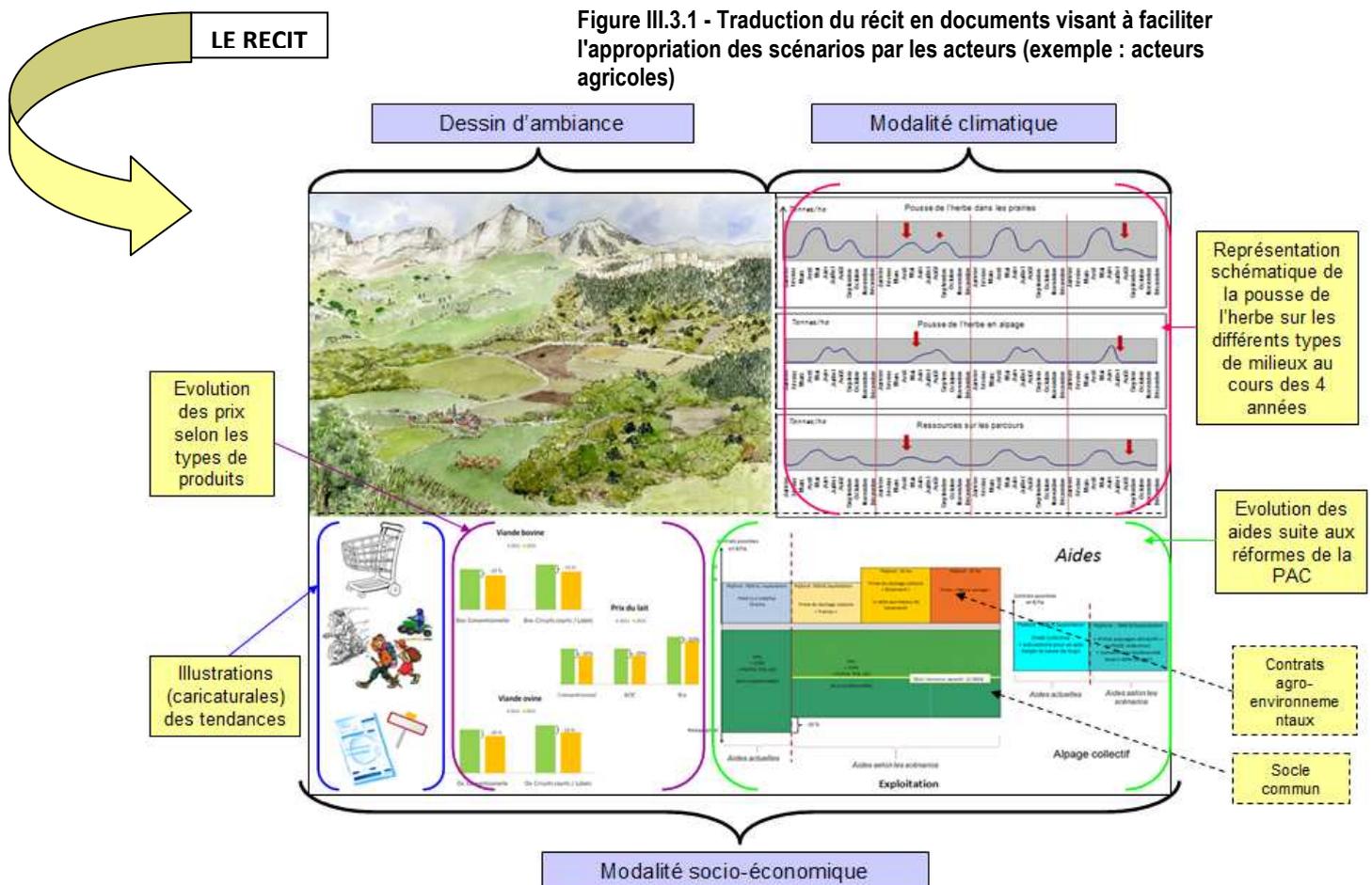
	Adaptation aux sécheresses récentes	Construction des scénarios (experts)	Adaptation des acteurs aux scénarios	Débriefing scénarios et actions publiques (experts)
Agriculture	Vercors : 35 éleveurs et bergers Villar d'Arène : 10 éleveurs et bergers	1 chambre agriculture 2 services pastoraux 1 PNRV	Vercors : 8 éleveurs Villar : 10 éleveurs et bergers	2 chambres agriculture 3 services pastoraux 1 PNRV
Espaces naturels	Vercors : 17 alpages Villar d'Arène : 2 alpages	1 RNHPV 1 PNE	Vercors : 8 alpages Villar d'Arène : 2 alpages	1 PNE 1 RNHPV
Forêt publique	8 ONF 4 élus de communes forestières	2 ONF	3 ONF 1 maire commune forestière	2 ONF
Forêt privée	2 CRPF 1 CRPF+PNRV 6 propriétaires privés 1 expert forestier 1 entreprise de travaux forestiers	2 CRPF	1 CRPF 1 propriétaire privé 1 exploitant forestier 1 scieur	1 CRPF
Autres	2 PNRV	6 chercheurs Cemagref (2 écologues, 1 forestier, 3 agronomes) 3 chercheurs LECA (écologues)		1 CG 5 chercheurs Cemagref (1 écologue, 1 forestier, 3 agronomes) 3 chercheurs LECA (écologues)

Afin de favoriser la compréhension et l'appropriation des divers éléments pris en compte dans les scénarios, nous avons entrepris un travail important de traduction des récits sous forme de documents illustratifs (dessin d'ambiance, graphiques) (Figure III.3.1). Ils ont été utilisés durant les enquêtes sur le site du Vercors et appréciés par les acteurs enquêtés.

Nous avons envisagé d'aller enquêter auprès de tous les acteurs rencontrés dans le cadre de l'axe 2. Cette démarche a été appliquée sur Villar d'Arène (petit territoire où les alpages, prés de fauche et pâtures d'intersaison sont utilisés par une dizaine d'éleveurs et gérés collectivement par une association foncière pastorale et des groupements pastoraux) de façon à tester, via un jeu de rôles (Martin *et al.* in press ; Castella *et al.*, 2005) regroupant l'ensemble des éleveurs, l'influence d'une dynamique collective intégrant les interactions entre acteurs et leurs influences mutuelles sur les milieux. Dans ce cadre, les éleveurs étaient mis en situation de sécheresses à l'aide d'un plateau de jeu sur lequel, année par année, ils devaient arriver à placer leur animaux et constituer les stocks de foin nécessaires durant l'hiver selon les rendements fourragers réalisés de chaque type de prairies. En revanche, sur le Vercors, cette ambition n'était pas réaliste, les enquêtés étant dispersés sur l'ensemble du territoire du Parc et même au-delà (cas des transhumants et de certains acteurs de la filière forêt). Nous avons donc choisi d'enquêter auprès des acteurs qui avaient été les plus réceptifs lors des enquêtes effectuées dans le cadre de l'Axe 2 tout en veillant à conserver une diversité de situations (soit 8 enquêtes auprès d'éleveurs et 8 auprès d'acteurs de la filière forestière).

Sur les deux sites la participation des experts a été renforcée, non seulement dans l'élaboration des scénarios mais aussi par leurs implications dans la validation et l'évaluation de la portée des enseignements issus des enquêtes. Nous avons ensuite élargi le cercle des experts pour réfléchir sur les perspectives et les modalités d'accompagnement par rapport aux adaptations envisagées face aux différents scénarios (Tableau III.3.1).

Le choix de l'horizon temporel était une autre difficulté : fixé à 25-30 ans en référence aux cycles des aménagements forestiers et aux impacts climatiques, il a fallu le décliner sur les 4-5 prochaines années et intégrer la réforme de la PAC pour permettre aux acteurs agricoles de se sentir impliqués et d'avoir prise sur ces scénarios.



3.2. Résultats

3.2.1. Les scénarios et leur appropriation par les acteurs

Les deux modalités climatiques et les deux modalités socio-économiques ont été combinées pour constituer les quatre scénarios (Tableau III.3.2). La modalité climatique « *intermittente* » prend en compte une recrudescence des sécheresses de printemps et d'été, sous forme d'alternance avec des années plus humides, comme cela a été vécu dans certains secteurs des Alpes du Sud, tandis que la modalité climatique « *choc* » se base sur quatre années de sécheresses de printemps successives. Dans la modalité socio-économique « *globale* », les territoires et leurs acteurs sont confrontés à la poursuite de la mondialisation et de la concentration urbaine et l'agriculture n'est soutenue que pour son rôle de production de services environnementaux à l'échelle mondiale (exemple : stockage de carbone). Dans la modalité socio-économique « *territoriale* », les citoyens montrent un intérêt grandissant pour leur territoire et ses activités et l'agriculture de montagne est aidée pour qu'elle puisse conserver un rôle de production alimentaire de qualité tout en respectant des exigences environnementales fortes. On trouvera en Annexe les différents récits élaborés pour chacun des scénarios.

	Modalité climatique		Modalité socio-économique
Scénario n°1	INTERMITTENTE	+	GLOBALE
	⇒ Une alternance d'années sèches et d'années plus humides, dans un environnement socio-économique de plus en plus marqué par la concentration urbaine et la libéralisation des marchés.		
Scénario n°2	INTERMITTENTE	+	TERRITORIALE
	⇒ Une alternance d'années sèches et d'années plus humides dans un environnement où émerge le fait territorial, facteur de régulation d'une société libérale et urbaine.		
Scénario n°3	CHOC	+	GLOBALE
	⇒ Une succession de sécheresses de printemps dans un environnement socio-économique de plus en plus marqué par la concentration urbaine et la libéralisation des marchés.		
Scénario n°4	CHOC	+	TERRITORIALE
	⇒ Une succession de sécheresses de printemps dans un environnement où émerge le fait territorial, facteur de régulation d'une société libérale et urbaine.		

Tableau III.3.2 - Les quatre scénarios prospectifs élaborés

Durant l'explication des scénarios, quelques acteurs (éleveurs, forestiers) n'étaient pas forcément d'accord avec certaines assertions, en particulier vis-à-vis de certaines mesures de la modalité globale (un enquêté : "il me plaît moins que l'autre, ça c'est sûr. Mais c'est vrai qu'on n'est pas à l'abri de ce scénario-là non plus"). Le nombre important de paramètres, relevant de différents registres, susceptibles d'entrer en considération a pu perturber certains acteurs, mais, comme quelques-uns l'ont souligné, c'est bien ainsi qu'ils doivent raisonner.

3.2.2. Adaptations envisagées par les éleveurs

Pour les éleveurs du Vercors, la modalité climatique intermittente semble s'apparenter à ce qu'ils ont connu ces dernières années et à laquelle ils ont dû s'adapter. Ils pensent donc qu'ils arriveraient à rebondir et que leur système fourrager est adapté pour y faire face. Ils comptent jouer, comme ils en ont l'habitude (cf. Axe 2), sur la flexibilité de leur système fourrager : ajuster les dates de mise à l'herbe ou de rentrée en bâtiment en fin d'automne, les dates de montée et de descente d'alpage en fonction de la ressource pastorale disponible, utiliser des surfaces tampons (surfaces hors SAU, repousses non pâturées en années normales), arbitrer l'usage de certaines prairies entre fauche et pâture en cours de campagne et jouer si possible sur les reports de stocks d'une année sur l'autre en profitant des années "normales" ou acheter du foin le cas échéant. Ainsi dans un contexte des sécheresses intermittentes, les changements se font uniquement en réponse au contexte socio-

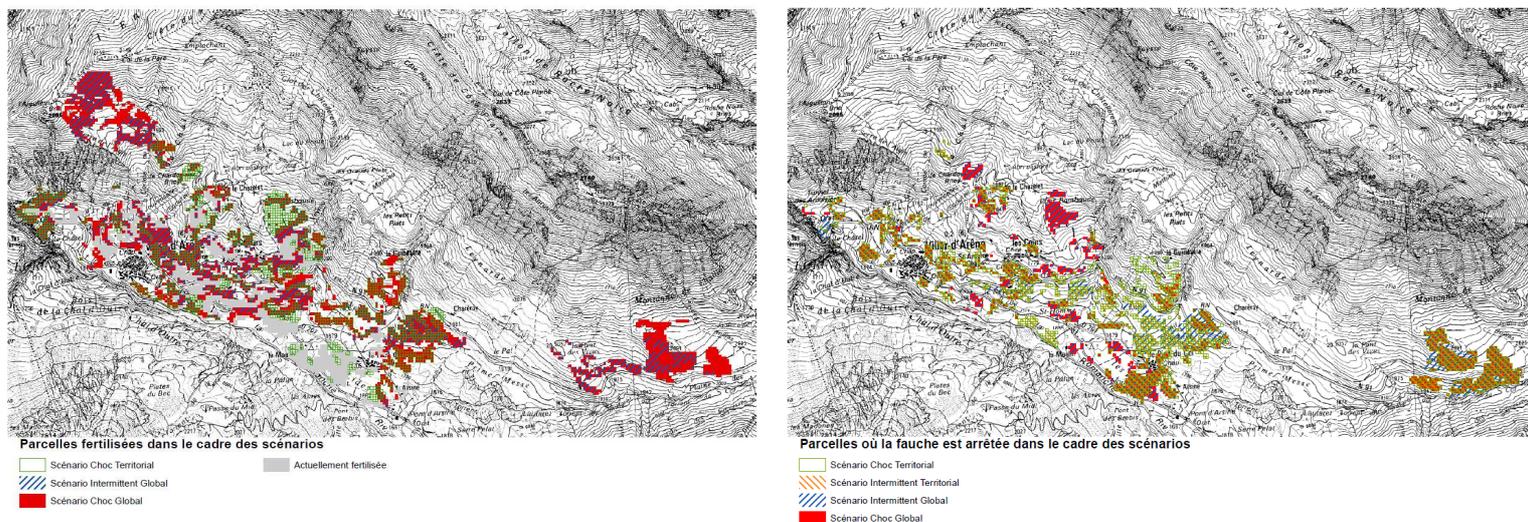
économique. En cas de modalité climatique choc, les ressources fourragères n'étant plus suffisantes, ils réduiraient leurs troupeaux en fonction de la ressource et chercheraient à compenser les pertes de revenu soit par un travail à l'extérieur en cas de modalité socio-économique globale, soit par une meilleure valorisation des animaux restants (transformations fermières, circuits courts) voire, pour certains, par des activités touristiques complémentaires (accueil à la ferme) dans la modalité territoriale.

Dans le raisonnement des éleveurs, les évolutions du contexte socio-économique sont donc aussi déterminantes, en raison notamment du poids des aides publiques dans leur revenu et de leur souci de reconnaissance de leur travail par la société, dont les mesures agri-environnementales (MAE) sont une des traductions concrètes. Ainsi les dispositions des MAE prévues dans la modalité "territoriale" sont nettement préférées, même si elles impliquent des engagements sur des résultats, par rapport à celles envisagées dans la modalité "globale" (reposant sur des obligations de moyens) qui leur paraissent même parfois aller à l'encontre de leur métier d'éleveur (exemple de la prime au boisement des terres agricoles qui est décriée).

Si, pour chaque scénario, de grandes tendances se dégagent, tous les éleveurs ne raisonnent cependant pas de la même façon leurs voies d'adaptation. Nous avons ainsi mis en évidence trois grandes stratégies d'adaptation, qui se recoupent avec les logiques mises en avant par Lémery *et al.* (2008) chez des éleveurs de bovins allaitants de Bourgogne en situation d'incertitude (à l'époque de la crise de la "vache folle"). Ces trois stratégies peuvent être intitulées ainsi : "je diversifie pour maintenir le revenu en diminuant l'impact économique des sécheresses", "je m'adapte mais je reste avant tout éleveur", "je ne changerai pas de système".

Malgré une démarche différente (jeu de rôles mené pas à pas sans connaître à l'avance les évolutions climatiques), les adaptations des éleveurs de Villar d'Arène s'inscrivent dans les logiques ci-dessus. La modalité intermittente est considérée comme le quotidien auquel doivent faire face les éleveurs depuis plusieurs années et ils font appel aux mêmes leviers qu'ils ont mobilisés face aux sécheresses passées (cf. chapitre 2). Peu de ruptures sont envisagées : tout comme certains éleveurs du Vercors n'envisagent pas de ne plus avoir d'animaux, la fauche semble être un élément essentiel dans la conception du métier pour une majorité d'agriculteurs de Villar d'Arène et l'arrêt de la fauche n'est pas souhaité. Quelques spécificités ressortent : la possibilité de développer le pâturage sous mélézin et de gérer autrement l'alpage où se côtoient un éleveur-berger transhumant et les éleveurs locaux en réduisant l'effectif transhumant. Le travail conduit sur Villar d'Arène a permis une analyse spatiale plus fine des conséquences sur les modes d'utilisation des prairies et alpages. En combinant les critères de décisions des acteurs (pente, accès, distance) et les actions réalisées sur le plateau de jeu dans le cadre de chacun des scénarios, les prés fertilisés ou ceux dont la fauche est arrêtée peuvent être modélisés spatialement. Les cartes de la Figure III.3.2 montrent que les surfaces concernées par les adaptations et leur localisation peuvent varier de manière conséquente entre scénarios. Néanmoins certaines zones de changement sont communes à l'ensemble des scénarios.

Figure III.3.2 – Cartographie des surfaces nouvellement concernées par la fertilisation (à gauche), ou l'arrêt de fauche (à droite) selon les scénarios



3.2.3. Adaptations envisagées par les acteurs de la filière forestière

En cas de modalité climatique intermittente, les principales mesures avancées par les acteurs forestiers sont une surveillance sanitaire accrue permettant d'exploiter très rapidement les dépérissants pour éviter la propagation de ravageurs secondaires ainsi que l'accompagnement des dynamiques naturelles. En cas de dépérissement localisé de certaines essences présentes (épicéa, sapin), les acteurs envisagent de favoriser des essences mieux adaptées, mais en s'appuyant autant que possible sur la colonisation naturelle et non sur des plantations. Cette stratégie risque d'entraîner une diminution des résineux de montagne au profit des feuillus mais les acteurs semblent prêts à accepter cette évolution comme inéluctable, même si elle est défavorable sur le plan économique. Les Directives Régionales d'Aménagement Forestier préconisent essentiellement une réduction de la place de l'épicéa et du sapin à basse altitude où ils ont été étendus souvent de manière artificielle, le développement des peuplements mélangés dans une logique de répartition des risques et le développement d'un réseau de desserte adapté à la récolte et à la défense contre les incendies.

En cas de modalité climatique « choc », la plupart des enquêtés s'est montrée très préoccupée par la remise en question du rôle de protection de la forêt contre les risques naturels (chutes de rochers). Selon eux, en cas de succession de plusieurs sécheresses, il faudrait en premier lieu redéployer tous les efforts sur le maintien de cette fonction de protection. L'intervention pourrait être envisagée par des plantations, mais c'est surtout le génie civil qui est mis en avant pour répondre à l'urgence. Il faudrait également gérer l'afflux brutal de bois sur le marché (suivi d'une pénurie durant les années suivantes) dans un cadre qui dépasse le territoire du Vercors. Les acteurs soulignent la difficulté de choisir des essences de substitution appropriées au cas où les essences locales ne réussissent pas à faire face au changement climatique : le douglas n'est pas adapté aux terrains calcaires du Vercors, le mélèze souffre des brouillards fréquents, le cèdre et les sapins méditerranéens sont trop sensibles aux gelées pour être plantés actuellement dans le Vercors. Aucune de ces essences de reboisement ne paraît une solution à court terme. La durée de vie des arbres pose une réelle difficulté pour une adaptation volontariste car un changement d'essence nécessiterait de trouver une espèce dont les jeunes plants seraient adaptés au climat d'aujourd'hui mais les adultes au climat de demain.

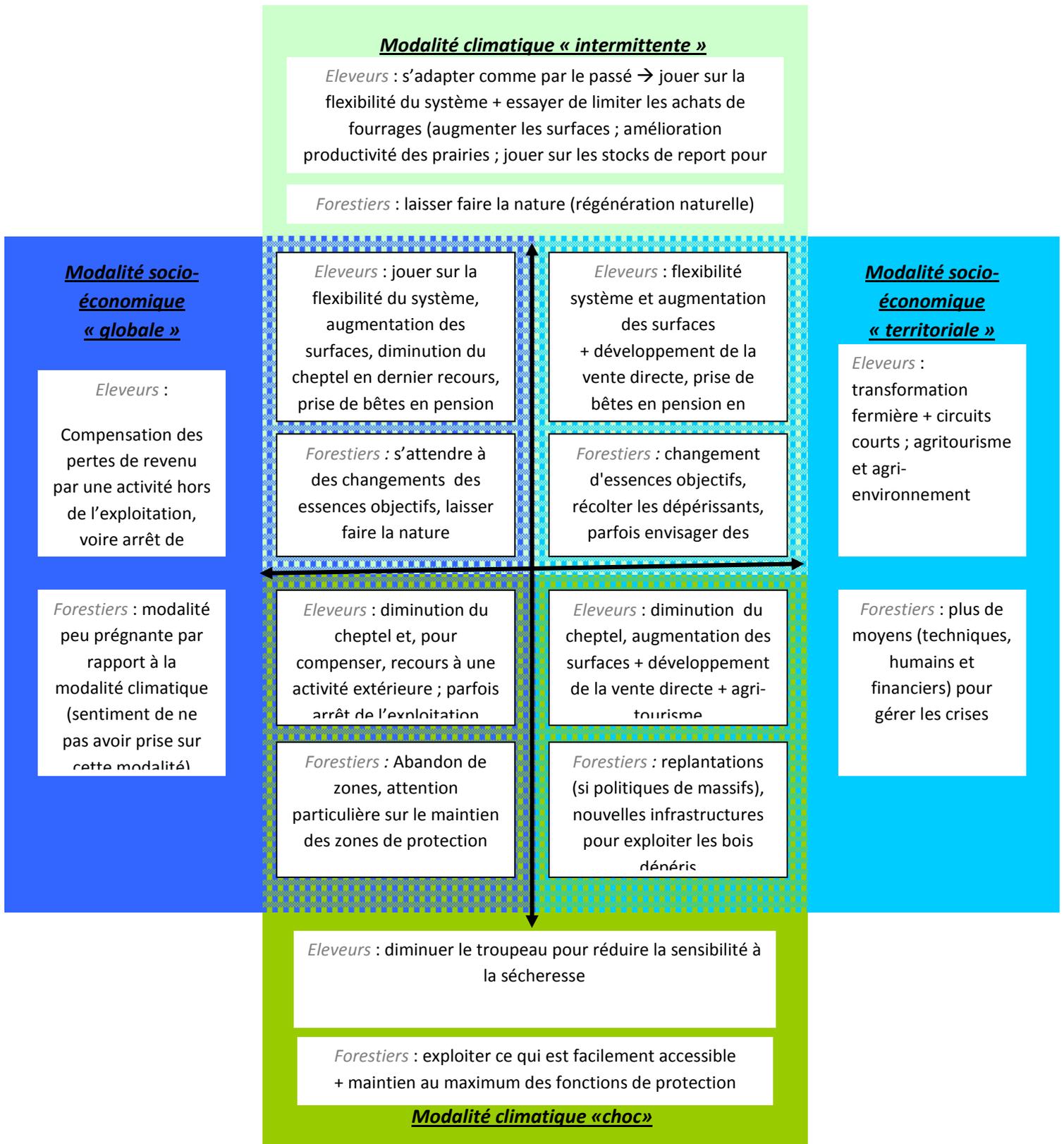
Les acteurs forestiers semblent moins sensibles à l'évolution du contexte socio-économique qu'aux modalités climatiques, soulignant qu'aucune étude ne peut prédire la situation économique de la filière dans 20 ou 30 ans. Ils craignent cependant que le Vercors ne soit délaissé en cas de modalité « globale » à cause de l'enclavement de la zone. Une scierie s'est par exemple récemment délocalisée en vallée pour avoir accès à des bois provenant d'autres massifs. Au travers d'un projet de création d'un label « bois des Alpes » et du développement de chaufferies bois collectives sur le Vercors, les acteurs forestiers essaient d'initier une dynamique « territoriale » qui leur semble plus favorable au maintien de la multifonctionnalité des forêts et des missions traditionnelles du forestier.

Au-delà de ces tendances générales, les acteurs forestiers n'ont pas tous les mêmes stratégies. Ainsi les propriétaires privés n'auront pas les moyens d'investir dans leurs forêts sans aides publiques, quels que soient les scénarios climatiques. La forêt privée est en effet très morcelée dans le Vercors (4 ha en moyenne), la principale logique des propriétaires est de la considérer comme une caisse d'épargne. Pour les communes forestières, les investissements seront très dépendants des capacités d'investissement des communes et elles seront sans doute sensibles au respect de la multifonctionnalité de leurs forêts, tandis que l'ONF poursuivra vraisemblablement sa politique de récolte des bois dans les forêts soumises, facilement accessibles.

3.3. Synthèse et perspectives

La figure III.3.3 résume les stratégies envisagées par les acteurs en fonction des différents scénarios. De façon schématique, il apparaît une scission assez tranchée entre les acteurs : d'une part, ceux de la filière forestière, qui se projettent dans une échéance temporelle lointaine et n'ont, somme toute, subi que peu de dégâts même lors de l'épisode de sécheresse+canicule de 2003, adoptent une attitude de prudence et sont très attentistes, se contentant le cas échéant de récolter les bois dépérissants facilement accessibles ; d'autre part, les éleveurs, qui ont subi déjà plusieurs sécheresses puis 2003 et doivent réagir à court terme (en cours de campagne ou à l'échelle de l'année). Bon nombre des éleveurs enquêtés sont prêts à s'engager plus avant dans la valorisation de leurs élevages (découpe, parfois fabrication fromagère fermière et circuits courts) : cette tendance, observée sur un petit échantillon, a surpris les experts agricoles locaux qui se sont cependant rendus compte que de tels changements étaient, de fait, déjà en émergence au plan local.

Figure III.3.3 - Résumé des voies d'adaptation envisagées par les acteurs en fonction des différents scénarios



Les interactions entre forêts et prairies sont somme toute rarement évoquées sur nos terrains d'étude. Cela tient d'abord aux contextes locaux qui ont conduit à un cloisonnement des acteurs et des espaces : mélézin confiné à l'ubac à Villar d'Arène sur des pentes fortes, forêts d'épicéas, de sapins et de hêtres sur le plateau du Vercors et peu de "forêt paysanne" gérée par des agriculteurs. Quand ces interactions sont mentionnées, c'est aussi de façon contradictoire : tantôt la forêt est présentée comme une menace pour l'adaptation de l'agriculture au changement climatique (remontée en altitude de la forêt gagnant sur les alpages) et tantôt comme un atout (opportunité de pâturage en forêt en cas de sécheresse : cas du mélézin et, surtout, des parcours embroussaillés et boisés soumis au régime forestier dans les zones préalpines sèches qui supposerait une nouvelle organisation, en termes de gouvernance de ces espaces, dont le caractère multifonctionnel serait mieux affirmé). Sur les hauts plateaux du Vercors, une interrogation commence à émerger : les boisements spontanés de pins à crochets, ennemis "historiques" des bergers et des acteurs pastoraux, pourraient bien s'avérer demain des alliés pour éviter l'érosion de ces sols pauvres et squelettiques et la désertification du milieu.

Perspectives

En complément de l'identification des freins à l'adaptation des acteurs agricoles et forestiers au changement climatique ainsi que des leviers d'action, les scénarios devaient permettre de déboucher sur des propositions d'action publique. Ce volet a fait l'objet de la dernière séance de travail avec les experts locaux.

Il convient tout d'abord de distinguer deux registres pour l'action publique : d'une part les actions (urgentes et à court terme) destinées à surmonter les crises (sécheresses du type « scénario choc ») et d'autre part les actions à long terme destinées à favoriser une meilleure adaptation au changement climatique.

Dans le premier cas, diverses crises passées ont déjà permis d'identifier des priorités d'action, en particulier la préservation de l'outil de travail et la gestion d'un afflux temporaire sur le marché de produits plus ou moins déclassés. Dans le domaine forestier les dispositifs d'intervention peuvent s'inspirer de ceux mis en œuvre pour les tempêtes. Pour les exploitations d'élevage, les sécheresses de type choc font courir le risque d'une décapitalisation en cheptel et d'un abandon de l'activité. L'accent doit donc être mis sur la recherche d'un complément de ressources alimentaires afin d'assurer la pérennisation de l'activité. En l'absence de filières locales organisées, seule une coordination nationale peut permettre d'amortir une crise dans le cas d'un scénario global. Inversement, le scénario territorial laisse entrevoir la mise en place possible, au moins dans un premier temps, d'amortisseurs locaux : mobilisation de ressources locales externes (pâturage sous forêt par exemple) d'autant plus aisée que les exploitations sont de moindre taille, appel à la solidarité facilité par l'insertion dans le tissu local, moindre vulnérabilité des exploitations du fait de la diversité de leurs ressources.

Pour les actions à plus long terme, le groupe d'experts a identifié plusieurs cadres d'action publique susceptibles de faciliter l'adaptation préventive des acteurs. Il a aussi relevé des actions destinées à atténuer l'impact des activités sur l'environnement lors de sécheresses.

Certaines dispositions réglementaires permettraient de lever des freins ou pourraient servir de leviers : la révision des statuts professionnels (agricole et forestier) sur un plan social et fiscal afin de faciliter la pluriactivité, l'invention de dispositifs d'accès au foncier adaptés aux nouvelles situations (accès à la propriété privée pour permettre l'évacuation de bois déperissants ou la mobilisation de ressources pastorales complémentaires - scénario global- ou promotion d'associations syndicales foncières pour faciliter l'exploitation de l'ensemble des ressources disponibles -scénario territorial-) ou encore l'ajustement des critères d'aides en fonction des potentialités et capacités réelles des territoires, par exemple les dispositions relatives au plancher de chargement animal sur les surfaces pastorales pour l'attribution des subventions agricoles.

Le second groupe de dispositions relève de mesures ou d'incitations d'ordre financier. Dans ce domaine, les modalités d'intervention diffèrent plus sensiblement selon les scénarios. Dans le cadre d'un scénario global, chaque crise nécessitera la mobilisation de soutiens au coup par coup (subvention au regroupement, au transport et à l'écoulement des surplus, stockage, mesures de sécurisation en forêt) ainsi qu'un accompagnement économique et social des ruptures de trajectoire des territoires (incitations au reboisement des secteurs forestiers productifs, incitations à la restauration des zones dégradées par le pâturage et l'érosion, mise en réserve des espaces à enjeux, régulation interterritoriale des effectifs de cheptel...) et des acteurs (indemnisation des pertes...).

Un scénario territorial paraît offrir une meilleure résistance grâce à des adaptations qui réduisent la vulnérabilité des systèmes : prise en compte des caractéristiques fines du milieu et de l'ensemble de leurs potentiels (multifonctionnalité des espaces) et diversification des activités individuelles et du territoire (pluriactivité). La capacité d'adaptation sera facilitée par l'organisation des filières agricoles et forestières, par une réflexion territoriale sur les fonctions des espaces et un appui à leur gestion multifonctionnelle, par le développement d'activités complémentaires permettant de réduire la dépendance de l'activité principale aux sécheresses ainsi que par un renforcement de la solidarité. Les espaces pastoraux qui tendent à devenir des lieux de « stockage d'animaux » retrouveraient une valeur économique pour évoluer vers des systèmes de haute valeur : finition « de viande d'alpage », lait d'alpage...

Le troisième groupe correspond à des mesures d'animation et de formation : sensibilisation des acteurs sur l'intérêt de s'adapter et de produire des services environnementaux (comme le stockage du carbone), coordination des acteurs pour l'accès aux ressources, promotion des produits agricoles ou forestiers sous forme générique (scénario global) ou sous forme de produits certifiés ou labellisés (scénario territorial), structuration et organisation des circuits courts (scénario territorial), accompagnement du changement (promotion de pratiques et création d'activités complémentaires comme la transformation permettant d'atténuer l'impact des sécheresses) et enfin mise en place et animation de dispositifs d'observation et d'alerte pour anticiper l'ajustement de pratiques.

Le groupe a enfin identifié quelques questions de recherche déterminantes pour orienter et accompagner avec pertinence le changement : une cartographie de la sensibilité des zones aux sécheresses afin d'adapter les changements de pratiques ou d'usages, l'étude des densités de peuplement et des types d'essences forestières / de communautés végétales à favoriser, de meilleures connaissances sur les conséquences écologiques des sécheresses (impact sur les sols, conséquences du feu et des phénomènes d'érosion, espèces favorisées ou éliminées), l'évolution de la forêt et de sa place dans les systèmes pastoraux.

Axe 4 : Stratégies d'observation à long terme

Cet axe s'appuie sur les travaux des axes précédents, des expériences des territoires, et des mesures déjà en cours des organismes gestionnaires.

Méthodologie générale

La méthode utilisée s'est construite en quatre étapes. Dans un premier temps, nous avons récolté les données disponibles sur les stratégies d'observation à long terme suivant différentes sources et procédés. Puis, de ces données disponibles, on a procédé à un état des lieux des protocoles et réseaux pouvant répondre aux objectifs d'observation des effets de la sécheresse sur la zone d'étude. A l'aide de cet inventaire et des éléments d'information disponibles, une analyse générale (réseaux) puis fine (protocoles) a été réalisée. On entend ici par **réseau** l'ensemble des éléments matériels, et immatériels, assurant la mise en relation de différents lieux d'un territoire et des entités qui les occupent. Il se compose non seulement d'éléments linéaires, permanents ou temporaires, qui traduisent l'existence de relations et en garantissent la possibilité, mais également d'éléments nodaux nécessaires à l'organisation des flux et au fonctionnement du **système** dans lequel s'inscrit le réseau. [...] Les **protocoles** ont pour objectif de définir les modalités techniques à mettre en œuvre pour répondre à une hypothèse scientifique. Le protocole regroupe la description des conditions et du déroulement d'une expérience ou d'un test. La description doit être suffisamment claire afin que l'expérience puisse être reproduite à l'identique et il doit faire l'objet d'une analyse critique pour notamment détecter d'éventuels biais. En dernier lieu, via une analyse critique, nous avons évalué différents protocoles en regard des objectifs de construction « de stratégies d'observations à long terme pour favoriser l'adaptation des acteurs » dans le cadre d'un observatoire sécheresse.

Pour mettre en œuvre cette méthode nous avons privilégié la recherche bibliographique et des entretiens avec les partenaires du programme. Ainsi plusieurs centaines de documents issus de la littérature scientifique ou de la littérature grise ont été consultés. quinze d'entretiens ont été réalisés avec les auteurs de protocoles issus du monde académique (10 chercheurs) et de la gestion (parcs, Cerpam). Au total 11 programmes ou projets ont été

étudiés, 57 types de réseau analysés, 49 types de données ou protocoles inventoriés dont 12 protocoles analysés finement. L'ensemble des données récoltées sur les réseaux et protocoles ont été rassemblées sous une base de données développée sous Access®. Nous avons produit des fiches de synthèse par programme et projet, mais aussi de fiches par partenaires. Enfin les données ont été synthétisées sous forme de cartes thématiques et organigrammes, permettant de proposer une vision synthétique et spatialisée des réseaux.

Enfin nous avons mis au point de nouveaux protocoles d'observation des effets de la sécheresse en complément des protocoles déjà existants et évalués dans notre analyse. Notre objectif principal était le développement de méthodes de récolte de données robustes scientifiquement et opérationnelles en zone de montagne.

4.1 Evaluation des réseaux d'observation

Avant de formaliser un observatoire de la sécheresse ou de définir une stratégie scientifique, il est nécessaire de réaliser une analyse poussée de l'existant. Cet existant s'appuiera sur 3 éléments principaux, les protocoles, les organismes collecteurs et les territoires. Chacun de ces niveaux pourra ou pas être fédéré en réseau. Ainsi, dans notre analyse, 2 types de réseaux ont été définis et analysés :

- Les réseaux de partenaires : c'est-à-dire les liens entre tous les organismes qui participent directement ou indirectement à des projets ou programmes qui utilisent ou produisent des protocoles et de la donnée en lien avec les objectifs de SECALP.
- Les réseaux territoriaux, définis comme des entités spatiales, d'une taille variable (quelques hectares à plusieurs milliers) où les actions entreprises convergent vers un même objectif. Pour que ces entités puissent être considérées comme des réseaux il faut qu'au moins deux territoires soient mis en relation. Ces réseaux peuvent être territoriaux au sens propre (ex. Figure 4.1), comme par exemple le réseau des Parcs naturels régionaux, mais peuvent aussi être des réseaux de placettes (ex. Renecofor) ou des réseaux de stations (ex. Météo France).

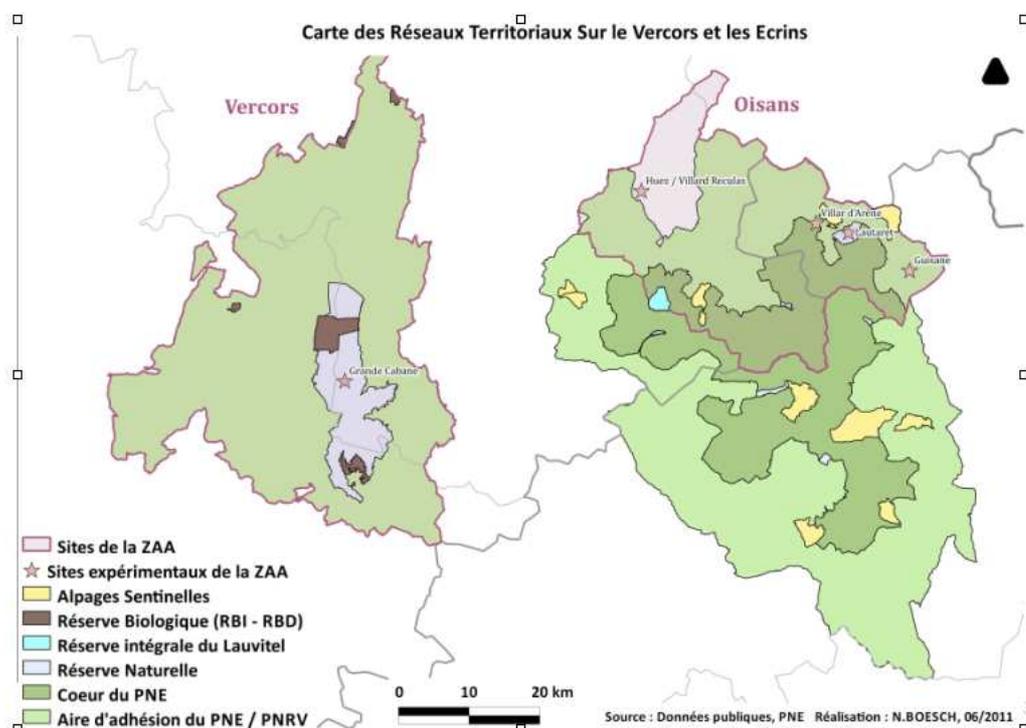


Figure III. 4.1 - Carte des réseaux territoriaux sur le Vercors et les Ecrins.

Cette analyse met en évidence les imbrications multiples et complexes de la démarche SECALP avec les différents réseaux existants (Figure III. 4.2).

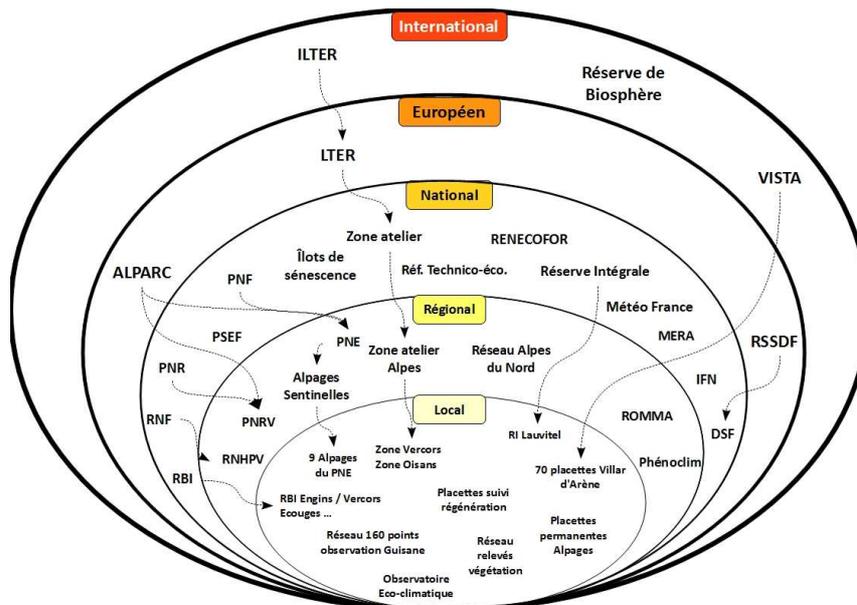


Figure III.4.2 - Bilan des relations entre réseaux à différentes échelles sur la zone d'étude de SECALP

Ainsi, pour les alpages, la démarche Alpages Sentinelles mise en oeuvre sur le Parc National des Ecrins, et dont l'extension est en cours sur le Parc National de la Vanoise et le Parc Naturel Régional du Vercors, représente un exemple d'intégration entre réseaux (voir aussi l'intégration des protocoles ci-après). Il en est de même au niveau météorologique où les démarches mises en oeuvre dans certains espaces (PNRV) ont pu être testées et déployées sur d'autres espaces pour obtenir un réseau de mesure plus cohérent.

Par contraste, pour la forêt plusieurs réseaux se juxtaposent car ils s'intéressent à des espaces différents (forêt gérée, espaces forestiers protégés), à des processus différents (suivi écophysique, suivi de la régénération, bois mort, suivi dendrométrique de la croissance...), et sont gérés par des acteurs différents. Même si tous ces réseaux sont basés sur des placettes qui comportent une description dendrométrique sommaire du peuplement adulte, les différences de protocoles et de répartition spatiale des placettes rendent la combinaison de données venant de ces différents réseaux difficile. Il est par exemple très rare de pouvoir trouver des relevés de végétation, de sol, de climat et de gestion effectués à proximité les uns des autres.

Enfin, l'analyse a mis en évidence les faibles interconnexions entre réseaux (par exemple: peu de réseaux communs entre les 2 sites de la Zone Atelier Alpes) et une stratégie d'observation intégrée devra donc renforcer la communication et les liens opérationnels entre les réseaux afin de pouvoir combiner les résultats obtenus suivant les thématiques (ex. : lien réseau météo, évolution de la ressource en herbe ou évolution des pratiques pastorales). L'extension au Vercors du réseau Alpages Sentinelles serait un plus comme l'harmonisation et la compilation des données forestières dans une base de donnée dédiée.

4.2 - Evaluation des indicateurs et méthodologies : Des méthodes en évolution

La mise en place d'une base de données a permis de recenser l'ensemble des protocoles susceptibles d'être intégrés au sein d'un observatoire. Au total, 77 protocoles et réseaux ont été répertoriés dans la BDD SECALP, l'implémentation de tous les champs est en cours.

Des fiches synthétiques des protocoles reprennent l'ensemble des 9 thèmes décrits :

- Les intervenants (concepteurs, responsables et réseau impliqué)
- La description du protocole (enjeux ,objectif, intérêt, nature..)
- Les moyens techniques (types de matériel, indicateurs)
- Les données
- La méthode (description)
- Les résultats attendus
- Les critères temporels
- Les critères géographiques (nombre et localisation des placettes)
- La localisation cartographique

A l'issue de l'analyse une synthèse par protocole est réalisée pour indiquer les points forts et les points faibles de chacun. Deux exemples peuvent illustrer cette démarche.

+	<input checked="" type="checkbox"/> Des indicateurs non porteurs de signal climatique mais utiles pour le suivi de la sécheresse. <input checked="" type="checkbox"/> La diffusion du protocole est prévue sur d'autres territoires. <input checked="" type="checkbox"/> Une application sur le terrain simple et robuste lors de la récolte des données. <input checked="" type="checkbox"/> Un protocole nécessitant peu d'investissement en budget et en matériel.
-	<input checked="" type="checkbox"/> Une première phase de calibration longue et complexe pour la mise en oeuvre du protocole. <input checked="" type="checkbox"/> Un protocole dont l'objectif premier n'est pas de suivre la sécheresse sur le long terme. <input checked="" type="checkbox"/> Un protocole encore trop jeune (en cours de calibration) : aucun recul possible. <input checked="" type="checkbox"/> Résultats interprétable seulement par croisements indispensables avec des données climatiques.

Tableau 4.1 - Synthèse des points forts et des points faibles du protocole ressource en herbe

+	<input checked="" type="checkbox"/> Les données récoltées sur les placettes sont nombreuses et précises, elles pourraient servir pour suivre la sécheresse sur le long terme. <input checked="" type="checkbox"/> L'échantillon a été réfléchi pour qu'il soit le plus représentatif possible. <input checked="" type="checkbox"/> Le logiciel mis au point pour la saisie de données et pour l'analyse rend les données fiables et homogènes.
-	<input checked="" type="checkbox"/> L'objectif du protocole est de suivre les cycles forestiers dans le temps, aucune analyse n'a pour but de suivre la sécheresse. <input checked="" type="checkbox"/> La méthode d'échantillonnage induit une charge de travail énorme. <input checked="" type="checkbox"/> Une seule campagne de relevés a été mise en place à ce jour, aucune analyse d'évolution n'est encore possible. <input checked="" type="checkbox"/> Les moyens financiers et le temps est conséquent pour mettre en oeuvre ce protocole. <input checked="" type="checkbox"/> Le protocole est largement diffusé, comparer les données d'un site à l'autre présente de nombreuses limites. <input checked="" type="checkbox"/> Le protocole n'est pas adapté au terrain de montagne et seul des spécialistes pourront faire les mesures sur le terrain.

Tableau III.4.1 - Synthèse des points forts et des points faibles du protocole de suivi d'espaces forestiers protégés (type COST E4)

SECALP a permis de confirmer ou clarifier certaines méthodes mais aussi d'en définir ou d'en tester. Au niveau pastoral, nous avons mis en œuvre un protocole de suivi des paramètres du sol (températures, humidité) au moyen de sondes. Ces matériels sont dû être adaptés et la récolte des données gérée en lien avec les conditions liées à la haute montagne (>2000 m) et le niveau d'enneigement (Bigot 2011). Une question importante est aussi de quantifier les variations inter-annuelles de production d'herbe, ce pourquoi les méthodes de "plaine" ont montré leurs limites de faisabilité technique ou organisationnelle (Granger 2008). Un partenariat fort entre laboratoire (LECA) et PNE a permis de définir une méthode opérationnelle en zone de montagne basé sur une relation simple entre hauteur du couvert et biomasse produite. La méthode, en cours de test auprès des agents des Parcs, permet la calibration de cette relation au moyen de récoltes d'un nombre réduit d'échantillons sur le terrain, combiné à des mesures de hauteur elles facilement répliquables sur chaque station.

Au niveau forestier, SECALP a permis de valoriser dans un cadre de recherche les données d'archives de gestion (inventaires réalisés lors des aménagements et sommiers annuels des coupes et des produits accidentels) pour reconstituer des historiques de mortalité sur le 20^e siècle. Dans un contexte où l'ONF réactualise sa démarche d'aménagement et informatise les données de gestion, ce travail permet d'attirer l'attention des gestionnaires sur la nécessité de protocoles standardisés, basés sur des mesures quantitatives, d'un archivage des données sur le long terme et d'un accès centralisé aux données. Comme dans le cas des alpages, SECALP a également permis de tester pour la régénération forestière un protocole intégrant des mesures sur la végétation et des mesures microclimatiques, qui relevaient jusqu'à présents de réseaux disjoints.

Des méthodes ont été testées sans discrimination des espaces, portant principalement sur des aspects météorologiques ou paysages. Ainsi, SECALP a contribué à définir un protocole de suivi de l'enneigement des espaces montagneux au moyen du satellite MODIS (Bigot et al. 2010, Ancelet 2010). Cette méthode à l'avantage d'utiliser des données facilement accessibles dont les enregistrements ont commencé en 2001. Par contre la résolution est de 500 x 500 m ne permet que de travailler sur de grands espaces car. Une méthodologie adaptée

permet aujourd'hui aux techniciens des espaces protégés de mettre en oeuvre de manière autonome ce protocole de suivi.

La méthode de suivi des évolutions des "paysages" au moyen de photographies aériennes permet de visualiser les conséquences en terme de physionomie des changements de couverture des sols. La méthode élaborée conjointement par l'IMEP et le PNE (Dumas E -Janvier 2011) a pu être testée dans le cadre de SECALP sur un alpage (Dumas E – Août 2011). Pour la première fois des évolutions paysagère ont pu être quantifiées sur des périodes longues (1970-2003). Même si cette méthode n'est pas automatisée comme la télédétection, un temps d'opérateur étant nécessaire pour qualifier les pixels de 100 x 100 m, ce temps est largement compensé par les problèmes posées par les images en zone de montagne.

4.3. Des protocoles plus adaptés vers un observatoire de la sécheresse

Il est important de rappeler qu'aucun des protocoles actuellement en place n'a été mis en place spécifiquement pour suivre la sécheresse sur le long terme. C'est pourquoi la mise en place d'un observatoire sécheresse à partir de protocoles existants est un exercice difficile, auquel il faudra adapter les protocoles et leurs objectifs. L'observation à long terme des effets de la sécheresse requière une stratégie d'intégration des protocoles d'observations sur (i) climat et météorologie, (ii) systèmes d'exploitation et pratiques, et (iii) biodiversité et fonctionnement des écosystèmes, des formations herbacées à la forêt en territoires alpins. D'une manière générale tous les protocoles ont leurs propres stratégies d'échantillonnage spatiales et temporelles. Un observatoire de la sécheresse dans les Alpes devra prendre en compte les différents changements d'échelle et les pas de temps qui leurs sont associés. Ainsi on peut préfigurer un agencement de protocoles pouvant répondre aux besoins d'un observatoire (Figure 4 .3). Intégrer des protocoles ayant des pas de temps et des surfaces d'études différentes permet d'analyser le phénomène sécheresse aux différents niveaux d'organisation sur lequel il agit. En particulier il est essentiel de préserver la spécificité des échelles temporelles d'observation aux phénomènes étudiés. L'assemblage judicieux de protocoles ayant des pas de temps différents permettra un suivi intégré de la sécheresse sur le long terme.

Des progrès ont été réalisés sur la cohérence entre protocoles dans le cadre des réseaux comme Alpages Sentinelles. Une stratégie basée sur la collaboration entre organismes spécialisés a été mise au point. Ainsi chaque partenaire couvre un champ d'activité restreint mais participe aux échanges sur la totalité des champs d'action. Cette co-construction vise à identifier les besoins de l'ensemble des partenaires, à comprendre les contraintes méthodologiques et techniques de chacun et aussi à créer autant que possible des interrelations entre les thématiques. Les relations chercheurs, gestionnaires d'espaces protégés, technicien pastoraux, éleveurs et bergers engendrent des questionnements mais aussi des choix originaux pour y répondre. Cette stratégie de dialogue renforce la notion d'appartenance à un réseau et l'interdépendance entre acteurs induit une motivation importante. Le financement hétérogène sous la responsabilité de chaque membre évite les comportements du type « prestataire » ou « guichet unique » mais induit une fragilité dans le temps car si un partenaire à des difficultés à trouver les fonds nécessaire à la mise en oeuvre de ses actions il fragilise tout le réseau .

Au niveau forestier, deux acteurs sont particulièrement structurants. L'Inventaire Forestier National recueille des données sur un très grand nombre de placettes (plusieurs dizaines de milliers sur la France) qui fournissent une vision unique de la forêt sur l'ensemble du territoire. Il est particulièrement regrettable que la relation entre l'IFN et la recherche soit difficile (données payantes à un coût élevé, diffusion des localisations des placettes avec un bruitage qui rend imprécis le couplage avec des bases de données climatiques) et cette relation devrait être améliorée au plus haut niveau. L'Office National des Forêts est également incontournable car une part importante des réseaux recensés sont basés sur des placettes localisées en forêt publique et sont impactés par les opérations de gestion (coupes, exploitation, création de pistes ...). La connaissance sur ces réseaux n'est cependant pas centralisée au sein des agences ONF. Enfin, les acteurs de la protection de la nature et de la recherche ont jusqu'à présent travaillé de manière dispersée. La mise en place de la base de données sur les protocoles est un progrès substantiel car il permet d'identifier les types de données potentiellement disponibles, surtout si l'on dispose d'une information géographique sur la localisation des placettes. Le développement de protocoles plus intégrés climat-végétation paraît hors de portée à court terme car chaque réseau a sa propre logique, ses propres donneurs d'ordre et ses contraintes financières. Lors de l'implantation de nouvelles placettes (ou du maintien de placettes existantes), de grosses améliorations peuvent par contre être apportées sur la

cohérence spatiale entre les différents réseaux, ce qui faciliterait l'utilisation combinée de données d'origines différentes.

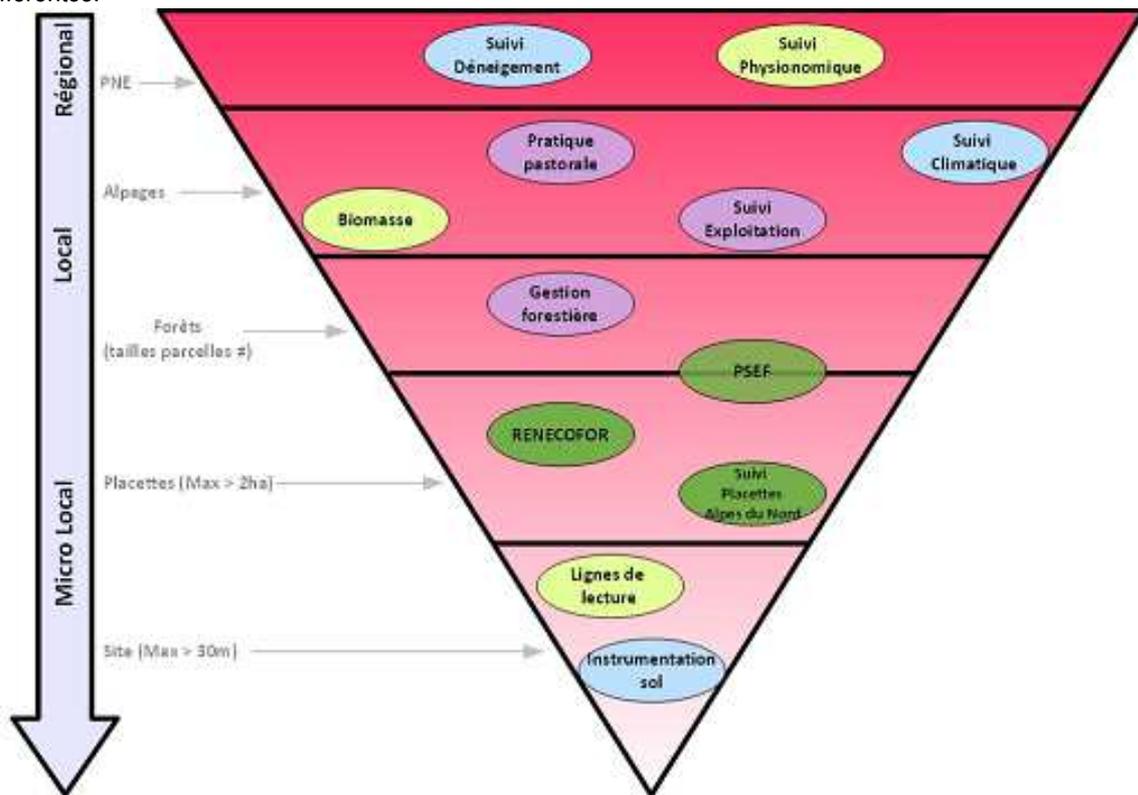


Figure III. 4.3 - Organisation des protocoles suivant différents niveaux d'organisation du micro local au régional.

4.4. Les observatoires comme outils pour accompagner changement :

Cette partie de l'analyse n'est pas encore terminée se poursuivra dans l'année à venir de valorisation du projet. Elle cherchait à répondre aux questions suivantes : Comment utiliser les observatoires pour guider l'adaptation ? Quelles stratégies de communication des résultats aux acteurs (et aux décideurs) ? Quels sont les manques de connaissances à combler pour appréhender les processus écologiques et les dynamiques des socio-écosystèmes de montagne dans la perspective du changement climatique ?

L'animation et une implantation territoriale fortes sont des garanties du succès d'un réseau d'observation sur la sécheresse dans les Alpes. Des initiatives locales et régionales mettent en œuvre des politiques territoriales liées au climat et à ces conséquences comme l'observatoire climatique de l'Oisans en cours de mise en place dans le cadre du Plan Climat Energie Territorial de l'Oisans. L'établissement de diagnostics partagés entre gestionnaires des espaces naturels, acteurs agricoles, forestiers, scientifiques, et acteurs territoriaux est essentielle pour accompagner l'adaptation. Ceux-ci doivent aussi conduire à la définition commune de priorités de recherche et d'observation qui permettront non seulement de combler les manques de connaissances des processus écologiques et des dynamiques des socio-écosystèmes de montagne dans la perspective du changement climatique, mais de réduire les incertitudes qui freinent l'adaptation des acteurs. La communication régulière et la vulgarisation des résultats des suivis et des conclusions sur les dispositifs d'observation doivent impliquer une collaboration étroite entre chercheurs et partenaires techniques (conseillers agricoles, services pastoraux, mission durable de l'ONF, CRPF). A ce titre les réunions de restitution annuelle du réseau alpages sentinelles sont un bon exemple de méthode pour un implication d'acteur très divers (éleveurs, gestionnaires, chercheurs...). Une restitution annuelle a été réalisé au cours desquels les résultats des différents protocoles comme suivi du déneigement ou ressource en herbe ont pu être débattus¹.

¹ <http://www.ecrins-parcnational.fr/actus/51-patrimoines/776-reflexions-partagees-autour-des-alpages-sentinelles.html>
<http://www.ecrins-parcnational.fr/actus/51-patrimoines/407-alpages-sentinelles-du-changement-climatique.html>

Annexe. Présentation des récits élaborés pour chaque scénario prospectif

Récit pour le scénario combinant les modalités "intermittente" et "globale"

On observe une recrudescence d'années sèches, bien que celles-ci alternent avec des années plus humides. L'enneigement n'est pas modifié en hiver et les précipitations de début de saison sont dans les moyennes habituelles. La première année est relativement humide. Lors de la suivante, le printemps est particulièrement sec [type 2004-2005]. Sur les prairies autour du siège de l'exploitation, les rendements en 1^{ère} coupe atteignent 60% des rendements habituels. Au moment de la montée en alpage on se rend compte qu'il y a 2 fois moins d'herbe que d'habitude et que celle-ci est dans un état de végétation avancé [floraison fin juin]. Les sources un peu faibles sont susceptibles de se tarir, les autres s'affaiblissent au cours de l'estive. Les pluies reviennent cependant à partir de mi-juillet sous forme d'orages et permettent une légère amélioration de la végétation en alpage ainsi que de bons regains. La troisième année, il n'y a pas de sécheresse à déplorer. La pousse de l'herbe est bonne en quantité comme en qualité. La quatrième année, le printemps est assez humide, mais c'est au cours de l'été que la sécheresse se fait sentir [type 2009]. L'herbe est disponible en quantité dans les prés de fauche, par contre les regains ne valent pas le coup d'être fauchés mais peuvent être pâturés sur une courte période. Pour les alpages les plus chargés, la situation commence à être tendue au 15 août, d'autant plus qu'il n'y a pas de repousses sur les quartiers bas. Puis on observe de nouveau une année humide et assez rapidement revient une année sèche... Globalement, après ces quatre années, sur les parcours, les surfaces à couverts herbacés se sont maintenues et, en alpage, la végétation des pelouses a peu évolué [résilience des espèces]. En plaine, les éleveurs subissent aussi la sécheresse et sont demandeurs de places en alpage.

En forêt, durant la période 2010-2020, des dépérissements se produisent de manière diffuse dans l'espace et dans le temps. Ils sont plutôt localisés sur les stations à faible réserve utile dans les sols [de l'ordre de 10% d'arbres morts lors des années sèches]. Les dépérissements diffus ont peu d'impact immédiat sur l'économie de la filière : ils ne déstabilisent pas l'offre de bois. Le prix du bois reste stable, le bois de qualité secondaire est écoulé facilement. De même, ils ont peu d'impact immédiat sur les multiples fonctions de la forêt : ils ne dégradent ni les paysages ni les fonctions de protection. On observe durant la période des augmentations de mortalité des arbres adultes et des baisses du renouvellement (mortalité des semis ...). Ces observations font craindre à plus long terme une substitution des essences en place par des essences de plus basse altitude ou plus méridionales [augmentation des feuillus au détriment des résineux, augmentation du pin sylvestre et du chêne pubescent ?]. Des parasites tels que le gui profitent cependant de l'augmentation des températures pour se développer insidieusement.

Parallèlement à ces événements climatiques, la société connaît des transformations sociales et économiques rapides. L'urbanisation continue à se développer dans les agglomérations. L'agriculture est de moins en moins considérée pour son rôle de production alimentaire mais de plus en plus pour le maintien d'un paysage attractif pour les citoyens. Ceux-ci recherchent des zones ouvertes pour pratiquer des activités de loisirs, mais n'ont pas de préoccupations particulières par rapport aux activités locales. La population cherche à s'alimenter à moindre coût, ce qui favorise la concurrence des produits sur le marché mondial et une baisse générale des prix des produits locaux, déjà favorisée par la suppression des quotas [diminution progressive des prix à la production. Au bout de la quatrième année : viande (ovin et bovin): -15% ; lait : -20% pour le conventionnel et l'AOC ; -10% pour les produits bio (argument santé en faveur du bio)]. Pour soutenir les revenus agricoles, les agriculteurs continuent à percevoir les aides découplées au titre de la PAC, mais leur montant est en baisse [-20%], avec cependant un seuil minimal garanti [l'équivalent d'1 SMIC]. Il leur est aussi possible de souscrire des contrats prenant en compte des enjeux environnementaux globaux tels que le stockage du carbone, la qualité de l'eau, la biodiversité... [primes à l'herbe peu contraignantes, prime au boisement, prime pour la création de réserve de

biodiversité (nature sauvage)...]. Pour nourrir les animaux, le prix de l'alimentation concentrée à base de céréales, tout en étant globalement à la hausse, reste marqué par une forte variabilité interannuelle. La pluriactivité hors exploitation est possible en ville.

Il n'y a plus de message politique indiquant une volonté de maintien de la multifonctionnalité à l'échelle de la forêt. La recherche d'une diminution des contraintes de gestion liées à cette multifonctionnalité conduit les gestionnaires à infléchir les aménagements forestiers dans le sens d'une plus grande spécialisation des espaces (espaces de loisirs, peuplements de production, espaces mis en réserves ou non exploités...). Ces aménagements favorisent dans certaines forêts une concentration du tourisme (les sentiers et routes peu fréquentés sont fermés à la circulation pour éviter d'avoir à les entretenir et à assurer leur sécurité). La chasse n'est valorisée que dans certaines zones spécifiques où elle représente une forte valeur économique. Par conséquent les populations d'ongulés augmentent et produisent de nombreux dégâts. Enfin, les gestionnaires forestiers sont redéployés sur les zones les plus rentables. En ce qui concerne l'exploitation du bois, il n'y a pas d'aide à la mobilisation. Celle-ci se concentre donc sur les secteurs accessibles et rentables. Le savoir-faire local diminue. Au niveau de la filière la concentration se poursuit. En 2020, seules trois grosses scieries continuent à s'approvisionner sur le Vercors. Quelques grosses unités de chauffage bois sont développées mais leur rayon d'approvisionnement est supérieur à 500 km. La concurrence sur la demande de bois local est donc faible car la filière n'hésite pas à s'approvisionner ailleurs. Cependant, les préoccupations actuelles concernant la raréfaction des énergies non renouvelables et l'augmentation du prix du pétrole ont incité l'Etat à développer la filière bois-énergie, en proposant des réductions d'impôts aux particuliers souhaitant s'équiper, ce qui peut représenter une opportunité de débouchés pour la filière locale. La politique foncière ne propose pas d'incitation au regroupement. La transmission du patrimoine entre générations conduit à l'augmentation de la fragmentation de la propriété. En cas de choc climatique sur les Alpes, il n'y a pas d'organisation d'une solidarité entre régions de France ou d'Europe. Le pâturage en sous-bois peut-être recherché par les éleveurs et bergers afin d'augmenter leurs ressources fourragères (diminuées suite aux sécheresses). En lisière de forêt, là où les pâturages sont délaissés par les bergers, les friches s'étendent.

Récit pour le scénario combinant les modalités "choc" et "globale"

Les quatre prochaines années sont marquées par une succession de sécheresses de printemps qui ont des effets sur les différents types de surfaces de l'exploitation. D'année en année, sous l'effet combiné des sécheresses et du racle de la végétation par les troupeaux, il y a de moins en moins d'herbe sur les alpages et peu de repousses à l'automne. Les pins présents en limite d'alpage meurent. Le tarissement est rapide pour les sources les plus faibles mais reste progressif au cours des années pour les autres. Sur les parcours, la végétation herbacée et ligneuse diminue et a du mal à se reconstituer. Les prairies de fauche régulièrement fertilisées subissent une perte de 40% de la ressource fourragère. Enfin les prairies pâturées d'intersaison connaissent des baisses de qualité suite à des floraisons précoces et une modification de l'abondance des espèces, notamment une diminution des légumineuses et des espèces fleuries à feuilles larges. Le manque de stock en foin dans différentes régions françaises entraîne une augmentation des prix d'achat [+ 40%]. Par ailleurs, la demande de prise en estive du bétail par les éleveurs de plaine, qui subissent eux aussi la sécheresse, s'accroît et porte également sur des terres de demi-saison [printemps et automne].

On observe de forts dépérissements sur toutes les stations forestières. La mortalité varie de 30% à 100% à l'échelle de peuplements de quelques hectares. Les parasites augmentent massivement et sont des sources de mortalité supplémentaire pour les arbres. A la suite de ces dépérissements, la plupart des peuplements sont très ouverts, ce qui favorise le développement d'espèces pionnières, de landes, arbustes et arbrisseaux (fruticées) et

une hausse du risque d'incendies. Les essences objectifs se renouvellent mal, on s'attend à un changement progressif d'essences au-delà de 2020 vers plus de feuillus et/ou des essences méridionales moins productives et on anticipe à terme une diminution du bois d'œuvre issu de résineux au profit du bois énergie feuillu, moins intéressant économiquement. La filière est fortement désorganisée par un afflux brutal de bois lié aux dépérissements puis à plus long terme elle connaît un trou de production puisque les peuplements ont été ruinés. Les grandes quantités de bois sec conduisent à un fort risque d'incendies [CT : dû au bois sec / LT : bois sec + développement d'espèces pionnières, de fruticées ...]. Les paysages et la fonction de protection sont durablement impactés. Le maintien de la sécurité des routes et des sentiers entraîne un travail considérable de nettoyage.

Parallèlement à ces événements climatiques, la société connaît des transformations sociales et économiques rapides. L'urbanisation continue à se développer dans les agglomérations. L'agriculture est de moins en moins considérée pour son rôle de production alimentaire mais de plus en plus pour le maintien d'un paysage attractif pour les citoyens. Ceux-ci recherchent des zones ouvertes pour pratiquer des activités de loisirs, mais n'ont pas de préoccupations particulières par rapport aux activités locales. La population cherche à s'alimenter à moindre coût, ce qui favorise la concurrence des produits sur le marché mondial et une baisse générale des prix des produits locaux, déjà favorisée par la suppression des quotas [diminution progressive des prix à la production. Au bout de la quatrième année : viande (ovin et bovin): -15% ; lait : -20% pour le conventionnel et l'AOC ; -10% pour les produits bio (argument santé en faveur du bio)]. Pour soutenir les revenus agricoles, les agriculteurs continuent à percevoir les aides découplées au titre de la PAC, mais leur montant est en baisse [-20%], avec cependant un seuil minimal garanti [l'équivalent d'1 SMIC]. Il leur est aussi possible de souscrire des contrats prenant en compte des enjeux environnementaux globaux tels que le stockage du carbone, la qualité de l'eau, la biodiversité... [primes à l'herbe peu contraignantes, prime au boisement, prime pour la création de réserve de biodiversité (nature sauvage)...]. Pour nourrir les animaux, le prix de l'alimentation concentrée à base de céréales, tout en étant globalement à la hausse, reste marqué par une forte variabilité interannuelle. La pluriactivité hors exploitation est possible en ville.

Il n'y a plus de message politique indiquant une volonté de maintien de la multifonctionnalité à l'échelle de la forêt. La recherche d'une diminution des contraintes de gestion liées à cette multifonctionnalité conduit les gestionnaires à infléchir les aménagements forestiers dans le sens d'une plus grande spécialisation des espaces (espaces de loisirs, peuplements de production, espaces mis en réserves ou non exploités...). Ces aménagements favorisent dans certaines forêts une concentration du tourisme (les sentiers et routes peu fréquentés sont fermés à la circulation pour éviter d'avoir à les entretenir et à assurer leur sécurité). La chasse n'est valorisée que dans certaines zones spécifiques où elle représente une forte valeur économique. Par conséquent les populations d'ongulés augmentent et produisent de nombreux dégâts. Enfin, les gestionnaires forestiers sont redéployés sur les zones les plus rentables. En ce qui concerne l'exploitation du bois, il n'y a pas d'aide à la mobilisation. Celle-ci se concentre donc sur les secteurs accessibles et rentables. Le savoir-faire local diminue. Au niveau de la filière la concentration se poursuit. En 2020, seules trois grosses scieries continuent à s'approvisionner sur le Vercors. Quelques grosses unités de chauffage bois sont développées mais leur rayon d'approvisionnement est supérieur à 500 km. La concurrence sur la demande de bois local est donc faible car la filière n'hésite pas à s'approvisionner ailleurs. Cependant, les préoccupations actuelles concernant la raréfaction des énergies non renouvelables et l'augmentation du prix du pétrole ont incité l'Etat à développer la filière bois-énergie, en proposant des réductions d'impôts aux particuliers souhaitant s'équiper, ce qui peut représenter une opportunité de débouchés pour la filière locale. La politique foncière ne propose pas d'incitation au regroupement. La transmission du patrimoine entre générations conduit à l'augmentation de la fragmentation de la propriété. En cas de choc climatique sur les Alpes, il n'y a pas d'organisation d'une solidarité entre régions de France ou d'Europe. Le pâturage en sous-bois peut-être recherché par les éleveurs et bergers afin d'augmenter leurs ressources fourragères (diminuées suite aux sécheresses). En lisière de forêt, là où les pâturages sont délaissés par les bergers, les friches s'étendent.

Récit pour le scénario combinant les modalités "intermittente" et "territoriale"

On observe une recrudescence d'années sèches, bien que celles-ci alternent avec des années plus humides. L'enneigement n'est pas modifié en hiver et les précipitations de début de saison sont dans les moyennes habituelles. La première année est relativement humide. Lors de la suivante, le printemps est particulièrement sec [type 2004-2005]. Sur les prairies autour du siège de l'exploitation, les rendements en 1^{ère} coupe atteignent 60% des rendements habituels. Au moment de la montée en alpage on se rend compte qu'il y a 2 fois moins d'herbe que d'habitude et que celle-ci est dans un état de végétation avancé [floraison fin juin]. Les sources un peu faibles sont susceptibles de se tarir, les autres s'affaiblissent au cours de l'estive. Les pluies reviennent cependant à partir de mi-juillet sous forme d'orages et permettent une légère amélioration de la végétation en alpage ainsi que de bons regains. La troisième année, il n'y a pas de sécheresse à déplorer. La pousse de l'herbe est bonne en quantité comme en qualité. La quatrième année, le printemps est assez humide, mais c'est au cours de l'été que la sécheresse se fait sentir [type 2009]. L'herbe est disponible en quantité dans les prés de fauche, par contre les regains ne valent pas le coup d'être fauchés mais peuvent être pâturés sur une courte période. Pour les alpages les plus chargés, la situation commence à être tendue au 15 août, d'autant plus qu'il n'y a pas de repousses sur les quartiers bas. Puis on observe de nouveau une année humide et assez rapidement revient une année sèche... Globalement, après ces quatre années, sur les parcours, les surfaces à couverts herbacés se sont maintenues et, en alpage, la végétation des pelouses a peu évolué [résilience des espèces]. En plaine, les éleveurs subissent aussi la sécheresse et sont demandeurs de places en alpage.

En forêt, durant la période 2010-2020, des dépérissements se produisent de manière diffuse dans l'espace et dans le temps. Ils sont plutôt localisés sur les stations à faible réserve utile dans les sols [de l'ordre de 10% d'arbres morts lors des années sèches]. Les dépérissements diffus ont peu d'impact immédiat sur l'économie de la filière : ils ne déstabilisent pas l'offre de bois. Le prix du bois reste stable, le bois de qualité secondaire est écoulé facilement. De même, ils ont peu d'impact immédiat sur les multiples fonctions de la forêt : ils ne dégradent ni les paysages ni les fonctions de protection. On observe durant la période des augmentations de mortalité des arbres adultes et des baisses du renouvellement (mortalité des semis ...). Ces observations font craindre à plus long terme une substitution des essences en place par des essences de plus basse altitude ou plus méridionales [augmentation des feuillus au détriment des résineux, augmentation du pin sylvestre et du chêne pubescent ?]. Des parasites tels que le gui profitent cependant de l'augmentation des températures pour se développer insidieusement.

Parallèlement à ces événements climatiques, la société connaît des transformations sociales et économiques. L'urbanisation continue à se développer dans les agglomérations, mais les territoires ruraux peuvent tirer leur épingle du jeu car les citoyens montrent un intérêt grandissant pour les produits locaux, qui renvoient une image de qualité et d'ancrage au terroir. Ainsi, les prix des produits en vente directe et/ou sous label bio ou AOC se maintiennent, ce qui n'est pas le cas pour les produits de la filière traditionnelle [Diminution progressive. Au bout de la quatrième année : Lait : -20% / viande ovine et bovine : -15%]. Cette population apprécie aussi les loisirs valorisant les patrimoines naturels et culturels, ce qui permet un essor de l'agritourisme. Suite à la nouvelle réforme de la PAC, les agriculteurs ne bénéficient plus de Droits à Paiement Unique (DPU) automatiques mais ils continuent à percevoir, avec une éco-conditionnalité renforcée, un DPU « reverdi » et l'indemnité compensatoire de handicap naturel (ICHN). Dans un contexte où les préoccupations environnementales grandissent encore, ils peuvent aussi s'engager sur des contrats agro-environnementaux. Les aides liées à ces contrats sont versées sous forme de MAE avec des engagements sur les résultats à atteindre. Les territoires prennent en charge au niveau local le développement rural, et participent au financement des équipements pastoraux sur les alpages communaux (pistes, abreuvoirs, cabanes...). Le prix de l'alimentation concentrée à base de céréales reste marqué par une forte variabilité interannuelle.

Les politiques affichent une volonté d'augmenter encore la multifonctionnalité à l'échelle de chaque forêt. Il est nécessaire d'organiser cette multifonctionnalité et de gérer les contraintes liées à des usages qui peuvent être contradictoires. Le tourisme est diffus sur l'ensemble du territoire, nécessitant des infrastructures nombreuses et bien entretenues. La chasse est valorisée les populations d'ongulés bien régulées. La protection de la biodiversité n'est pas orientée sur le développement de réserves mais plutôt sur la distribution d'îlots de vieillissements dans toutes les forêts. Enfin, les gestionnaires forestiers sont présents sur l'ensemble du territoire. Une aide à la mobilisation du bois est instaurée. Celle-ci permet d'augmenter les surfaces exploitables et rentables pour les propriétaires. Le savoir-faire local se maintient ou se développe (recours aux câbles). En ce qui concerne la dynamique de la filière, de nombreuses petites scieries se maintiennent ou se redéveloppent. Suite à la flambée du cours du pétrole, beaucoup de petites chaufferies à bois se développent dans la région, dont l'approvisionnement en matériaux se fait localement (rayon d'approvisionnement inférieur à 50 km). Les clients sont relativement dépendants des forêts locales et se retrouvent en concurrence. Les collectivités de la région s'organisent, en concertation avec les scieurs, pour lancer une campagne de promotion des bois d'origine locale avec la mise en place d'une labellisation spécifique. La politique foncière développe des incitations à la restructuration foncière lors des successions et des ventes. Ceci favorise des regroupements de propriétés. En cas de choc climatique sur les Alpes, la solidarité nationale et Européenne est organisée et active. Le pâturage en sous-bois peut-être recherché par les éleveurs et bergers afin d'augmenter leurs ressources fourragères (diminuées suite aux sécheresses).

Récit pour le scénario combinant les modalités "choc" et "territoriale"

Les quatre prochaines années sont marquées par une succession de sécheresses de printemps qui ont des effets sur les différents types de surfaces de l'exploitation. D'année en année, sous l'effet combiné des sécheresses et du raclage de la végétation par les troupeaux, il y a de moins en moins d'herbe sur les alpages et peu de repousses à l'automne. Les pins présents en limite d'alpage meurent. Le tarissement est rapide pour les sources les plus faibles mais reste progressif au cours des années pour les autres. Sur les parcours, la végétation herbacée et ligneuse diminue et a du mal à se reconstituer. Les prairies de fauche régulièrement fertilisées subissent une perte de 40% de la ressource fourragère. Enfin les prairies pâturées d'intersaison connaissent des baisses de qualité suite à des floraisons précoces et une modification de l'abondance des espèces, notamment une diminution des légumineuses et des espèces fleuries à feuilles larges. Le manque de stock en foin dans différentes régions françaises entraîne une augmentation des prix d'achat [+ 40%]. Par ailleurs, la demande de prise en estive du bétail par les éleveurs de plaine, qui subissent eux aussi la sécheresse, s'accroît et porte également sur des terres de demi-saison [printemps et automne].

On observe de forts dépérissements sur toutes les stations forestières. La mortalité varie de 30% à 100% à l'échelle de peuplements de quelques hectares. Les parasites augmentent massivement et sont des sources de mortalité supplémentaire pour les arbres. A la suite de ces dépérissements, la plupart des peuplements sont très ouverts, ce qui favorise le développement d'espèces pionnières, de landes, arbustes et arbrisseaux (fruticées) et une hausse du risque d'incendies. Les essences objectifs se renouvellent mal, on s'attend à un changement progressif d'essences au-delà de 2020 vers plus de feuillus et/ou des essences méridionales moins productives et on anticipe à terme une diminution du bois d'œuvre issu de résineux au profit du bois énergie feuillu, moins intéressant économiquement. La filière est fortement désorganisée par un afflux brutal de bois lié aux dépérissements puis à plus long terme elle connaît un trou de production puisque les peuplements ont été ruinés. Les grandes quantités de bois sec conduisent à un fort risque d'incendies [CT : dû au bois sec / LT : bois sec + développement d'espèces pionnières, de fruticées ...]. Les paysages et la fonction de protection sont durablement impactés. Le maintien de la sécurité des routes et des sentiers entraîne un travail considérable de nettoyage. »

Parallèlement à ces événements climatiques, la société connaît des transformations sociales et économiques. L'urbanisation continue à se développer dans les agglomérations, mais les territoires ruraux peuvent tirer leur épingle du jeu car les citoyens montrent un intérêt grandissant pour les produits locaux, qui renvoient une image de qualité et d'ancrage au terroir. Ainsi, les prix des produits en vente directe et/ou sous label bio ou AOC se maintiennent, ce qui n'est pas le cas pour les produits de la filière traditionnelle [Diminution progressive. Au bout de la quatrième année : Lait : -20% / viande ovine et bovine : -15%]. Cette population apprécie aussi les loisirs valorisant les patrimoines naturels et culturels, ce qui permet un essor de l'agritourisme. Suite à la nouvelle réforme de la PAC, les agriculteurs ne bénéficient plus de Droits à Paiement Unique (DPU) automatiques mais ils continuent à percevoir, avec une éco-conditionnalité renforcée, un DPU « reverdi » et l'indemnité compensatoire de handicap naturel (ICHN). Dans un contexte où les préoccupations environnementales grandissent encore, ils peuvent aussi s'engager sur des contrats agro-environnementaux. Les aides liées à ces contrats sont versées sous forme de MAE avec des engagements sur les résultats à atteindre. Les territoires prennent en charge au niveau local le développement rural, et participent au financement des équipements pastoraux sur les alpages communaux (pistes, abreuvoirs, cabanes...). Le prix de l'alimentation concentrée à base de céréales reste marqué par une forte variabilité interannuelle.

Les politiques affichent une volonté d'augmenter encore la multifonctionnalité à l'échelle de chaque forêt. Il est nécessaire d'organiser cette multifonctionnalité et de gérer les contraintes liées à des usages qui peuvent être contradictoires. Le tourisme est diffus sur l'ensemble du territoire, nécessitant des infrastructures nombreuses et bien entretenues. La chasse est valorisée les populations d'ongulés bien régulées. La protection de la biodiversité n'est pas orientée sur le développement de réserves mais plutôt sur la distribution d'îlots de vieillissements dans toutes les forêts. Enfin, les gestionnaires forestiers sont présents sur l'ensemble du territoire. Une aide à la mobilisation du bois est instaurée. Celle-ci permet d'augmenter les surfaces exploitables et rentables pour les propriétaires. Le savoir-faire local se maintient ou se développe (recours aux câbles). En ce qui concerne la dynamique de la filière, de nombreuses petites scieries se maintiennent ou se redéveloppent. Suite à la flambée du cours du pétrole, beaucoup de petites chaufferies à bois se développent dans la région, dont l'approvisionnement en matériaux se fait localement (rayon d'approvisionnement inférieur à 50 km). Les clients sont relativement dépendants des forêts locales et se retrouvent en concurrence. Les collectivités de la région s'organisent, en concertation avec les scieurs, pour lancer une campagne de promotion des bois d'origine locale avec la mise en place d'une labellisation spécifique. La politique foncière développe des incitations à la restructuration foncière lors des successions et des ventes. Ceci favorise des regroupements de propriétés. En cas de choc climatique sur les Alpes, la solidarité nationale et Européenne est organisée et active. Le pâturage en sous-bois peut-être recherché par les éleveurs et bergers afin d'augmenter leurs ressources fourragères (diminuées suite aux sécheresses).

Valorisation

Articles de revues scientifiques

- Benot, M. L., P. Saccone, E. Reydet, R. Vicente, M. P. Colace, K. Grigulis, J. C. Clément, and S. Lavorel. Management, not summer climate manipulation, drives changes in biodiversity and functioning of a subalpine grassland. *Oecologia*, soumis.
- Csillery, K., A.-L. Bartalucci, M. Seignobosc, and B. Courbaud. Tree mortality in the French Alps, climate and storm effects. En preparation.
- Defossez, E., O. Lasbouygues, B. Courbaud, and G. Kunstler. Do indirect plant interactions follow the stress gradient hypothesis? An experimental test on the regeneration success of six tree species in the French Alps. Soumis
- Jung V., Albert C.H., Violle C., Kunstler G., Loucougaray G. & Spiegelberger T. Functional response of subalpine grassland communities to experimental drought. En preparation.
- Jung V., Kazakou E., Spiegelberger T. & Loucougaray G. Drought indirectly modifies decomposition in a subalpine grassland through trait-mediated community changes in litter quality. En preparation
- Lamarque P., Quéfier F., Artaux A., Eveilleau C., Nettiier B., Dobremez L., Barnaud C., Lavorel S.. A participative scenario approach to describe mountain grasslands land management change. En preparation.
- Nettier B., Dobremez L., Coussy J.L., Romagny T., 2010. Attitudes des éleveurs et sensibilité des systèmes d'élevage face aux sécheresses dans les Alpes françaises. *Revue de Géographie Alpine*, 98-4, <http://rga.revues.org/index1294.html>.
- Seignobosc, M., K. Csillery, and B. Courbaud. Estimating forest disturbance regimes: combining periodic inventories and mortality time series in a Bayesian state-space model. En preparation.

Chapitres d'ouvrages

- Lavorel, S., T. Spiegelberger, I. Mauz, S. Bigot, C. Granjou, L. Dobremez, B. Nettiier, W. Thuiller, J.-J. Brun, and P. Cozic. 2011. Coupled long-term dynamics of climate, land use, ecosystems and ecosystem services in the Central French Alps. *in* S. J. Singh, H. Haberl, M. Chertow, M. Mirtl, and M. Schmid, editors. Long term socio-ecological research: Studies in society-nature interactions across spatial and temporal scales. Springer-Verlag. Sous presse.

Mémoires d'étudiants

- Artaux A., 2011. Impact de la recrudescence des sécheresses sur les systèmes herbacés subalpins. Conséquences sur les services écosystémiques. Mémoire de fin d'études d'ingénieur. ENSAIA Nancy, septembre 2011, 28 p. + annexes.
- Bartalucci, A.-L. 2011. Recherche de données de gestion permettant la reconstitution historique de la mortalité forestière dans les Alpes. Stage de D.U. "Université-Entreprises", Université Joseph Fourier.
- Bartalucci, A.-L. 2011. Reconstitution historique de la mortalité de forêts alpines, effet de variables climatiques sur le taux de mortalité de ces forêts. Stage de D.U. "Université-Entreprises", Université Joseph Fourier.
- Boesch N., 2011 : Analyse définition et bilan sur les stratégies d'observation à long terme dans le cadre du projet SECALP, portant sur l'impact des sécheresses répétées sur les alpages et la forêt. – rapport M2 rennes 2-128 pages + annexes - Parc national des Ecrins
- Deboeuf E., 2009. Adaptabilité des systèmes d'élevage de haute montagne à des aléas. Le cas de Villar d'Arène (Parc National des Ecrins, Hautes-Alpes). Mémoire de fin d'études d'ingénieur ENITA de Clermont-Ferrand, octobre 2009, 90 p. + annexes.
- Eveilleau, C. 2011. S'adapter aux sécheresses à venir dans les Alpes ...Réactions d'acteurs agricoles et forestiers du Vercors face à des scénarios prospectifs intégrant différentes modalités de recrudescence des sécheresses et d'évolution du contexte socio-économique. Mémoire de fin d'étude - Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers.

- Le Pottier V., 2010. Adaptations et sensibilité des systèmes d'élevages à la sécheresse : cas d'exploitations utilisatrices d'alpages dans le Vercors. Mémoire de fin d'études d'ingénieur VetAgro Sup et Esitpa, septembre 2010, 44 p. + annexes.
- Portier, J. 2009. Distribution de la régénération forestière sur les hauts Plateaux du Vercors en fonction d'un gradient de température. Stage de Master 1 - Université Joseph Fourier.
- Rodron, E., B. Courbaud, and P. LeQuéau. 2010. Les acteurs forestiers du Vercors face au changement climatique. Enquête sociologique - printemps 2010., Rapport d'étude pour le projet SECALP.

Rapports

- Ancelet E., Octobre 2010 : Suivi du déneigement des « alpages sentinelles » du parc national des Ecrins par l'imagerie MODIS snow cover (période 2000 – 2010). – rapport pour le parc national des Ecrins- 61 pages
-
- Bigot S., Septembre 2011 : Mise en place du protocole « humidité du sol » pour le programme « alpages sentinelles » – rapport pour le parc national des Ecrins- 27 pages -
- Dumas E., Janvier 2010 : Méthodes d'analyse multiscalaire des patrons paysagers dans le parc national des Ecrins. Phase 1 - Rapport PNE - IMEP - 17 pages
- Dumas E., Juillet 2010 : Méthodes d'analyse multiscalaire des patrons paysagers dans le parc national des Ecrins. Phase 3 - Rapport PNE - IMEP - 33 pages

Communications à des colloques scientifiques

Internationaux

- Benot, M.-L., P. Saccone, K. Grigulis, E. Reydet, R. Vicente, J.-C. Clément, and S. Lavorel. 2011. Resistance of an alpine meadow after two years of seasonal climate change and an extreme event. *in* 54th Symposium of the International Association for Vegetation Science. IAVS, Lyon, France.
- Benot, M.-L., P. Saccone, R. Vicente, E. Reydet, A. Morvan-Bertrand, M. L. Decau, K. Grigulis, M. P. Prud'homme, and S. Lavorel. 2011. Land-use vs. climate change: do they both represent a threat to subalpine grasslands? A test on the dominant *Festuca paniculata* (L.) Schinz & Thell. *in* 12th European Ecological Federation Meeting, Ávila, Spain.
- Lavorel, S., P. Cozic, T. Spiegelberger, S. Bigot, and I. Mauz. 2010. The French Alps long-term socio-ecological research platform. Global Land Project Open Science Meeting, Phoenix, AZ.
- Nettier B., Dobremez L., Talichet M., Romagny T., Le Pottier V., 2011. Managing the summer alpine pastures in a context of recurrent droughts. 16th European Grassland Federation (EGF) 'Grassland farming and land management systems in mountainous regions', Raumberg-Gumpenstein (Austria), 28-31 August 2011, *Grassland Science in Europe*, 16, 61-63.

Français

- Bigot S. Ancellet E. Rabatel. & Bonet R., 2010. « Etude du déneigement saisonnier des alpages sentinelles du Parc national des Ecrins (France) grâce à l'imagerie MODIS ». Poster 12^{ème} journées scientifiques du réseau télédétection de l'AUF Monastir (Tunisie) 23-25 novembre 2010.
- Jung V., Albert C.H., Violle C., Kunstler G., Loucougaray G. & Spiegelberger T. (présentation orale, 2011) Rôle de la variabilité intraspécifique dans la réponse de communautés herbacées subalpines à la sécheresse. ECOVEG 7, 30 mars – 1er avril 2011, Lausanne, Suisse.
- Lamarque P., 2011. Méthodes participatives avec les éleveurs. Cas d'étude du Lautaret (ZA Alpes). Colloque des Zones Ateliers, 4-7 octobre 2011, Rennes, France

Poster

- Lamarque P., Quétier F., Artaux A., Eveilleau C., Nettier B., Dobremez L., Lavorel.S., 2011. Farmers playing with hay, manure and future drought !. Colloque des zones Ateliers, 4-7 octobre 2011, Rennes, France

Lamarque P., Quétier F., Artaux A., Nettier B., Dobremez L., Lavorel S., 2012. A Participatory Approach to Model Ecosystem Services in the Future. Planet Under Pressure 2012, 25th – 29th March 2012, Excel London (UK).

Communications à des séminaires

Nettier B., 2010. Adaptation des systèmes d'élevage des Alpes à la recrudescence des sécheresses. Carrefour Climat du Parc Naturel Régional des Pyrénées ariégeoises, Le Mas d'Azil (09), 5 novembre 2010, diaporama.

Lamarque P., Quétier F., Artaux A., Nettier B., Dobremez L., Lavorel S., 2011. Effets de la sécheresse sur les services des écosystèmes. Une Approche participative. Séminaire Interne INRA Equipe Dynafor, 17 octobre 2011, Toulouse, France

Presse

Sandra Lavorel, Arbres et plantes prennent de la hauteur. Article paru dans le Dauphiné Libéré, 15 décembre 2011.

Bibliographie

- Baptist, F., F. Viard-Créat, H. Secher-Frommell, M. Desclos, P. Lainé, I. Aranjuelo, J. C. Clément, S. Nogués Mestres, and S. Lavorel. Carbohydrate and nitrogen stores in *Festuca paniculata* under mowing explain dominance in subalpine grasslands. *Plant Biology*, submitted.
- Beckage, B., B. Osborne, D. G. Gavin, C. Pucko, T. Siccama, and T. Perkins. 2008. A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont. *Proceedings of the National Academy of Science, USA* **105**:4197-4202.
- Bellon S., Girard N., Guérin G., 1999. Caractériser les saisons-pratiques pour comprendre l'organisation d'une campagne au pâturage. *Fourrages*, 158, 115-132.
- Bigot S., Rome, S. (2010) Contraintes climatiques dans les Préalpes françaises : évolution récente et conséquences potentielles futures. *Echogéo*, Paris. In press.
- Castella, J. C., T. N. Trung, et al. (2005). "Participatory simulation of land-use changes in the northern mountains of Vietnam: the combined use of an agent-based model, a role-playing game, and a geographic information system." *Ecology and Society* 10(1).
- Coléno F.C., Duru M., Theau J.P., 2005 A method to analyse decision-making processes for land use management in livestock farming. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 3, 69-77.
- Dullinger, S., T. Dirnböck, and G. Grabherr. 2004. Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. *Journal of Ecology* **92**:241-252.
- Duru M., Nocquet J., Bourgeois A., 1988. Le système fourrager, un concept opératoire ? *Fourrages*, 115, 251-272.
- Fleury Ph., Dubeuf B., Jeannin B., 1996. Forage management in dairy farms: a methodological approach. *Agricultural Systems*, 52, 199-212.
- Granger E., 2008 : Comparaison de quatre méthodes d'évaluation de la biomasse en alpage et proposition d'un protocole de suivi de l'évolution de la ressource en alpage à moyen terme – rapport M2 ENITA Bordeaux – 50p- Parc national des Ecrins.
- Guérin G., Moulin C., Tchakérian E., 2009. Les apports de l'approche des systèmes pastoraux à la réflexion sur la gestion des ressources des zones herbagères. *Fourrages*, 200, 489-498.
- de Jouvenel H., 1999. La démarche prospective. Un bref guide méthodologique. *Futuribles*, 247, 24 p. (mise à jour en 2002).
- Lémery B., Ingrand S., Dedieu B., Dégrange B., 2008. La flexibilité des élevages allaitants face aux aléas de production et aux incertitudes de la filière. in Dedieu B., Chia E., Leclerc B., Moulin C.H., Tichit M. *L'élevage en mouvement : flexibilité et adaptation des exploitations d'herbivores*. Quae éd., Collection Sciences & Technologie Update, 143-159.
- Martin, G., B. Felten, et al. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environmental Modelling & Software* (in press).
- Office National des Forêts - Direction Territoriale Rhône-Alpes. 2006. Directive Régionale d'Aménagement. ONF.
- Vieilledent, G., B. Courbaud, G. Kunstler, and J. F. Dhôte. 2010. Mortality of Silver fir and Norway spruce in the western Alps - a semi-parametric approach combining size-dependent and growth-dependent mortality. *Annals of Forest Sciences* **67**.
- Woodall, C. W., C. M. Oswalt, J. A. Westfall, C. H. Perry, M. D. Nelson, and A. O. Finley. 2009. An indicator of tree migration in forests of the eastern United States. *Forest Ecology and Management* **257**:1434-1444.