

Programma europeo di cooperazione transfrontaliera tra Francia e Italia 2014-2020

Programme de coopération transfrontalière européenne entre la France et l'Italie 2014-2020

Progetto / *Projet* n. 1712 - CONCERT-EAUX

4.1.8 – Biodiversità e Aree protette

4.1.8 - Biodiversité et Aires Protégées

*4.2.4 – Impatto del cambiamento climatico sulla vegetazione
della Val Roia*

*4.2.4 - Impact du changement climatique sur la végétation dans
la vallée de la Roya*

Julien Andrieu, Matthieu Vignal

UMR CNRS ESPACE 7300

Partner: Centre National de la Recherche Scientifique



Résumé en Italien :

L'importanza della biodiversità delle Alpi Marittime e Liguri è ormai riconosciuta. Questa diversità è legata al clima e a come il clima varia dalle zone basse mediterranee alle montagne del Val Roya. Per ciò, è stato considerato importante di monitorare i cambiamenti che si potrebbe associare al cambiamento climatico e di fare, grazie a modelli, una prospettiva di quel impatto potenziale, futuro.

1) Transetti phitoclimatici

Per cominciare, questo programma di ricerca, abbiamo percorso tutto il val Roya, di Grimaldi Superiore alla Cima del Sabione per rilevare 530 specie (7333 osservazioni). Ha rivelato che le flore mediterranee e alpine si mischiano molto meno di quanto si può osservare altrove. Significa che una zona dove si fa il cambiamento di flora potrebbe essere particolarmente vulnerabile.

2) Leggere le previste climatiche future come variabile per le piante

Le temperature e le periode secche dovrebbero essere più frequenti d'estate, l'aumento delle temperature invernali dovrebbe essere presente ma meno forte che per l'estate. I modelli non sono chiari sul futuro delle precipitazioni.

3) Mappare i cambiamenti della vegetazione

Il Val Roya conosce un'aumentazione della densità della vegetazione coll'abbandono di campi e prati. La foresta occupa nuove zone precedentemente aperte. Questa dinamica non si può dimenticare dello presente studio.

4) Monitorare cambiamenti nei cicli stagionali della vegetazione

L'attività della vegetazione (photosynthesi) varia nei suoi cicli stagionali dalle zone basse alle zone alte. Certi cambiamenti si possono notare nelle serie di osservazione dai satelliti. Però, gli unici cambiamenti osservati sono quelli citati sopra : l'aumentazione della foresta sui campi e sulla macchia mediterranea, che non è legato al cambiamento climatico.

5) Monitorare les dinamiche del popolamento di 25 specie

I modelli di adeguazione del habitat per le specie si possono utilizzare per sapere se una zona oggi vivibile per una specie potrebbe non esserlo più prima del 2100 o, al contrario se una zona troppo fredda oggi potrebbe divenire vivibile prima del 2100. Abbiamo fornito le carte di vivibilità futura per 25 specie rappresentative della biodiversità della Roya. Si vede che cambiamenti importanti sono da prevedere alla luce di quella nozione di vivibilità.

Però, questo programma aveva per obiettivo di proporre al territorio una modellizzazione più realistica che questi modelli. Per ciò abbiamo realizzato le operazioni seguenti :

- a) Abbiamo osservato per gli alberi e cespugli di questo campione di specie se si osservano già cambiamenti delle popolazioni (numero di vecchi alberi malati, di giovani alberi etc.) alcune differenze si possono notare tra le zone che sono rimaste vivibile e le zone che hanno già perso la vivibilità. Non si notano cambiamenti maggiori ; ma il rapporto tra numero di vecchi e giovani può cambiare, come per l'abete che soffre in certe zone del cambiamento climatico.
- b) Abbiamo osservato e modellizzato la ripartizione realistica delle popolazioni perché tutte le zone vivibile per una specie non sono di fatto occupate per questa specie. Volevamo modellizzare il futuro su una base realistica per il presente.
- c) Abbiamo modellizzato cambiamenti futuri realistici (riguardo primo alla ripartizione attuale, poi ai cambiamenti osservati, e, in fine a i processi di cambiamenti (quanto lontano un seme può essere disperso, quale probabilità di sopravvivenza etc.)

Queste analisi molto originali mappano possibili impatti del cambiamento climatico, per meno importanti che colla vivibilità soltanto. Cio' per due ragioni : primo abbiamo visto che nelle zone dove il clima a cambiato, le specie si adattano in grande maggioranza, dunque modellizzare popolazioni di alberi che moiono tutto d'un colpo non era ragionevole. Secondo, non è perche una zone dovrebbe diventare abbastanza calda per una specie col cambiamento climatico, che questa specie ha la capacità di venire occupare questa zona. Questo lavoro mette in luce piccoli cambiamenti e impote vulnerabilità possibile. Mette anche in luce l'adequazione della protezione del territorio (parchi) e delle specie.

Résumé

L'importance de la biodiversité des Alpes Maritimes et Ligures est désormais reconnue. Cette diversité est liée au climat et à la structure spatiale de celui-ci dans la Roya de l'aval méditerranéen aux montagnes. Pour cette raison, il est important de suivre les changements en cours et de modéliser ceux qui pourraient survenir dans le futur en liaison avec le changement climatique. Pour cela nous avons travaillé à un protocole en 5 étapes résumées une à une ici :

6) Transect phytoclimatique

Pour commencer ce programme de recherche, nous avons parcouru tout la vallée de la Roya, de Grimaldi Supérieur à la Cime du Sabion pour relever 530 espèces (7333 observations). Cela a permis de mettre en évidence que les flores méditerranéennes et alpines se mélangent beaucoup moins qu'ailleurs dans les autres montagnes méditerranéennes. Cela signifie qu'une zone où se fait cette brusque transition (vers 1700 mètres d'altitude) pourrait être particulièrement vulnérable.

7) Analyser les sorties de modèles climatiques futurs pour les plantes de la Roya

Les températures et les périodes sèches devraient être plus fréquentes en été, l'augmentation des températures hivernales devraient être se réaliser, mais moins forte que pour l'été. Les modèle ne sont pas clairs sur le futur des précipitations.

8) Cartographier les changements de la végétation

La vallée de la Roya connaît une augmentation de la densité de sa végétation, conséquence de l'abandon des champs et des pâturages. La forêt occupe de nouvelles zone qui était ouvertes il y a quelques décennies. Cette dynamique doit être prise en compte dans le suivi et l'anticipation des changements.

9) Suivre les changements des cycles saisonniers de la végétation

L'activité de la végétation (photosynthèse) varie sous forme de cycles saisonniers qui diffèrent entre les zones basses méditerranéennes et les zones hautes alpines. Certains changements peuvent se relever dans les série d'observations issues des satellites. Cependant, pour la Roya pour les 2 dernières décennies, les seuls changements significatifs observés sont liés à l'augmentation de la part des forêts dans le paysage, non au changement climatique.

10) Suivre les dynamiques de population d'un échantillon d'espèces

Les modèle de viabilité (est-ce en un lieu précis, le milieu permet à une espèce de vivre ?) peuvent être employés pour estimer si une zone, aujourd'hui viable pour une espèce, pourrait ne plus l'être d'ici à 2100 ou, au contraire, si une zone trop froide aujourd'hui pourrait devenir viable d'ici à 2100. Nous avons réalisé et fourni les cartes de viabilité future pour 25 espèces

représentatives de la biodiversité de la Roya. Il y apparaît que des changements importants sont à prévoir au regard de cette notion de viabilité.

Cependant, ce programme avait pour objectif de proposer au territoire une modélisation plus réaliste que celle issue de ces modèles de viabilité. Pour cela, nous avons réalisé les opérations suivantes :

- d) Nous avons observé et modélisé la répartition réaliste des populations (ce que ne font pas les modèles de viabilité) parce que toutes les zones viables pour une espèce ne sont pas occupées par cette espèce. Or nous avons voulu modéliser le futur sur une base réaliste pour le présent.
- e) Nous avons observé, pour 7 espèces d'arbres et 2 arbustes, si des changements sont notables dans les populations (nombre de vieux arbres malades, de jeunes, etc.). Quelques légères différences peuvent être relevées entre les zones qui sont restées viables et les zones qui ont déjà perdu la viabilité entre le climat des années 1970 à 2000 et celui d'aujourd'hui. Ces changements ne sont pas de grande ampleur ; mais le ratio nombre de vieux arbres malades et de jeunes change, comme pour le Sapin qui dépérit déjà, dans certaines zones qui correspondent à des pertes de viabilité, plus que là où son climat lui convient encore.
- f) Nous avons modélisé les changements futurs réalistes au regard, d'abord, des deux points ci-dessus (densité réaliste et changements observés sur le terrain). Ensuite, cette modélisation a couplé les modèles de viabilité et les processus biologiques de changements réalistes (jusqu'à quelle distance une graine peut être dispersée, quelle probabilité de survie ou de mortalité, etc.)

Ces analyses très originales permettent de cartographier les impacts probables du changement climatique, et ceux-ci sont bien moins importants que lorsque que l'on regarde cela avec la simple notion de viabilité. Cela s'explique par deux raisons : premièrement, nous avons vu que dans les zones où le climat a changé, la majeure partie des espèces s'adaptent, et quand des changements s'observent il s'agit jusqu'ici du nombre d'individus en un lieu pas d'une disparition ou apparition complète d'une espèce en un lieu. Ainsi modéliser des populations entières d'arbres qui meurent toutes en quelques décennies ne semble pas réaliste dans la Roya, dans l'état de nos connaissances. Deuxièmement ce n'est pas parce que une zone devrait devenir assez chaude pour une espèce présente plus au sud ou plus en bas de la Vallée que cette espèce a la capacité de venir occuper cette zone. Ce travail outre ajouter de la précision et de la prudence dans les projections futures, a aussi mis en évidence de petits changements et d'importantes vulnérabilités possibles. Il a aussi mis en évidence une bonne adéquation de la protection de l'espace (Parc, réserves, réseau Natura2000) et des espèces.

Le Bassin Méditerranéen est un Hotspot de biodiversité (Myers, 2000) au niveau mondial. Au sein de ce Hotspot, Médail et Quézel (1997) ont défini des hotspots locaux dont les Alpes maritimes et ligures. Au sein des Alpes Maritimes et Ligures le programme BiodivAM a montré que c'est le bassin versant de la Roya qui comprend la plus haute diversité. La Roya est donc un lieu dont l'enjeu de conservation de la faune et la flore est l'un des plus importants de la planète.

La dénivellation du bassin versant de la Roya s'étend de 0 m à la mer à plus de 3000 m au point culminant en moins de 50 km. La variation climatique est exceptionnelle : plus de 70 jours de gel à la hauteur de Tende et presque aucun à Vintimille ; des étés chauds et secs en bord de mer avec des cumuls de pluie qui augmentent avec l'altitude.

Ce gradient climatique, à la fois abrupt et aux extrêmes contrastés, est le facteur explicatif principal de la biodiversité exceptionnelle de la Roya pour deux raisons. Premièrement, la concaténation des étages bioclimatiques en un espace restreint et la complétude de l'étagement depuis l'étage thermo-méditerranéen à l'étage nival génère par la simple addition des richesses de chaque étage une richesse globale particulièrement forte. Deuxièmement la courte distance qui sépare les milieux froids et chauds et l'axe nord-sud relativement rectiligne de la vallée a facilité les migrations amont-aval de la biodiversité à chaque changement climatique et de ce fait a permis la survie de quelques espèces paléo-endémiques tertiaire dont la plus ancienne est *Berardia subacaulis* datée de 32 millions d'années dont endémique ayant précédé le refroidissement du climat à la fin du tertiaire, ayant précédé la mise en place du climat méditerranéen et ayant précédé la surrection des Alpes. En plus des conséquences du gradient abrupt, il convient de noter la situation centrale de carrefour biogéographique entre :

- Alpes et Apennins là où les montagnes sont les plus proches de la mer
- Entre péninsules Italiques et Ibériques là où l'arc méditerranéen est le plus septentrional (et le plus proche des Alpes)
- Là où le milieu méditerranéen est au contact à la fois du climat alpin et du climat semi-continental dans la plaine du Pô

La biodiversité est donc exceptionnelle et justifie la présence de nombreux outils territoriaux de protection de la biodiversité

- 1 parc national : le Parc National du Mercantour (France) (dont la totalité de la zone cœur est inscrite au statut de SIC Natura 2000 mais ne figure pas dans le tableau ci-dessous)
- 2 parcs naturels régionaux : Alpi Marittime et Alpi Liguri (Italie) qui bordent la Roya au nord et à l'Est.
- Un réseau d'aires Natura 2000 ici présentés d'aval en amont dans le tableau X :

Tableau 1 : présentation des Sites d'intérêt communautaires Natura 2000 de la Roya (PNM exclu).

IT1315717	Monte Grammodo - Torrente Bevera	2643 ha	SIC
IT1315714	Monte Abellio	745 ha	SIC
FR9301566	Sites à chauves-souris de Breil-sur-Roya	2497 ha	SIC
FR9302005	La Bendola	1063 ha	SIC

FR9301561	Marguareis - La Brigue - Fontan - Saorge	6327 ha	SIC
FR9301560	Mont Chajol	1427 ha	SIC

En addition de ces statuts de protection déjà en place il est important de signaler le projet territorial d'inscription de l'ensemble ces aires protégées sur la liste du patrimoine mondial de l'humanité de l'UNESCO sur critères naturels (histoire de la Terre).

Dans un tel contexte avec une richesse spécifique remarquable et très étroitement liée à structure micro-régionale du climat, il est nécessaire d'acquérir une meilleure connaissance de la répartition géographique des espèces et du rôle que le climat joue dans celle-ci. Sans une étude fine de la contribution des seuils climatiques à la distribution des espèces, il est en effet impossible de prétendre anticiper les conséquences du changement climatique sur la distribution des espèces. Il faut donc définir les aires de distribution et les niches écologiques des espèces sensibles aux conditions climatiques avec des données climatiques fines et actuelles. Pour cela il sera nécessaire d'étudier les distributions à l'échelle régionale (I) pour étudier, grâce à la spatialisation des données climatiques, les niches écologiques à l'échelle régionale (II). Par la suite, il sera nécessaire d'étudier les distributions à l'échelle locale dans une position médiane de la vallée (III). Ensuite, il est impératif d'étudier les marqueurs des dynamiques actuelles qui permettent de construire les hypothèses sur les impacts futurs du changement climatique sur la végétation. Il s'agit dès lors, premièrement, de replacer l'actuel dans la dynamique du couvert végétal d'échelle décennale liées aux variations des activités anthropiques, facteur de changement bien plus important que l'impact du changement climatique et qui, si l'on ne l'étudie pas, ne permet pas une compréhension de la part du climat dans l'évolution de la végétation (IV). Ensuite, il faudra mener une d'étude des cinématiques phénologiques par analyse de séries temporelles à haute résolution d'images d'indices de végétation pour voir si les saisonnalités du couvert végétal ont évolué en réponse aux fluctuations passées récentes du climat et si l'on retrouve une tendance conforme à la tendance au réchauffement telle qu'elle sera caractérisée dans la Roya (V). Ensuite il s'agira de sélectionner quelques espèces pour lesquelles il est possible de décrire la dynamique du peuplement (âge des individus, natalité, mortalité, nombre de graines, taux de germination, etc.) de sorte à tester l'hypothèse que la dynamique du peuplement est sensible au climat et qu'aux marges climatiques des aires de distribution, le peuplement est conditionné par le climat (VI). Il sera enfin possible de calibrer des modèles (automate cellulaire couplé à Système multi-agent) pour modéliser l'impact potentiel du changement climatique sur la distribution des espèces en intégrant les données climatiques actuelles et futures, la dynamique du couvert végétale, la cinématique phénologique et la dynamique du peuplement.

1) Réalisation de deux transects phyto-climatiques.

Deux transects (un transect est un échantillon sous forme d'une ligne) ont été réalisés, l'un, le principal, d'échelle régionale depuis le littoral (Grimaldi superiore) à la limite de l'interfluve et du climat Alpin à 2 500 mètres d'altitude (Tende). Le second est à l'échelle d'un versant du Vallon de la Bendola.

Entre Avril et Aout 2018, les relevés botaniques ont été réalisés. Il s'est agi de suivre une ligne de 10 mètres d'épaisseur sur longueur de 40km du littoral à Ventimiglia - Grimaldi superiore, à la limite de l'interfluve de la Roya, à la cime du Sabion, à 2 610 mètres d'altitude (Tende). Il en a résulté, un jeu de données constitué de 150 relevés (de 250 mètres sur 10 mètres), 529 espèces de plantes vasculaires et 7333 observations.

Cette campagne ne vise pas un recensement de biodiversité intégral, certains taxons de difficile reconnaissance sans les outils de la génétique ont été volontairement écartés pour ne s'appuyer que sur des déterminations sûres. Cette campagne a pour objectif de caractériser la variation dans l'espace (entre le littoral et la montagne) de la flore, dans son ensemble. L'objectif n'est donc pas d'obtenir une liste intégrale d'espèces mais d'en avoir un nombre suffisant pour savoir comment la flore varie quand on l'étudie en continu le long de la vallée de la Roya.

Les données non traitées seront mises à disposition des décideurs par le biais de la base SILENE.

Le traitement se fait à l'aide d'outils statistiques. Le premier outil statistique ici employé est une analyse en composantes principale (ACP). L'analyse en composantes principales révèle sous forme d'un graphique (plan factoriel 1/2) les principaux contrastes dans le jeu de données.

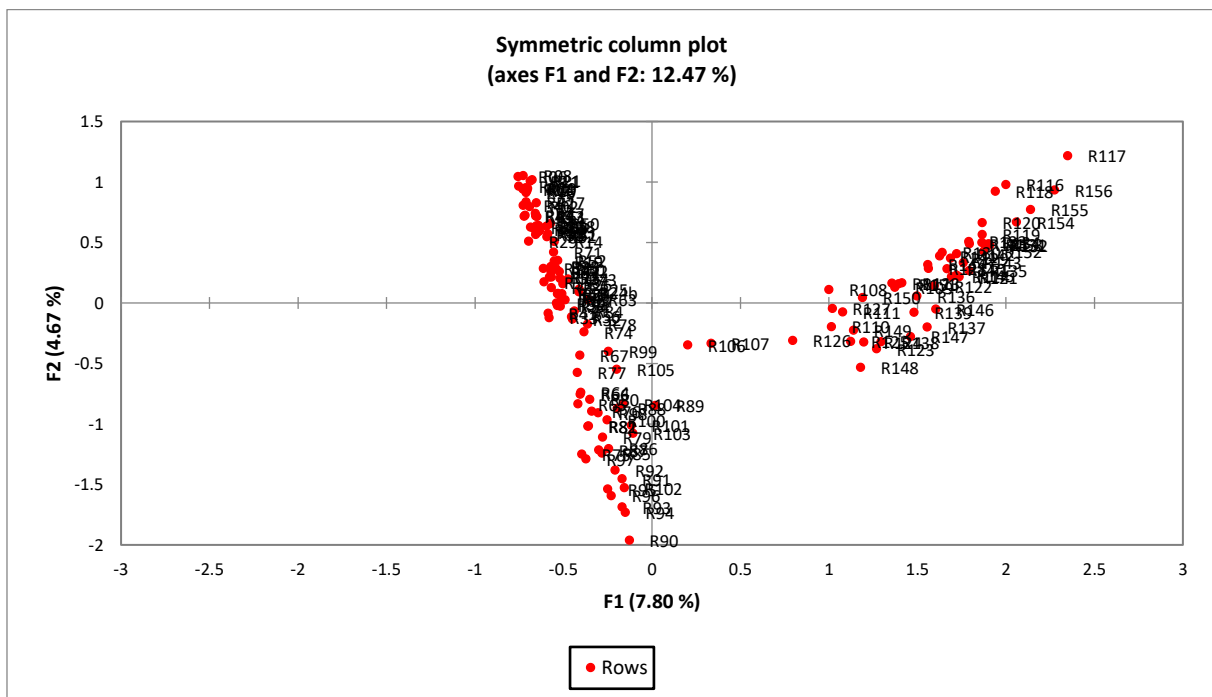


Figure 1 : Plan factoriel 1/2 issu d'une ACP sur le tableau en Présences-absences du transect en Vallée de la Roya.

Sans rentrer dans une analyse de détail de ce graphique peu lisible, la forme du nuage de point avec deux groupes de points bien distincts signifie que deux ensembles de relevés botaniques très différents s'opposent. Un groupe de relevés méditerranéens et un groupe de relevés alpins.

S'il est évident que la flore méditerranéenne de Ventimiglia diffère de la flore des hauts sommets du Mercantour, ce nuage révèle une particularité forte de cette distinction : la très nette séparation des deux ensembles floristiques. Les points auraient pu être mieux dispersés avec un grand nombre de points intermédiaires entre les deux groupes. La nette séparation des deux groupes de points signifie que peu d'espèces sont communes aux deux moitiés du transect

- Une moitié méditerranéenne du littoral à l'adret de la Vallée du Cairros
- Une moitié alpine de l'Adret du Cairros à la Cime du Sabion

Si l'on dessine sous forme d'un graphique comment varie la flore (telle qu'elle est synthétisée par les coordonnées de l'Axe 1 qui distingue la flore méditerranéenne de la flore Alpine) associée à l'altitude le long du transect (Figure 2), on voit que les valeurs faibles (flore méditerranéennes) varient peu depuis le littoral jusqu'au premier tiers du versant Sud de la Vallée du Cairros (point 100 sur le graphique) puis augmentent très rapidement et, ensuite, varient proportionnellement à l'altitude.

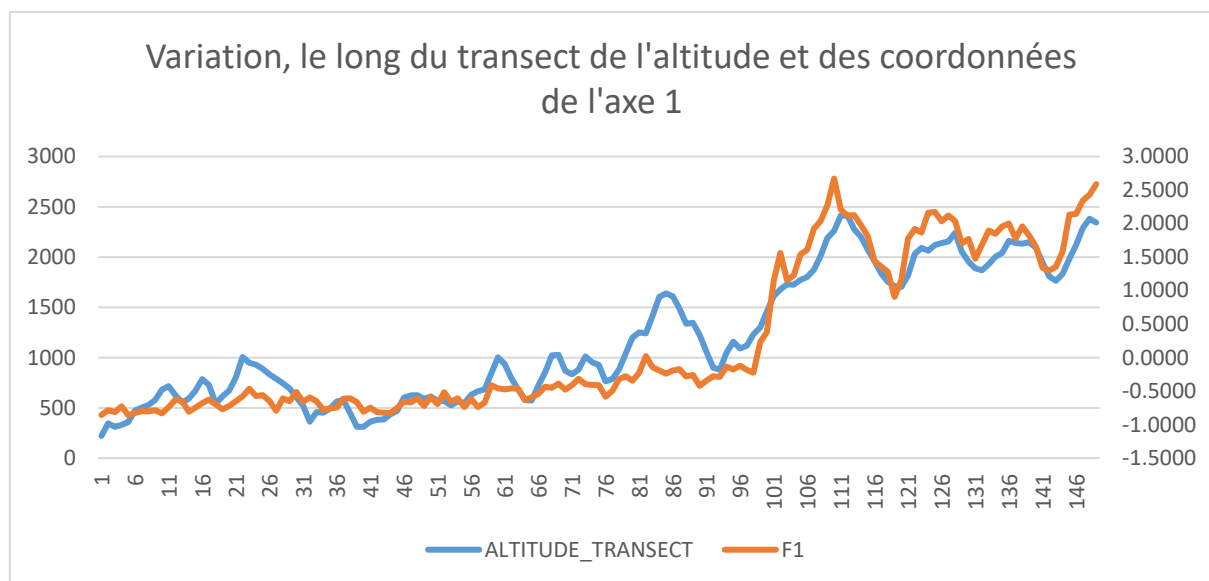


Figure 2 : Variation, le long du transect de l'altitude et des coordonnées de l'axe 1

Le graphique, figure 1 offre une deuxième information, chacun des deux groupes de points est relativement allongé, verticalement (axe 2 du graphique). En effet, de manière relativement indépendante au contraste entre végétations de basse et de haute altitude, les deux groupes de relevés connaissent un contraste entre les végétations basses et ouvertes et les végétations forestières.

- Pour la moitié des relevés du littoral et des collines, il s'agit de la différence entre les garrigues et les forêts.
- Pour la moitié des relevés de montagne, il s'agit de la différence entre les forêts et les alpages.

Cependant, contrairement à la distinction entre flore méditerranéenne et flore Alpine qui semble nette autour de cette rupture dans l'adret du Cairns, ici il s'agit d'un ensemble de nuances plus ou moins marquées mais pas d'une distinction forte de deux ensembles.

Que nous apprennent ces statistiques en termes d'anticipation d'impacts du changement climatique pour la Roya ?

La nette distinction de 2 ensembles botaniques avec un changement en un lieu charnière de la vallée l'identifie comme le lieu le plus vulnérable aux changements. Si la flore méditerranéenne semble assez homogène (à part un contraste entre forêts et garrigues), on pourrait envisager comme scénario le plus probable que la moitié haute du versant du Cairns constitue la partie de la Roya la plus probable de voir sa flore se modifier en réaction au changement climatique.

Ce secteur de transition mis en évidence par le transect et les analyses statistiques de celui-ci se caractérise en outre par une flore assez pauvre et assez banale. Il ne s'agit pas d'un versant où les espèces se mélangent. Bien au contraire, les espèces méditerranéennes semblent disparaître avant ce versant ou du moins tout en bas de celui-ci et les espèces subalpines semblent n'apparaître que plus haut, notamment sur le plateau de la Céva.

Dans la mesure où cette transition est liée à un versant de faible richesse spécifique, nous pouvons émettre une hypothèse que, si le changement climatique devait avoir un impact sur la flore, ce serait sous forme de nouvelles arrivées d'espèces méditerranéennes dans la moitié haute de ce versant avant tout.

Voyons dans un deuxième temps ce que l'analyse des images satellites permettent de savoir sur les changements et comment on peut articuler la botanique et la télédétection par les images satellites.

2) Changement climatique au regard des variables biotiques en vallée de la Roya

Des projections climatiques ont été traitées afin d'analyser les tendances futures de cinq indices sur trois points de grille de la vallée de la Roya. D'une part, nous avons les séries temporelles mensuelles du modèle Aladin au pas de temps annuel, utiles pour faire ressortir la variabilité interannuelle des 5 indices. D'autre part, nous avons les graphiques à barres venant en complément, et permettant de positionner le modèle Aladin par rapport à l'ensemble de modèles Euro-CORDEX, afin de relativiser l'utilisation de ce modèle seul, et d'avoir une idée de la variabilité inter-modèles existante.

L'augmentation de la température moyenne au cours du XXIème siècle est présente sur toute l'année sur les trois points de la Roya, avec un **accent sur l'été**. La **distinction entre les scénarios est visible à partir de la moitié du siècle, et marquée à la fin du siècle**, notamment pour le RCP 8.5. Le scénario RCP 2.6 reste majoritairement dans l'intervalle de variabilité de la simulation historique, alors que le scénario RCP 8.5 en sort presque toujours.

La projection du modèle Aladin en température est basse par rapport à l'ensemble Euro-CORDEX sur la période de référence, cependant son positionnement diffère pour les projections futures, selon les mois de l'année et les horizons.

La **baisse du nombre de jours de gel** est marquée pour tous les mois de l'année concernés par le gel, **notamment pour les points Roya milieu et Roya haut qui se trouvent en plus haute altitude.**

La **hausse des vagues de chaleur** touche tous les mois de l'année, mais **principalement les mois d'été et d'automne.** C'est à partir de la deuxième moitié du XXIème siècle que l'on observe une augmentation avérée, et majoritairement dans le cas du scénario RCP 8.5. Les points en altitude sont plus impactés que le point Roya bas.

L'évolution du cumul des précipitations ne révèle pas de tendance particulière, et met en avant une grande variabilité interannuelle d'une part, et une grande variabilité inter-modèles d'autre part.

De même, **l'évolution des périodes de sécheresse ne révèle pas de tendance distincte** et présente une grande variabilité interannuelle, voire plus longue (décennale, multi-décennale).

3) Changement de la couverture végétale

Notre positionnement pour anticiper les impacts du changement climatique sur la végétation de la Roya est de prendre en compte les autres facteurs de changement ; en particulier, l'évolution des paysages en fonction des changements des activités humaines, abandons agricoles, vieillissement des forêts etc.

Pour cela, nous avons cartographié les changements de l'occupation du sol de la vallée entre les années 1980 et aujourd'hui à l'aide de traitements d'images satellites LANDSAT. La méthode employée est un emboîtement de classification non supervisées par l'algorithme des K-moyennes. La carte des changements (Figure 3) représente en teintes de gris les occupations du sol stables entre les deux dates, les 3 couleurs sont les principaux types de changement.

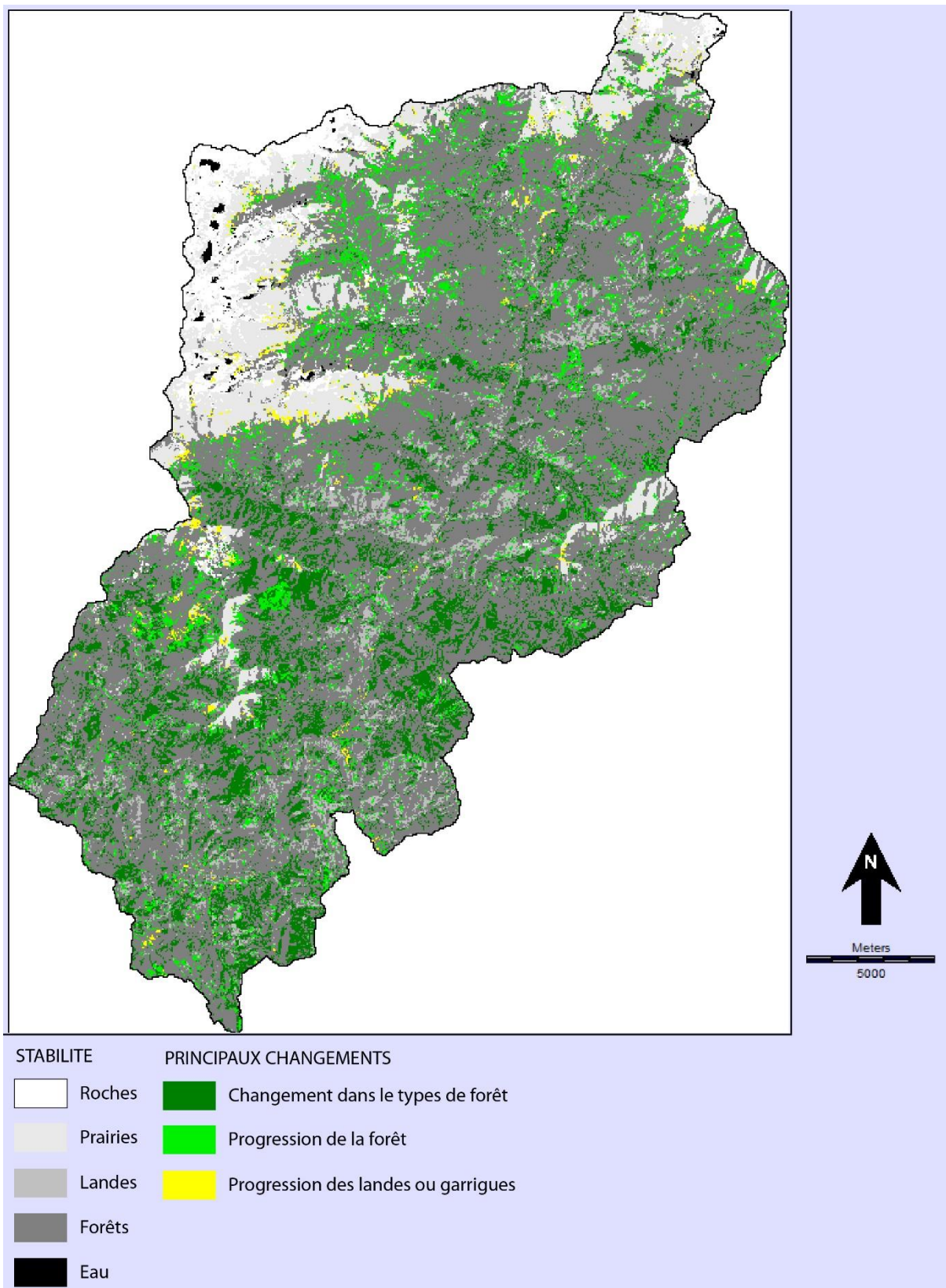


Figure 3 : Changements d'occupation du sol dans la Roya française entre 1986 et 2016

En 30 ans, les forêts ont connu quelques changements (forêts de conifères deviennent des forêts mixtes ; les forêts mixtes deviennent des forêts de feuillus). Les forêts ont augmenté en superficie au détriment des pelouses, prairies, friches, landes et garrigues. Les landes et garrigues ont augmenté en superficie au détriment des pelouses et des zones rocheuses. Cette cartographie révèle que la vallée de la Roya est un espace dans lequel les activités agropastorales tendent à diminuer en surface et en intensité. Les anciennes zones agricoles s'enfrichent et les forêts vieillissent.

Les changements observés dans les populations de plantes seront-elles liées uniquement à ces changements du paysage, uniquement au changement climatique ou est-ce que les deux impacts seront observés, distinctement ou conjointement ?

Il est intéressant de revenir sur l'exemple de l'adret du Cairns mis en évidence comme une zone de changement floristique potentielle en réaction au changement climatique. En effet cette approche en changement d'occupation du sol complète notre compréhension de ce site (et de tous les autres versants comparables de la Roya). En effet, outre le faible nombre d'espèce et sa situation à la charnière entre les flore méditerranéennes et alpines, ce versant est l'un des versants de récente conquête forestière sur des milieux précédemment ouverts. Ces milieux sont donc occupés par des forêts de Pin sylvestre, espèce normalement pionnière c'est-à-dire qui colonise les espaces en friche mais qui se fait remplacer par une espèce forestière (ex : Sapin, Hêtre). Ce milieu est donc propice aux changements de flore par sa localisation dans le gradient général et par son histoire récente.

4) Changement dans les cycles saisonniers

La phénologie, l'étude des rythmes biologiques a été ici mobilisée à la recherche de fluctuations temporelles qui pourraient être interprétées comme des conséquences du changement climatique.

Dans cet objectif, nous présentons ici une étude de cinématique phénologique par analyse de séries temporelles à haute résolution d'images d'indices de végétation pour voir si les saisonnalités du couvert végétal ont évolué en réponse aux fluctuations récentes du climat et si l'on retrouve une tendance conforme à la tendance au réchauffement telle qu'elle sera caractérisée dans la Roya.

Le produit issu de la télédétection satellitaire « *MODQ13 MODIS NDVI 16-day composite grid data* » (MOD13Q1) a été téléchargé depuis le portail *Earth Observing System3* (EOS). Il s'agit de séries temporelles de NDVI (Indice de végétation normalisé) qui transcrivent pour chaque pixel et à chaque « date » (synthèse sur 16 jours) l'intensité de l'activité photosynthétique. Fensholt *et al.* (2009) affirment que les tendances de MODIS *Terra* sont plus précises que celles de Spot Végétation et NOAA AVHRR. Les images ont une résolution de 250 mètres, supérieure à NOAA AVHRR, SPOT-VGT et MSG. Cette résolution efface les microstructures (parcellaires) mais révèle les structures locales à micro-régionales. Il s'agit, en termes de longueur de séries temporelles de NDVI, de la meilleure résolution spatiale à l'heure actuelle. La série débute en janvier 2002 et a été téléchargée jusqu'en décembre 2017.

Elle permet de définir pour chaque pixel un régime phénologique végétatif moyen (sur les 16 ans) d'une part et les tendances sur les 16 ans d'autre part.

Avant de suivre les modifications de la végétation, une lecture biogéographique des cycles phénologiques saisonniers doit être menée. Pour ceci, la production de profils saisonniers permet l'analyse des différents cycles végétatifs des différentes régions et des différentes périodes. Chaque pixel présente son propre profil temporel mais, pour réduire les profils à un nombre qu'il est possible d'étudier ou de présenter, il s'est agi de réduire les pixels en un petit nombre de classes (Andrieu, 2017). Pour cette raison, nous avons choisi de subdiviser la région d'étude en 8 classes, nombre moyen permettant à la fois d'atteindre la précision d'une lecture micro-régionale et de produire une lecture d'ensemble des cartes et des graphiques. Pour délimiter ces régions, nous avons procédé à une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur l'ensemble de la série temporelle. Les composantes principales ont ensuite été étalonnées de 0 à 255 pour créer des néo-canaux utilisés dans une classification à 8 classes basée sur l'algorithme des K-moyennes (Diday, 1973).

La classification produit une cartographie des différents rythmes phénologiques de l'activité végétative. La cartographie des huit ensembles phénologiques révèle une structure surtout liée à l'altitude (figure 4).

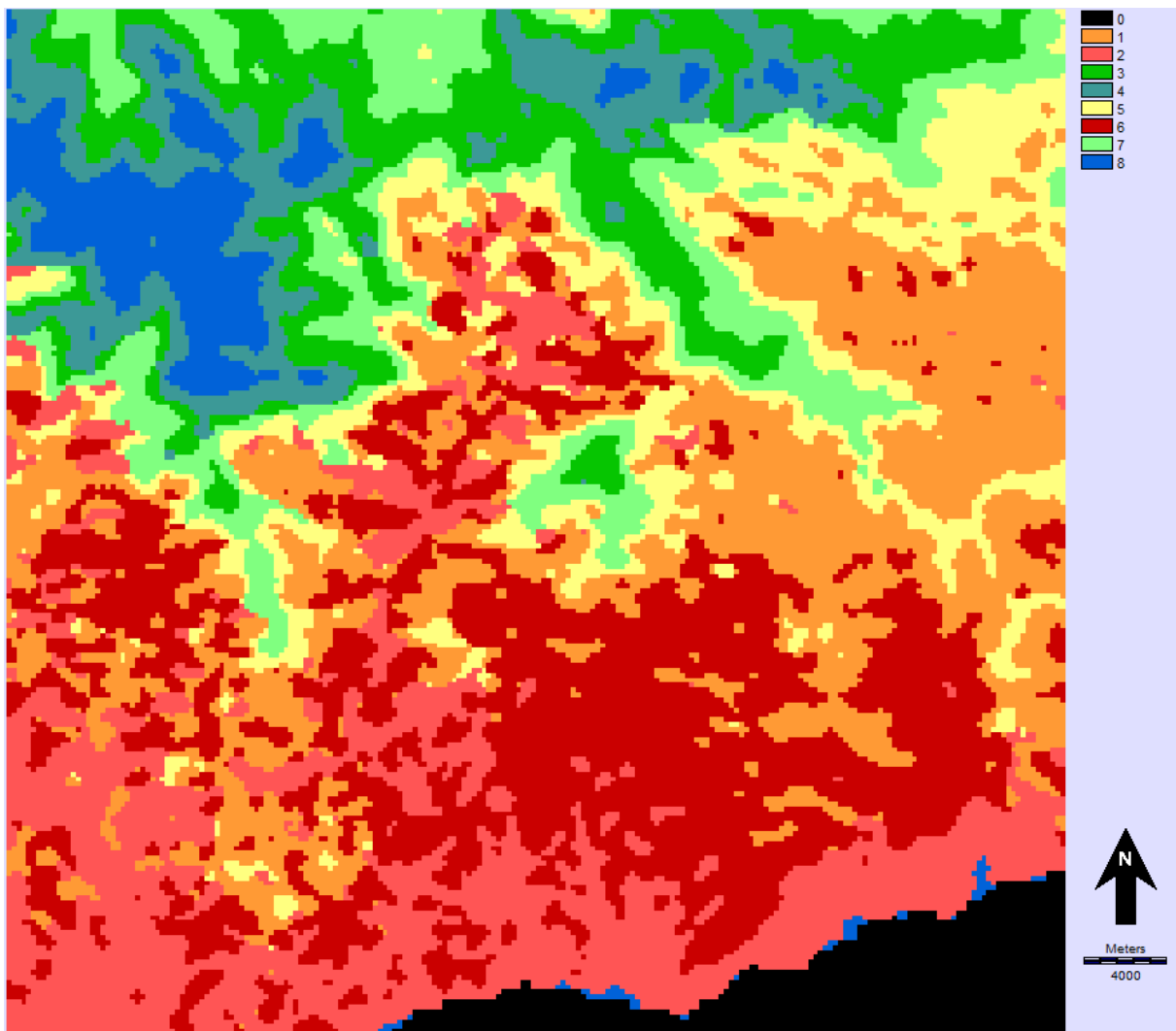


Figure 4 : Carte des classes phénologiques de la Roya et de ses environs

On distingue figure 5 deux types de courbes très différents. Les deux profils méditerranéens correspondant aux secteurs de basse altitude, présentent une végétation toujours verte avec des plantes en activité toute l'année. Les autres courbes connaissent une courbe en cloche centrée autour de l'été ; il s'agit de la végétation qui se met en dormance en hiver. Il y a une gradation des courbes entre les deux. Ainsi, le profil sub-méditerranéen (classe 1 en orange) présente des valeurs de NDVI très élevées, mais montre aussi une différence significative entre l'été et l'hiver. Les classes 3, 5 et 7 des moyennes montagnes supra-méditerranéennes présentent des valeurs tout aussi importantes en été que les classes méditerranéennes mais les valeurs sont bien moindres en hiver. Ces 3 classes montrent des valeurs de NDVI en hiver de plus en plus faibles plus faibles et une saison de plus en plus courte quand on les regarde depuis celles présente au basses altitudes (classe 5) vers celle présente plus haut (classe 3). Les deux dernières, les classes subalpin et alpin, n'ont pas d'activité chlorophyllienne en hiver. La classe de l'alpin a une activité en été plus courte et plus modeste encore. La classe du subalpin présente une saison d'activité courte, aux valeurs de NDVI bien plus modestes que les autres profils.

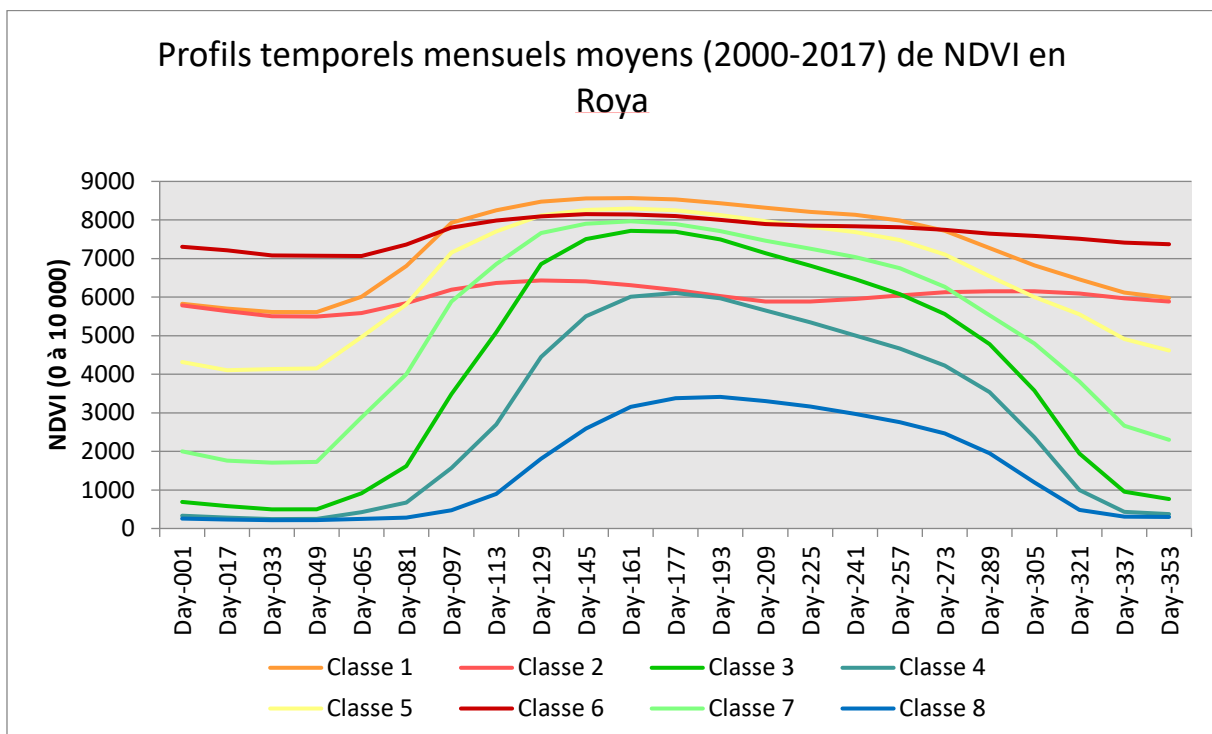


Figure 5 : Profils temporels moyens (2000-18) des classes phénologiques

La limite de la phénologie méditerranéenne sempervirente se trouverait ainsi vers 10°C de moyenne annuelle. Au-delà de cette température, on trouve les deux classes (2 et 6) de végétation strictement méditerranéennes d'un point de vue phénologique. Or, l'analyse des données climatique ne permet pas d'expliquer la distinction entre ces deux classes. La figure 7 montre la proportion des différents types d'occupation du sol dans ces deux classes. Si la distinction n'est pas bioclimatique, il faut en effet faire appel à la dimension physionomique de la végétation. On voit que la classe 2 aux valeurs de NDVI relativement modestes est composé en majeure partie de végétations basses et/ou ouvertes. La classe 6 aux valeurs de NDVI plus fortes, est composée en très large majorité par la forêt fermée.

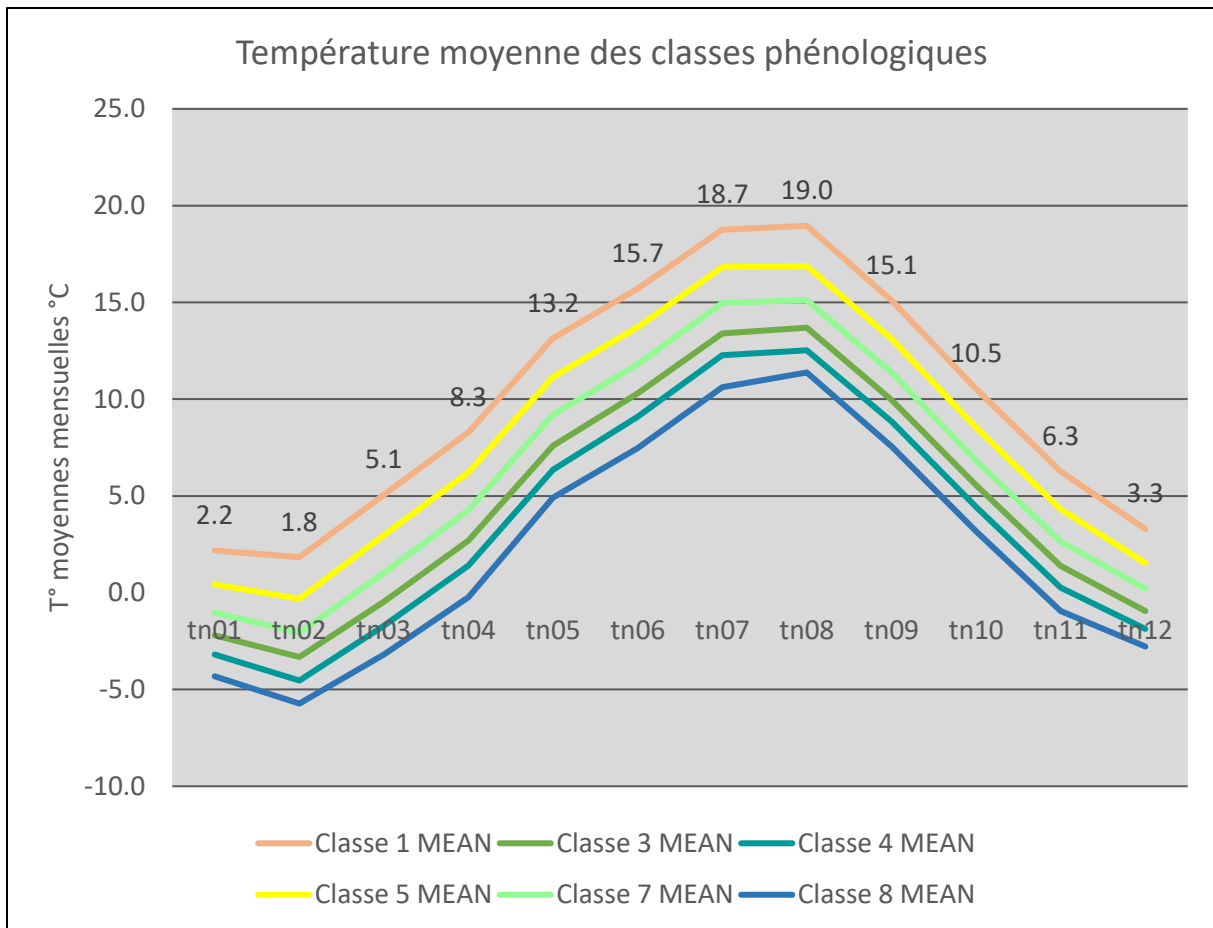


Figure 6 : Températures moyennes mensuelles des classes phénologiques

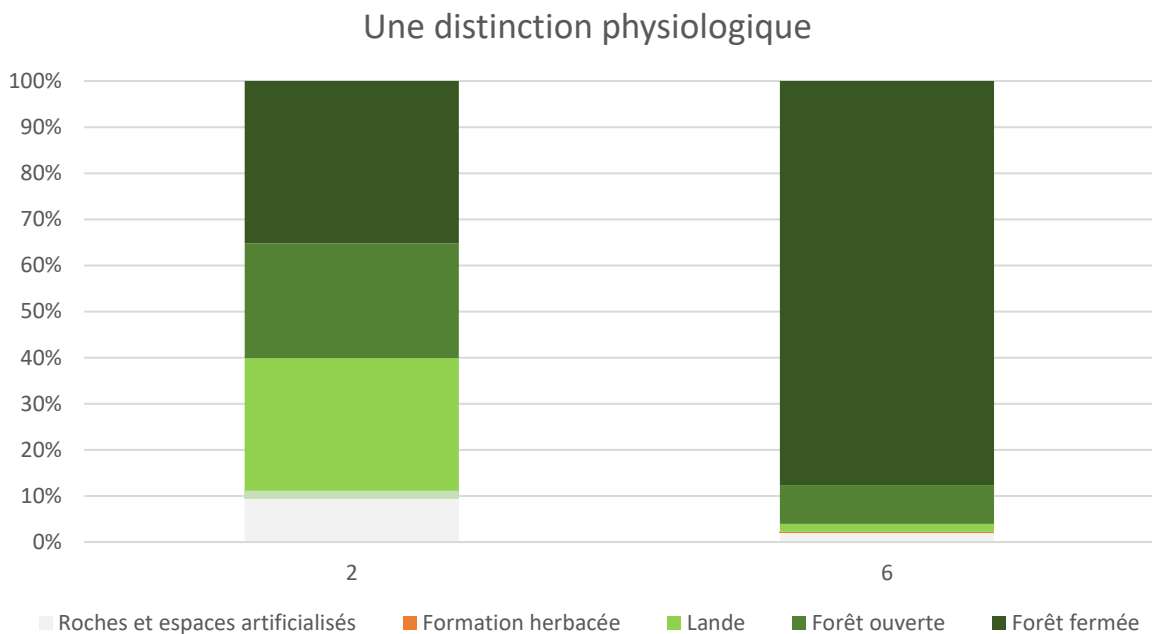


Figure 7 : distribution des types d'occupation du sol dans les 2 classes phénologiques méditerranéennes.

Ensuite, pour détecter les changements, la corrélation de ‘Mann–Kendall’ ou le ‘*tau* de Kendall’ (San Emeterio *et al.*, 2015) est un test assez régulièrement utilisé. Il permet de détecter des tendances. La valeur de la corrélation présente un signe positif ou négatif selon que la tendance est à la hausse ou à la baisse. La corrélation est associée à un test de significativité qui calcule si la tendance est à rejeter en fonction d’un niveau de significativité défini par l’utilisateur. Nous avons appliqué un seuil très exigeant de significativité à 0,01.

Ce test, assez sensible, permet d’identifier des secteurs en changement (activité chlorophyllienne en augmentation ou en diminution sur les 16 ans couverts par la période étudiée). Il est possible ensuite, pour les secteurs en changement de regarder en quoi le profil annuel des 8 premières années (2002-2009) diffère de celui des 8 dernières années (2010-2017). Ce découpage est arbitraire, en deux périodes égales et ne prétend pas correspondre à une rupture environnementale pré-identifiée.

La corrélation de Kendall (Figure 8) révèle ainsi une évolution du NDVI pour la végétation méditerranéenne (toute la bande côtière avec taches jusqu’à Tende) et sans changement significatif pour la végétation montagnarde. En effet, si l’on compare deux sous-périodes 2002-2009 et 2010-2017 (Figure 9), les classes de végétation méditerranéennes montrent une progression du NDVI notable.

Cependant, cette augmentation n’est associée à aucune modification du profil saisonnier. Dans la mesure où elle ne prend ni la forme d’un départ plus précoce, ni d’une fin de saison plus tardive, et dans la mesure où l’on n’aperçoit aucune variation correspondant à la diminution d’une contrainte thermique, ce changement serait donc la mise en évidence de la progression de la biomasse et non un changement lié au climat. La recherche d’une dynamique de remontée de la sempervirence en altitude ou d’allongement de la saison en montagnes n’a pas abouti.

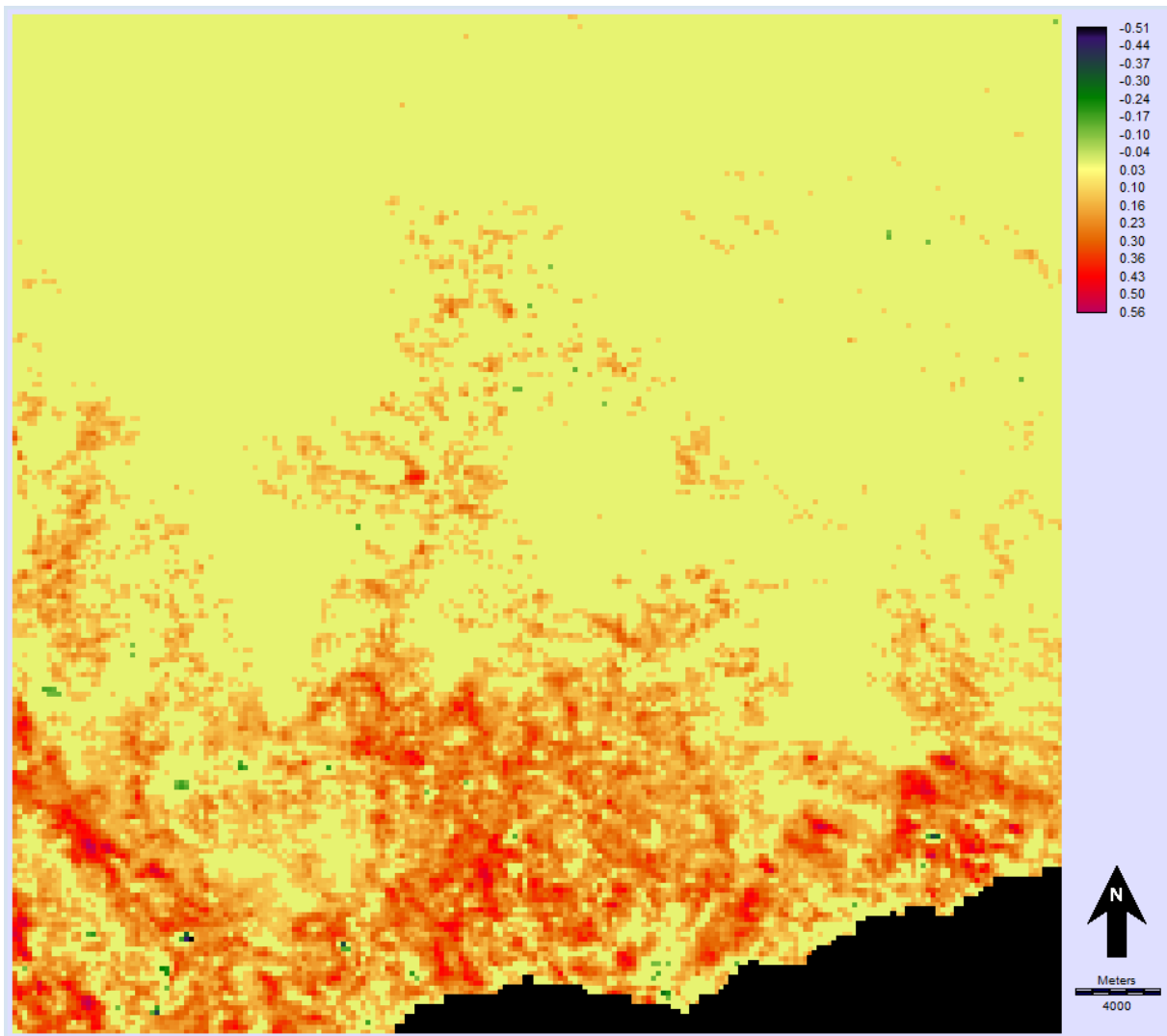


Figure 8 : tendances observées dans les valeurs du NDVI entre 2000 et 2018

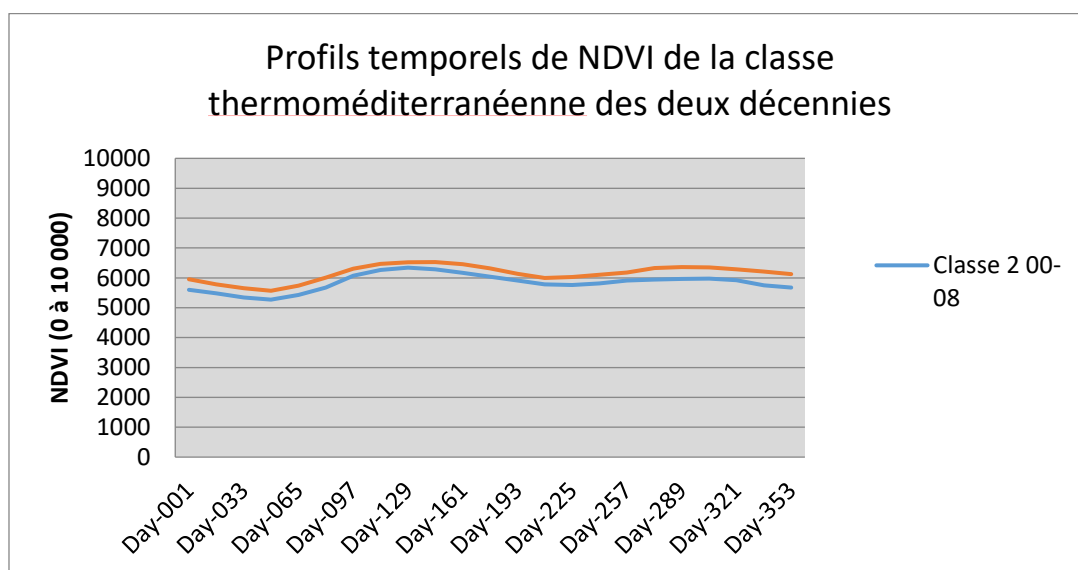


Figure 9 : Profils temporels de NDVI de la classe thermoméditerranéenne des deux décennies

La structure spatiale des types de phénologie présente trois modalités de variation : le premier est la sempervirence qui s'arrête en dessous du seuil de 10°C de température moyenne annuelle. La deuxième modalité est la distinction par cette méthode des forêts et garrigues et de la progression des premières sur les secondes. Enfin, avec une température plus basse que 10°C, la végétation se met en dormance (partiellement) en hiver. On observe une ordination de la longueur et de l'importance de l'activité photosynthétique en été le long du gradient d'altitude.

Si l'on observe les variations dans le temps, la seule tendance qui apparaît est une augmentation de l'activité photosynthétique dans le bioclimat méditerranéen mais pas de remontée du méditerranéen en altitude. Il s'agit, dès lors, de replacer cette tendance dans la dynamique du couvert végétal d'échelle décennale, liée aux variations des activités anthropiques, facteur de changement qui semble ici plus important que l'impact du changement climatique. Or, la carte des changements d'occupation du sol montrait déjà l'importance de ces phénomènes d'enfrichement.

5) Etudes des dynamiques du peuplement de certaines espèces

Après la synthèse climatique et les observations du couvert végétal d'ensemble par le transect ou la télédétection, il est maintenant nécessaire de passer à une approche espèce par espèce. La Vallée de la Roya comprend un trop grand nombre d'espèces pour réaliser des études de détail sur chacune d'entre elles. Nous avons sélectionné 25 espèces qui constituent un échantillon de la biodiversité végétale dans le sens où ces 25 espèces sont affiliées à différents climats, sont favorisées par certaines roches, appartiennent à différents types bionomiques (Arbres, arbustes, herbes) et sont plus ou moins fréquentes.

Ces espèces sont :

- *Atractylis cancellata* (AtCa)
- *Aphyllantes monspeliensis* (ApMo)
- *Argyrolobium zanonii* (ArZa)
- *Arctostaphylos uva ursi* (ArUvUr)
- *Abies alba* (AbAl)
- *Acis niceensis* (AcNi)
- *Antennaria dioica* (AnDi)
- *Gentiana verna* (GeVe)
- *Gentiana bavarica* (GeBa)
- *Carlina acanthifolia* (CaAc)
- *Vaccinium uliginosum* (VaUl)
- *Prenanthes purpurea* (PrPu)
- *Sorbus aria* (SoAr)
- *Sorbus aucuparia* (SoAu)
- *Quercus pubescens* (QuPu)
- *Primula marginata* (PrMa)
- *Pinus Cembra* (PiCe)
- *Pinus mugo* subsp. *uncinata* (PiUn)
- *Ostrya carpinifolia* (OsCa)
- *Lilium pomponium* (LiPo)
- *Juniperus oxycedrus* (JuOx)
- *Cytisophyllum sessilifolium* (CySe)
- *Brachypodium retusum* (BrRe)
- *Dryas octopetala* (DrOc)
- *Berardia Lanuginosum* (BrSu)

(Les abréviations entre parenthèses sont employées dans les graphiques)

Dans le cadre d'un programme de 3 ans, il n'est pas possible de réaliser un observatoire de suivi des changements de la végétation. Pour obtenir des informations sur les changements, il est nécessaire de repérer les changements en cours. Or, cela ne peut être réalisé, sur le terrain, que sur les espèces dont on sait estimer l'âge. Cela est possible pour les arbres et les grands arbustes ; c'est-à-dire, au sein de l'échantillon d'espèce ici étudié :

- *Abies alba*
- *Sorbus aria*
- *Sorbus aucuparia*

- Quercus pubescens
- Pinus cembra
- Pinus mugo subsp. uncinata
- Ostrya carpinifolia
- Juniperus oxycedrus
- Cytisophyllum sessilifolium

D'août à octobre 2018, ont été réalisés 82 relevés de la dynamique de végétation pour ces 9 espèces. La méthode d'échantillonnage spatial a été construite pour optimiser les chances d'observer ces espèces qui sont, pour certaines, rares. Pour cela, nous avons réalisé une sélection des sites des bases de données du conservatoire botanique méditerranéen (SILENE) de sorte à obtenir des sites où plusieurs de ces espèces avaient été observées.

Sur chaque site, une placette de 5 mètres sur 20 a été dessinée à l'aide d'un décamètre et la totalité des individus de ces espèces ont été décrits de sorte à en estimer l'âge et l'état de santé avec les descripteurs suivants :

- Hauteur,
- Largeur du tronc,
- Largeur du houppier pour les arbustes au tronc toujours fin,
- Tronc unique ou rejets de souche,
- Observations de marques de maladie ou de sénescence.

6) Modélisation de l'impact du changement climatique sur la distribution des espèces dans l'espace de la Roya.

a. Modélisation de la viabilité des espèces

- **Données**

La modélisation de la viabilité s'appuie sur deux types de données. Les observations mises à disposition des chercheurs sur la base de donnée SILENE FLORE du conservatoire botanique méditerranéen. 128 000 observations sont mobilisées dans cette étude. La répartition par espèce est donnée figure 10.

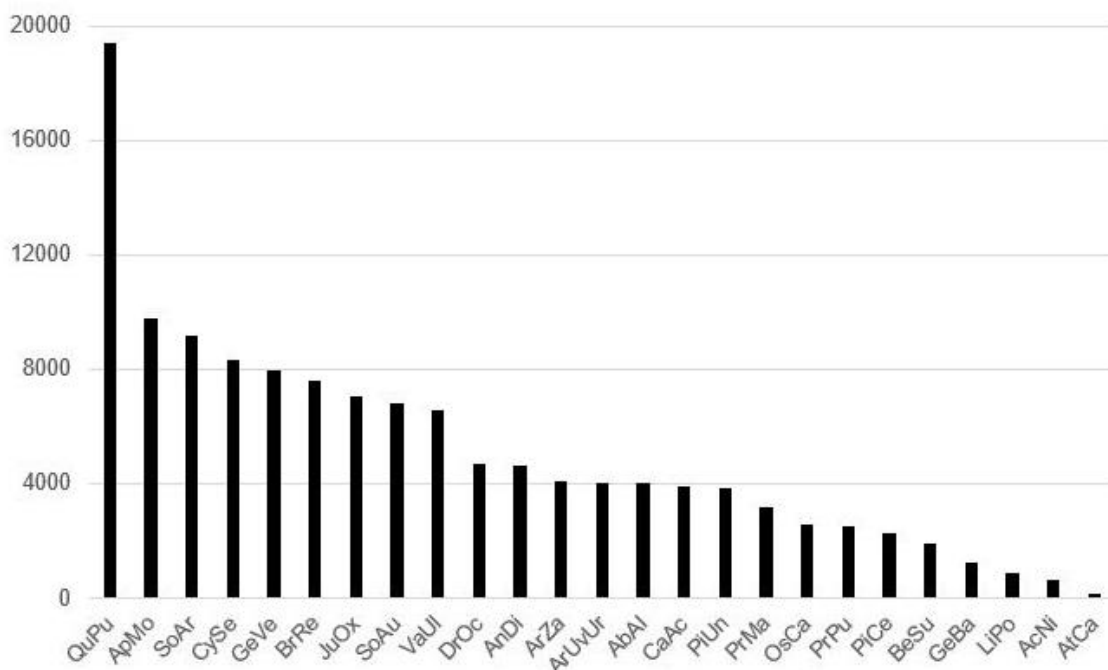


Figure 10 : nombre d’observations floristiques disponibles pour l’étude.

Le deuxième type de données est un ensemble de cartes des principaux facteurs climatiques. Celles-ci sont nombreuses et la présentation des différentes méthodes de cartographie n’a pas lieu d’être ici données en intégralité. Les plus importantes sont les cartes climatiques puisque le travail s’appuie sur des cartes climatiques actuelles (1976-2005) et futures. La méthode employée issue de Martin et al., 2013, est largement détaillée dans (Mammola *et al.*, 2019).

Il est ici considéré que deux descripteurs écologiques vont connaître des changements d’ici à 2100 : le climat et l’occupation du sol. Le climat futur est l’objet de modélisation par les modèles de physique de l’atmosphère. Ceux-ci sont présentés sous forme de scénarios (IPCC, 2014). Trois de ces scénarios sont ici employés (2.5, 4.5 et 8.5). Trois horizons (2021-2050, et 2041-2070 et 2071-2100) sont l’objet d’une cartographie.

L’occupation du sol est un facteur important pour l’écologie des plantes (forêt ou milieu ouverts). Or, il n’est pas raisonnable de supposer que l’occupation du sol ne va pas changer d’ici à 2100. Nous avons donc modélisé les changements d’occupation du sol selon la poursuite des tendances observées sur les 30 dernières années.

- Méthodes

La viabilité est issue d’une modélisation par un calcul de probabilité issu du recensement des observations floristiques dans les différents états des descripteurs (exemple les classes de températures ou les types de roches). Il en est déduit une probabilité de viabilité (que l’espèce puisse vivre) pour chaque pixel (chaque lieu de la Roya) en fonction de la valeur de chaque descripteur qui y est observé. Comme les espèces sont observées dans les lieux où cette probabilité est faible (exemple : les limites de leur aire de répartition), nous avons placé un seuil très faible produisant des cartes des lieux viables (très peu probablement à très probablement)

et des lieux non viables. Cette même méthode a été appliquée pour les cartes écologiques actuelles et futures.

- Résultats

Pour alléger la lecture, seules les modélisations selon le scénario RCP 8.5 qui est celui qui correspond le mieux à la tendance des dernières années d'un point de vue des émissions de gaz à effet de serre. Les modélisations selon les scénarios 2.5 et 4.5 sont mis en annexe.

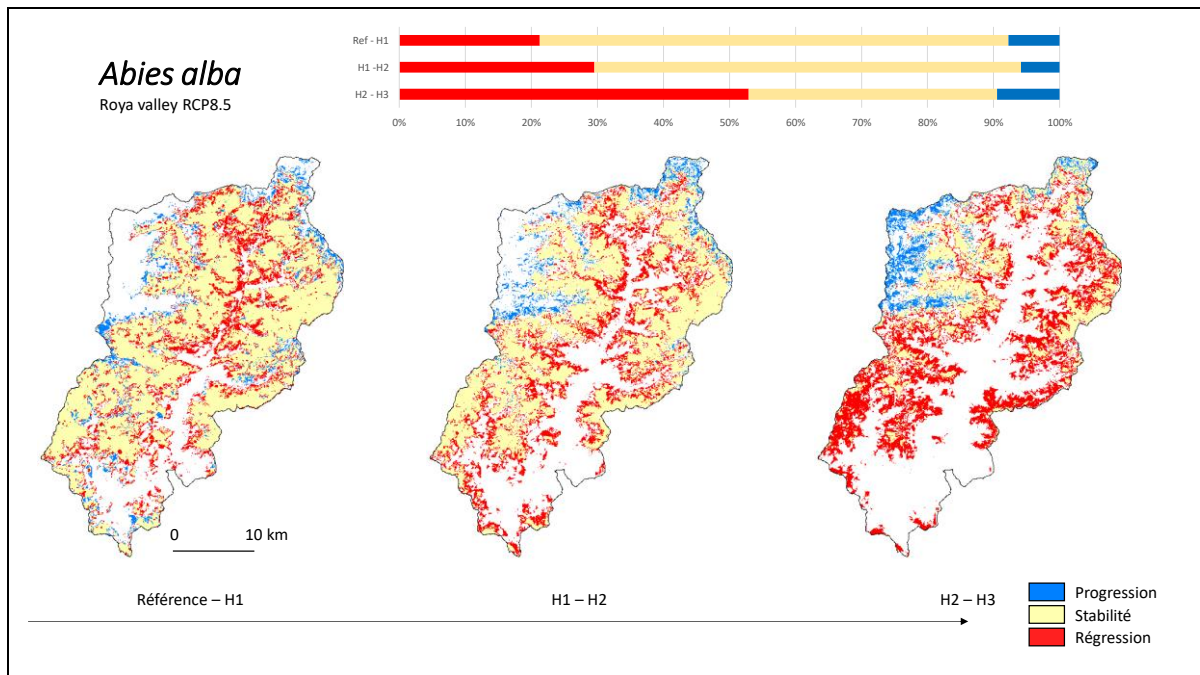


Figure 11 : Modélisation de la viabilité future du Sapin

Figure 11, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Sapin selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent (1976-2005) et l'horizon 1 (2021-2050) le Sapin serait, selon le modèle, en train de connaître une perte de viabilité dans les zones les plus basses de la vallée de la Roya et de ses confluentes, en fond de vallée notamment. En même temps, cette espèce pourrait connaître un gain de viabilité dans des milieux de haute altitude où dans le passé récent, le climat était trop froid. En termes de superficies, les pertes (20 %) sont supérieures aux gains (10 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2 (2041-2070), ces tendances se poursuivent et s'amplifient selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses mais cette fois sur les versants de la vallée (30 %) et un gain qui se poursuit en haute montagne (5 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3 (2071-2100) c'est encore un renforcement de cette tendance qui s'observe. La perte de viabilité (50%) s'observe sur la majeure partie des collines et moyennes montagnes au sud et sur les versants de la moitié nord. Le gain (10 %) s'observe sur les plus hautes vallées.

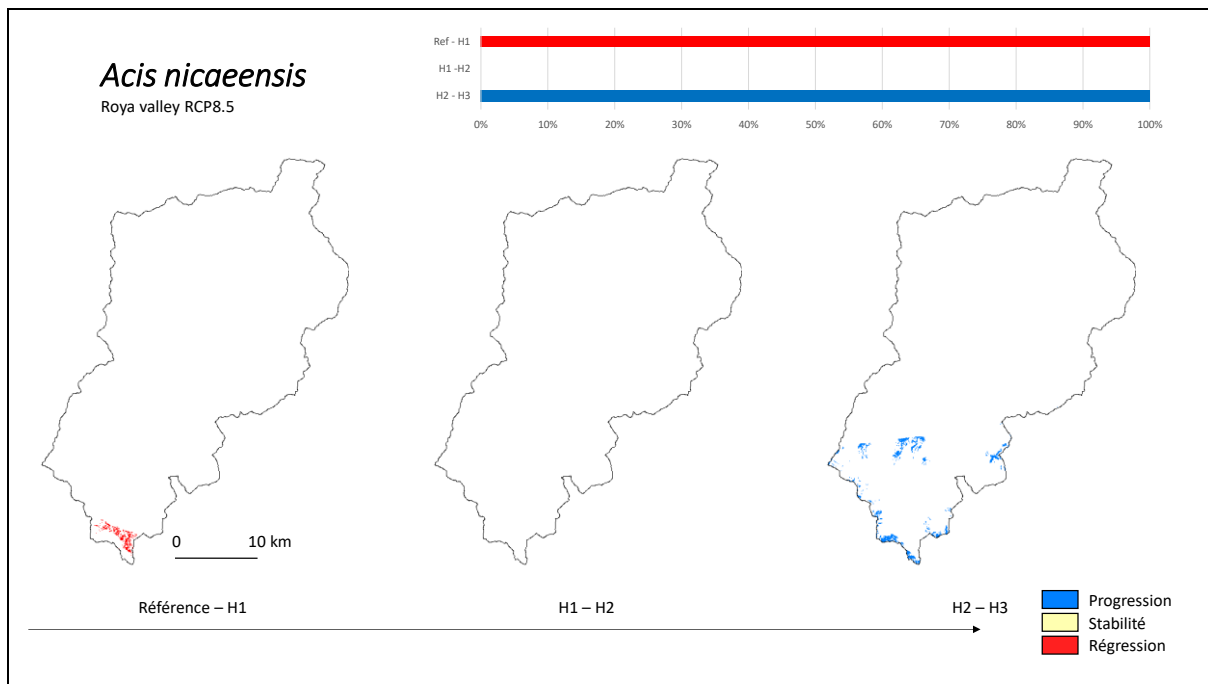


Figure 12 : Modélisation de la viabilité future de la Nivéole de Nice

Figure 12, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Nivéole de Nice selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l’horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité complète de la vallée de la Roya.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3 quelques secteurs pourraient redevenir viables grâce à l’augmentation des précipitations selon ce modèle.

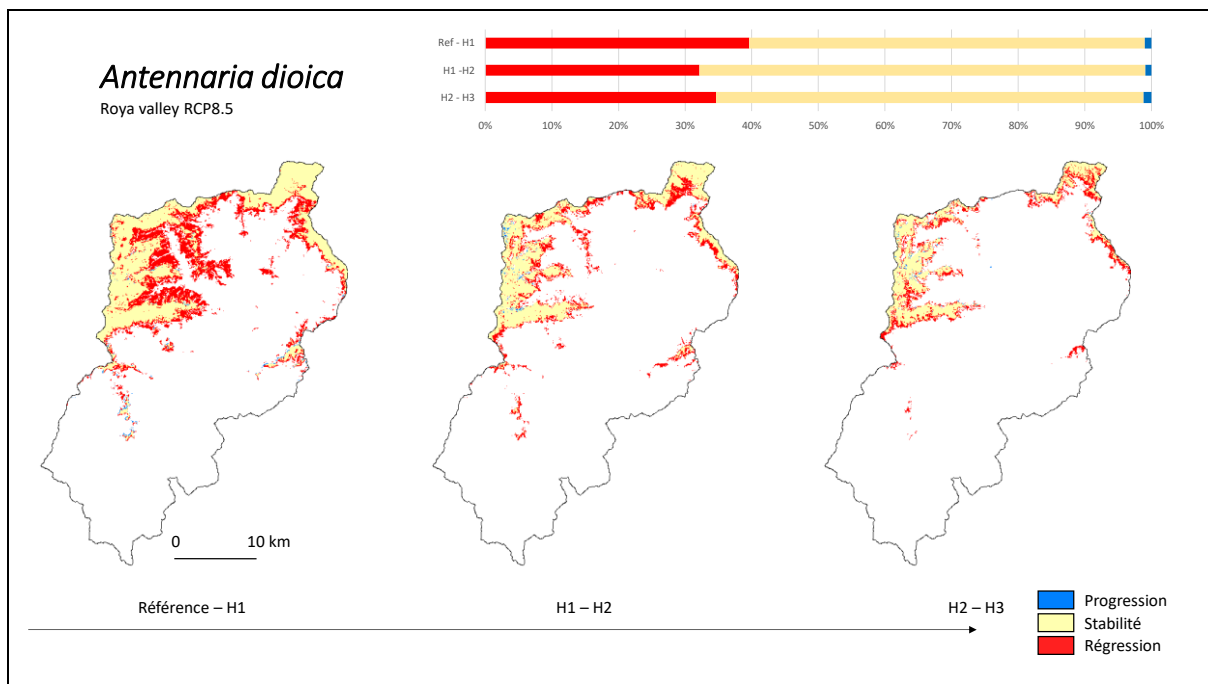


Figure 13 : Modélisation de la viabilité future du Pied de chat

Figure 13, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Pied de chat selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l’horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité dans les versants des vallée hautes, affluents de la Roya (40 %). En même temps, cette espèce pourrait connaître un léger gain de viabilité dans des milieux de haute altitude où dans le passé récent, le climat était trop froid (5 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent avec un ralentissement selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (30 %) et un gain minime qui se poursuit en haute montagne (5 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c’est encore cette tendance se poursuit. La perte de viabilité (35 %) s’observe aux marges de l’aire de viabilité. Le gain (5 %) s’observe sur quelques hauts sommets.

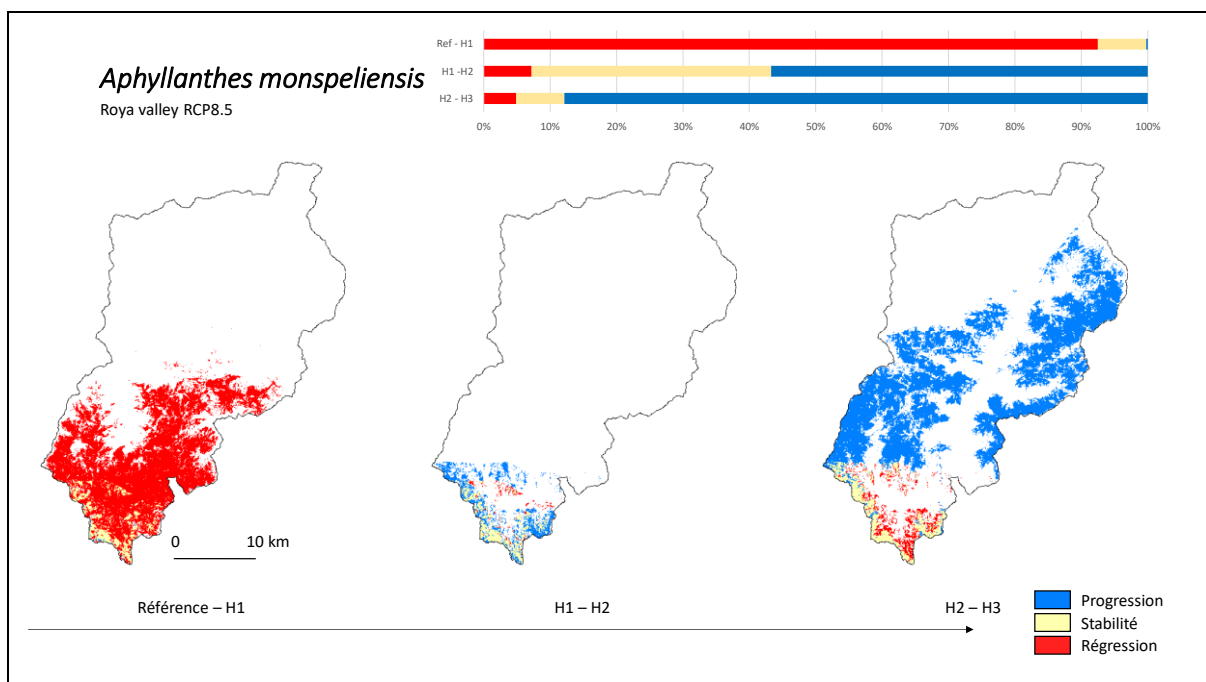


Figure 14 : Modélisation de la viabilité future de l’Aphyllante

Figure 14, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de l’Aphyllante de Montpellier selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l’horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité majeure de la partie nord de l’aire (90 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances s’inverseraient selon cette modélisation avec une perte de viabilité de 5%, de ce qui restait viable avec un gain de 45 % de ce qui restait vers le nord.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, cette tendance à la reprise se poursuivrait selon cette modélisation mais en s’accélérait fortement. La perte de viabilité (5 %) s’observe au sud. Le gain (90 %) s’observe sur les versants de la moyenne vallée (Sospel à La Brigue).

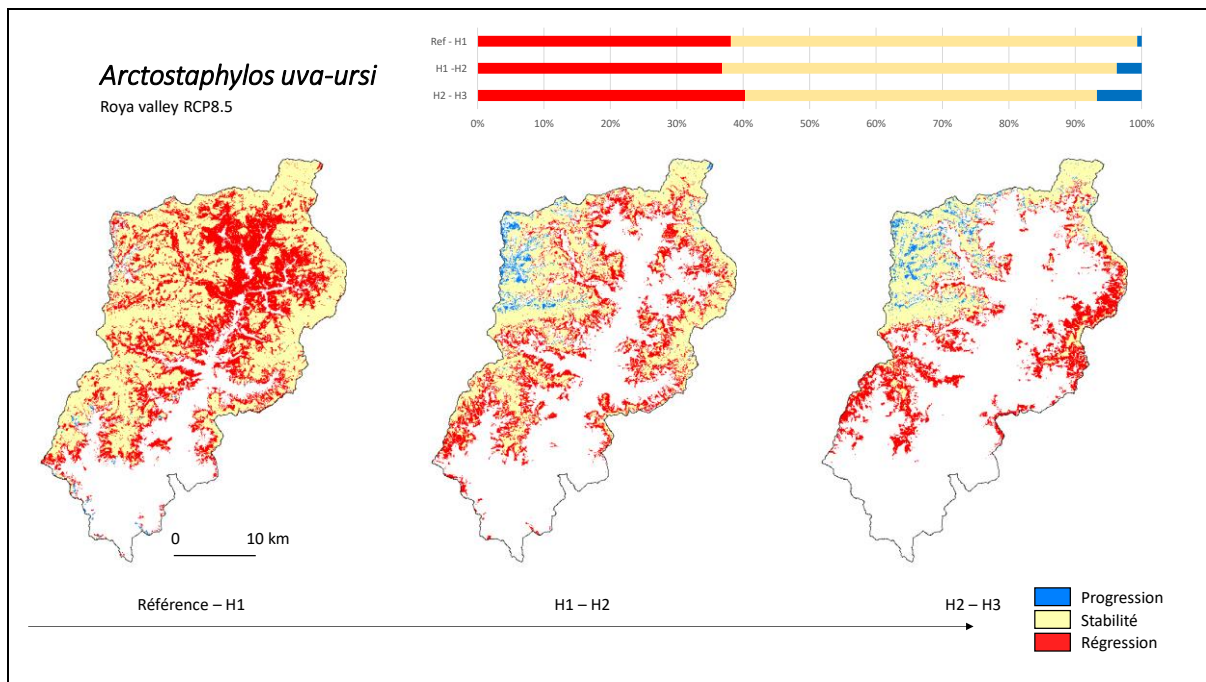


Figure 15 : Modélisation de la viabilité future du Raisin d'ours

Figure 15, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Raisin d'ours selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité dans les versants de l'amont de la Roya et ses affluents de la Roya (40 %). En même temps, cette espèce pourrait connaître un léger gain de viabilité dans des milieux de haute altitude où dans le passé récent, le climat était trop froid (5 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent avec un ralentissement selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (35 %) et un gain minime qui se poursuit en haute montagne (5 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se poursuit. La perte de viabilité (35 %) s'observe aux marges de l'aire de viabilité au sud et à l'est notamment. Le gain (5 %) s'observe sur quelques hauts sommets.

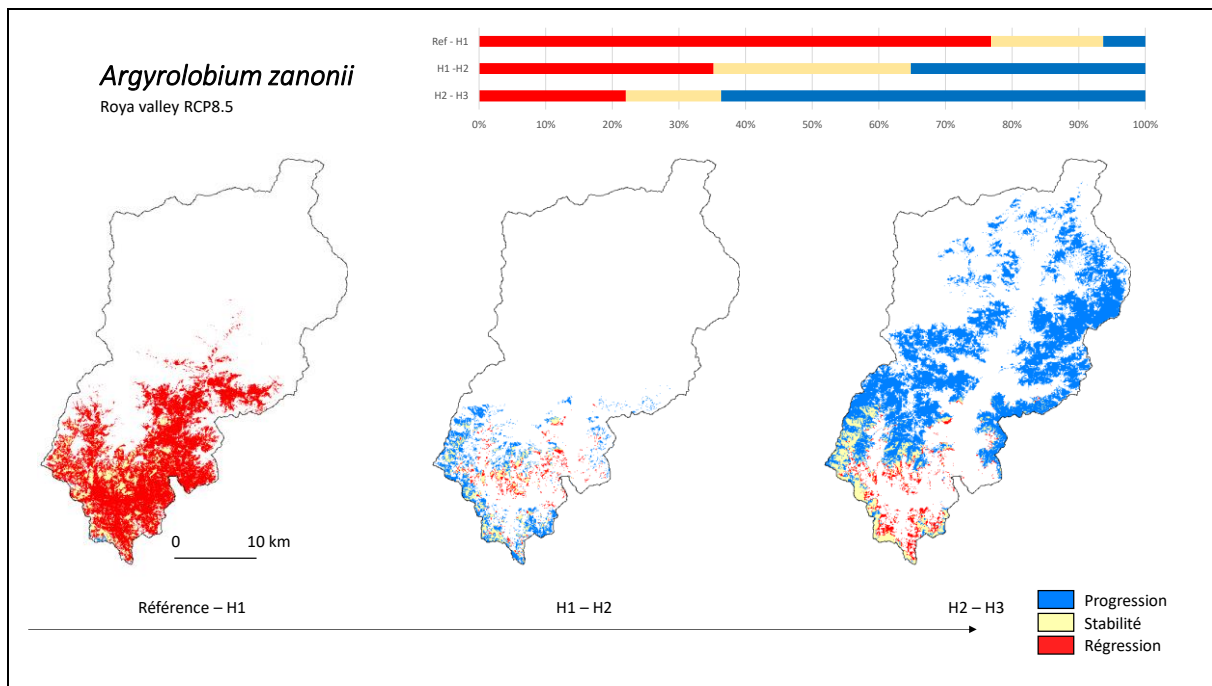


Figure 16 : Modélisation de la viabilité future de l'Argyrolobe

Figure 16, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de l'Argyrolobe de Zaroni selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité majeure de la partie nord de l'aire (75 %). Avec un gain de 5 % au sud.

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ce recul s'inverserait selon cette modélisation avec une perte de viabilité de 35%, de ce qui restait viable avec un gain de 35 % de ce qui restait vers le nord.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, la tendance à la reprise se renforce selon cette modélisation. La perte de viabilité (20 %) s'observe au sud. Le gain (65 %) s'observe sur les versants de la moyenne vallée (Sospel à La Brigue).

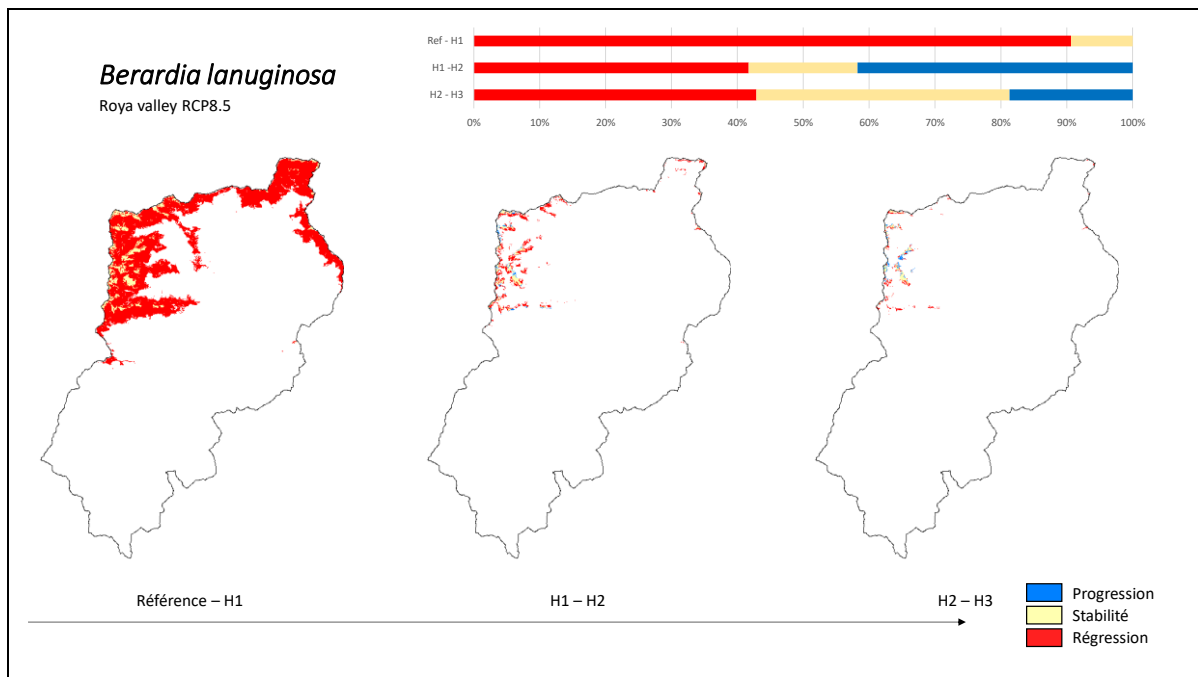


Figure 17 : Modélisation de la viabilité future de la Berardie laineuse

Figure 17, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Berardie laineuse selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l’horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité majeure dans les versants des vallées hautes, affluents de la Roya (90 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent avec un ralentissement selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (40 %) et un gain en haute montagne (40 %) de ce qui reste.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c’est encore cette tendance se poursuit. La perte de viabilité (40 %) est cependant plus importante que le gain (20 %).

Figure 18, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Brachypode rameux selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l’horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité complète de la vallée de la Roya.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3 d’importants secteurs pourraient redevenir viables grâce à l’augmentation des précipitations selon ce modèle.

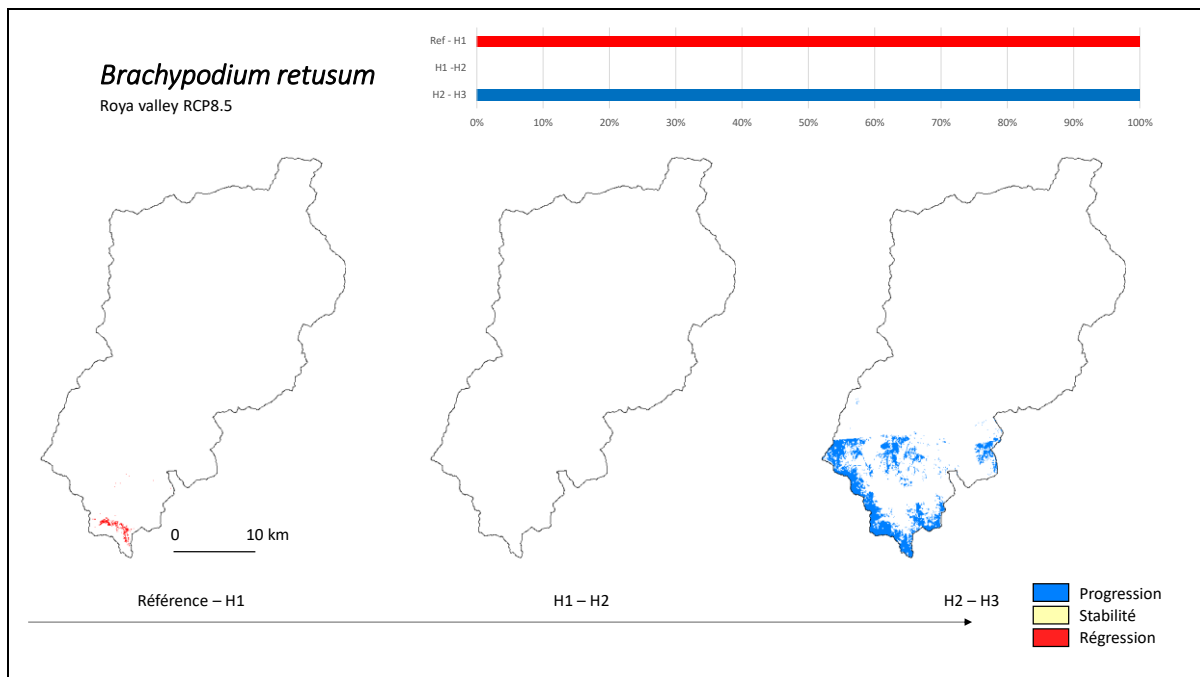


Figure 18 : Modélisation de la viabilité future du Brachypode rameux

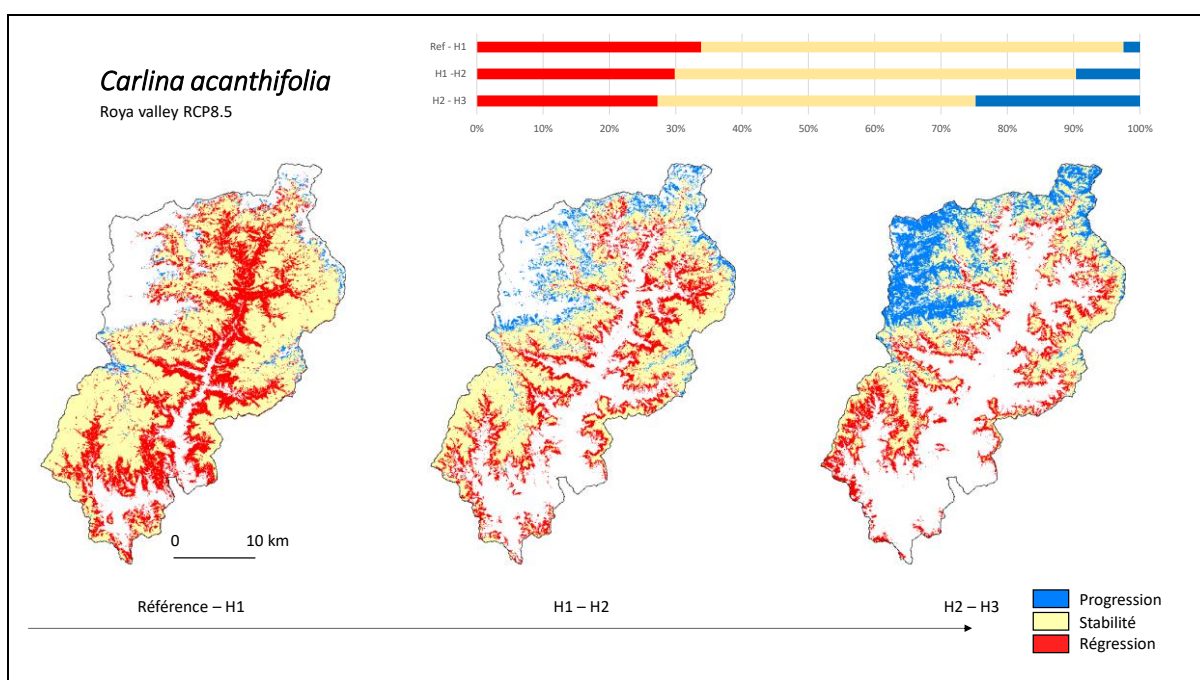


Figure 19 : Modélisation de la viabilité future de la Carline à feuille d'Acanthe

Figure 19, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Carline à feuille d'Acanthe selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité dans les bas versants de la Roya et de ses affluents (35 %). En même temps, cette espèce pourrait connaître un très léger gain de viabilité dans des milieux de haute altitude où dans le passé récent, le climat était trop froid (5 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent avec un ralentissement selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes

basses de ce qui restait viable (30 %) et un gain minime qui se renforce en haute montagne (10 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se modifie. En effet la perte de viabilité (30 %) s'observe encore aux marges de l'aire de viabilité mais le gain (25 %) s'observe sur les hauts massifs.

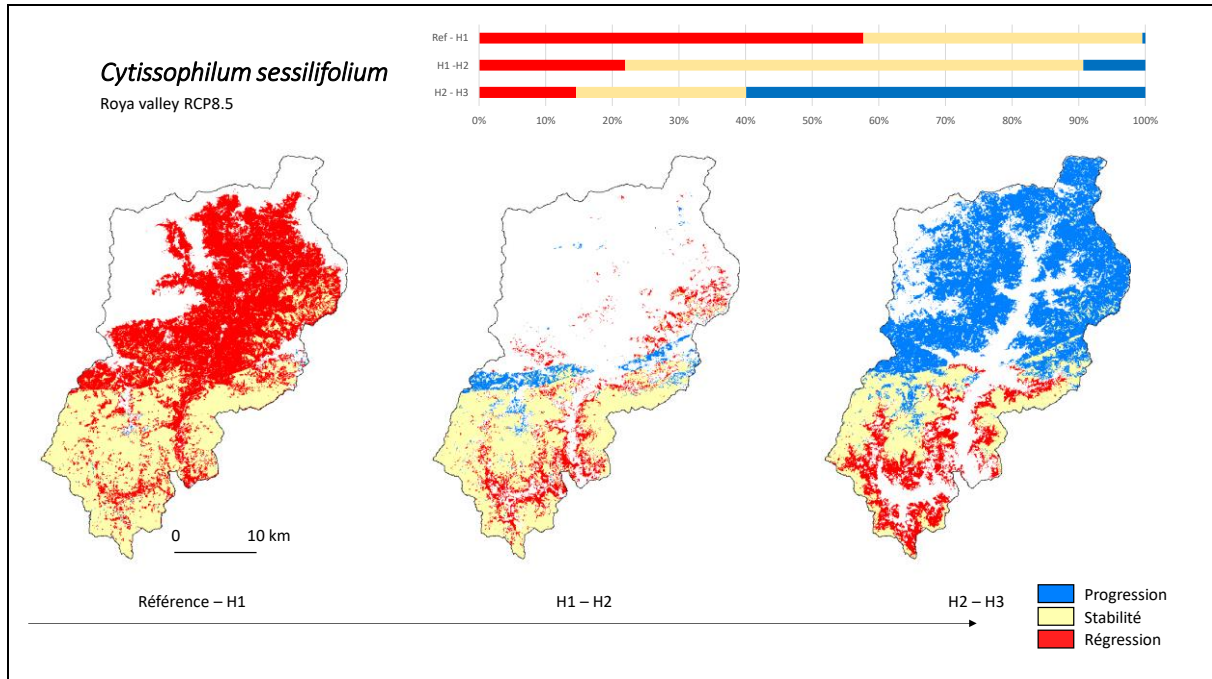


Figure 20 : Modélisation de la viabilité future de la Cytise à feuille sessile

Figure 20, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Cytise à feuilles sessiles selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité importante de la partie nord de l'aire (60 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances s'inverseraient selon cette modélisation avec une perte de viabilité de 5%, de ce qui restait viable avec un gain de 45 % de ce qui restait vers le nord.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, cette tendance à la reprise se poursuivrait selon cette modélisation mais en s'accroissant fortement. La perte de viabilité (5 %) s'observe au sud. Le gain (90 %) s'observe sur les versants de la moyenne vallée (Sospel à La Brigue).

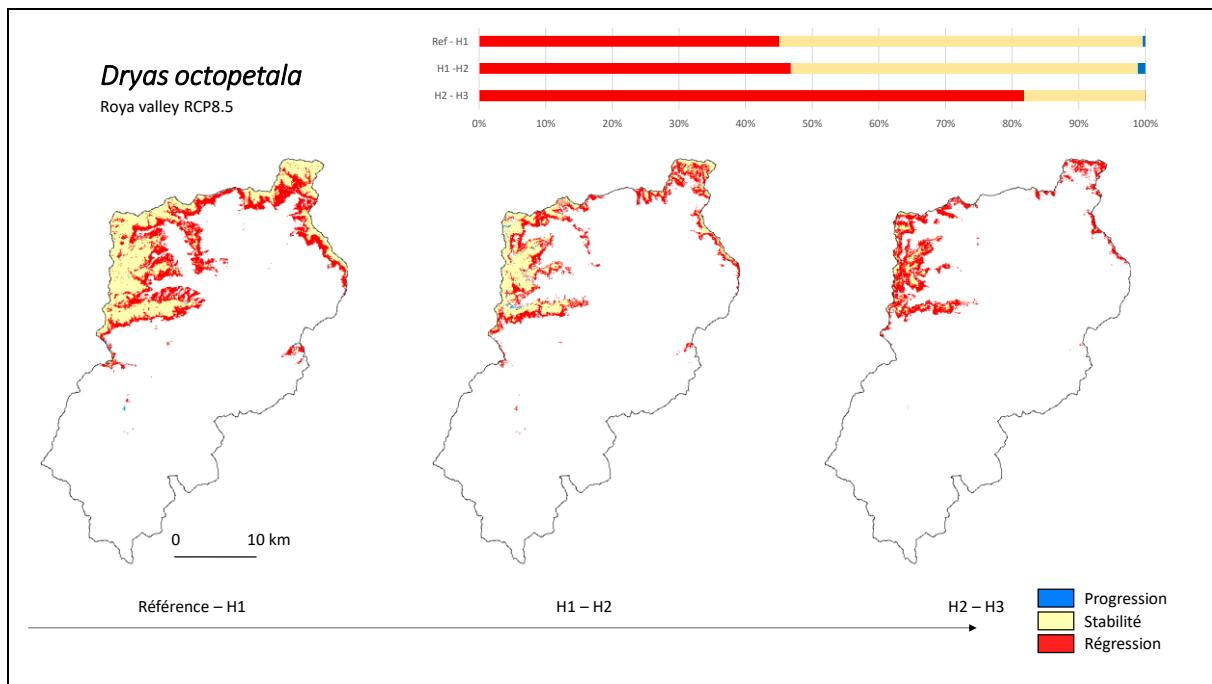


Figure 21 : Modélisation de la viabilité future de la Dryade à huit pétale

Figure 21, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Dryade à huit pétales selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l’horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité dans les versants des vallée hautes, affluents de la Roya (45 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (45 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c’est encore cette tendance se poursuit et s’accélère (80 %).

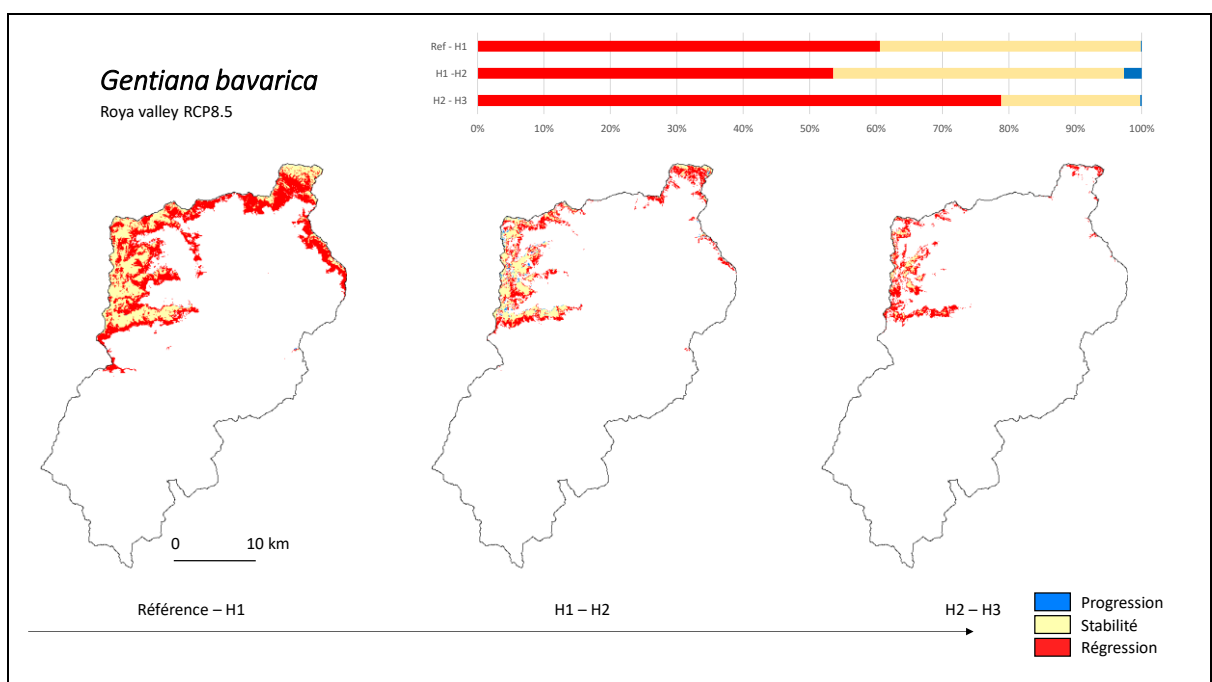


Figure 22 : Modélisation de la viabilité future de la Gentiane de Bavière

Figure 22, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Gentiane de Bavière selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité dans les versants des vallées hautes, affluents de la Roya (60 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (55 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se poursuit et s'accélère (80 %).

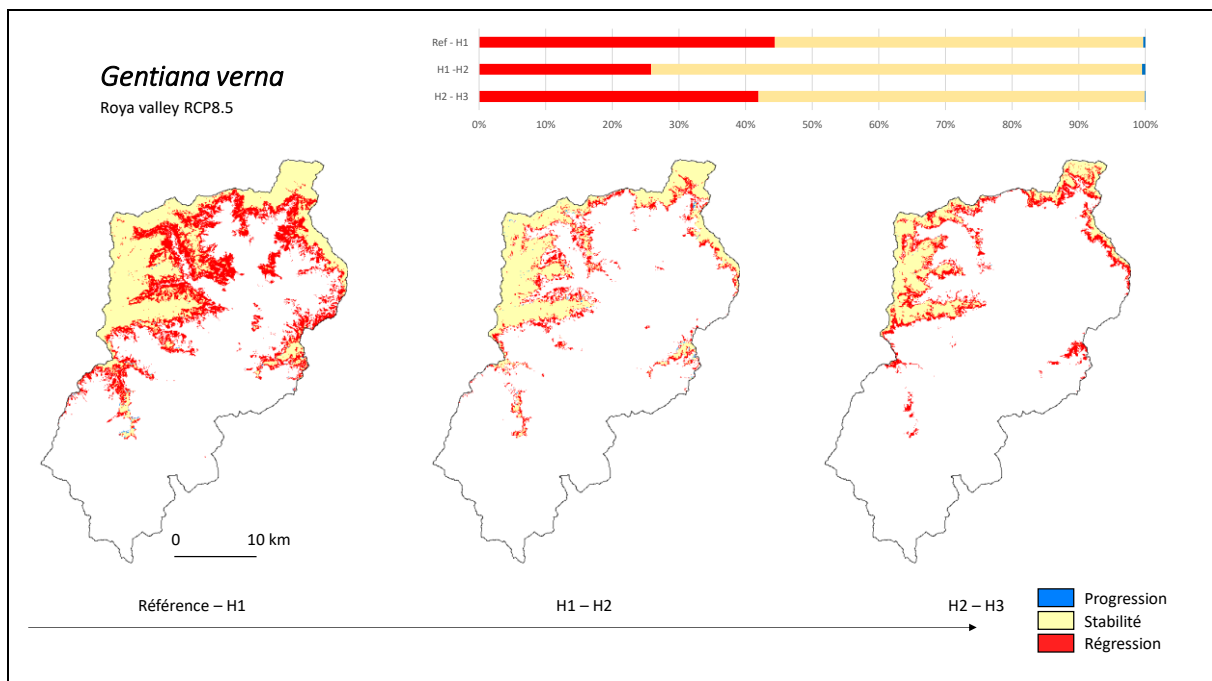


Figure 23 : Modélisation de la viabilité future de la Gentiane printanière

Figure 23, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Gentiane printanière selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité dans les versants des vallées hautes, affluents de la Roya (45 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent avec un léger ralentissement selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (25 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se poursuit et s'accélère de nouveau (40 %).

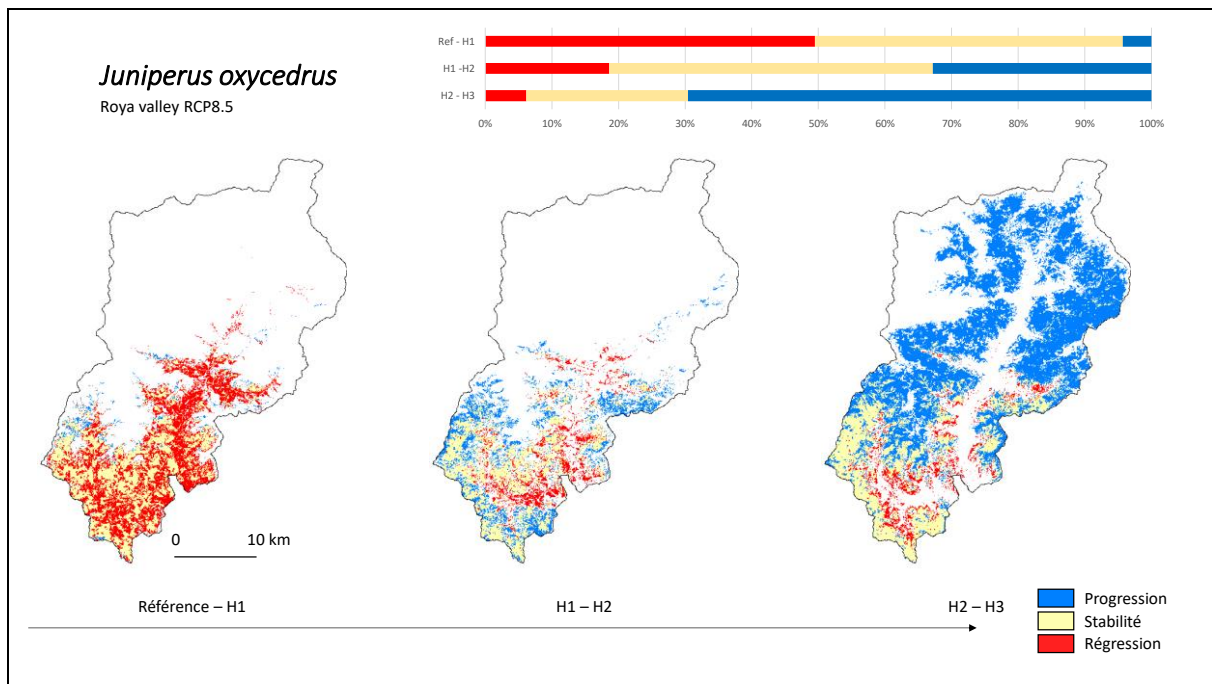


Figure 24 : Modélisation de la viabilité future du Cade

Figure 24, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Cade selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité de la partie basses de l'aire (50 %). Avec un gain de 5 % vers les hauteurs.

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ce recul s'inverserait selon cette modélisation avec une perte de viabilité de 20 %, de ce qui restait viable avec un gain de 35 % de ce qui restait vers le nord.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, la tendance à la reprise se renforce selon cette modélisation. La perte de viabilité (5 %) s'observe au sud. Le gain (65 %) s'observe sur les versants de la vallée.

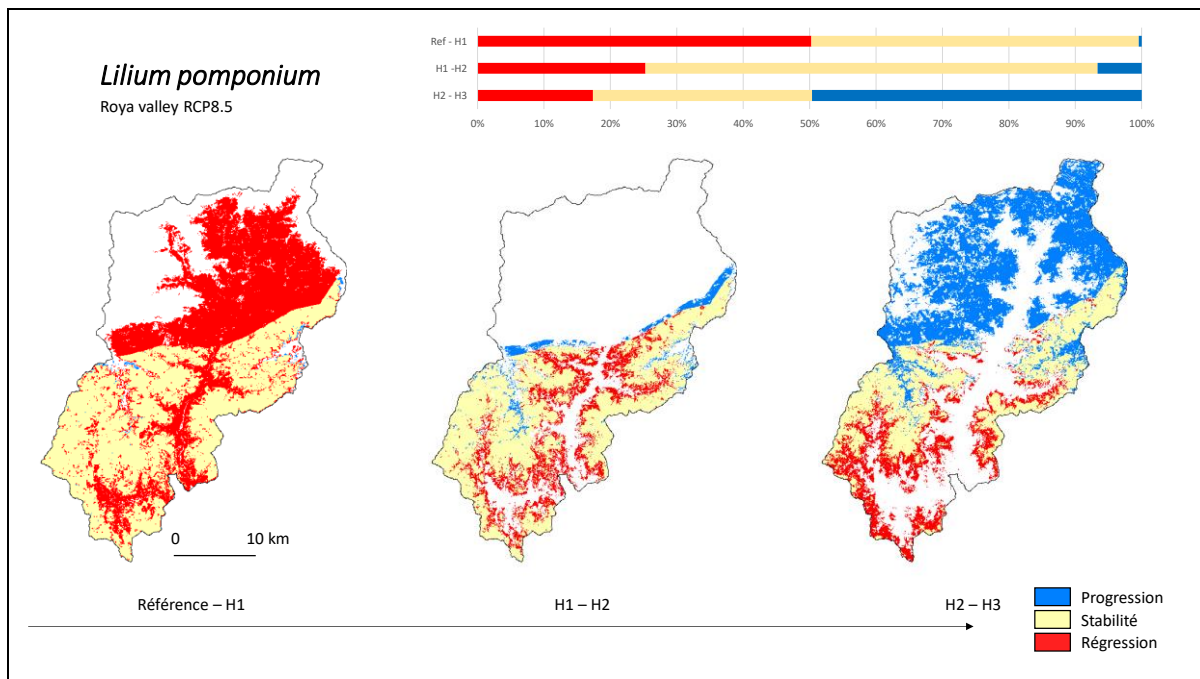


Figure 25 : Modélisation de la viabilité future du Lys de Pomponne

Figure 25, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Cytise à feuilles sessiles selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité importante de la partie nord de l'aire et le fond de la vallée (50 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, selon cette modélisation on observe une perte de viabilité de 25%, de ce qui restait viable toujours dans la partie basse de la vallée avec un gain de 5 % vers le nord.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, cette tendance contrastée se poursuivrait selon cette modélisation mais en s'accroissant fortement pour les gains. La perte de viabilité (20 %) s'observe au sud aux altitudes basses. Le gain (50 %) s'observe sur les versants de la haute vallée.

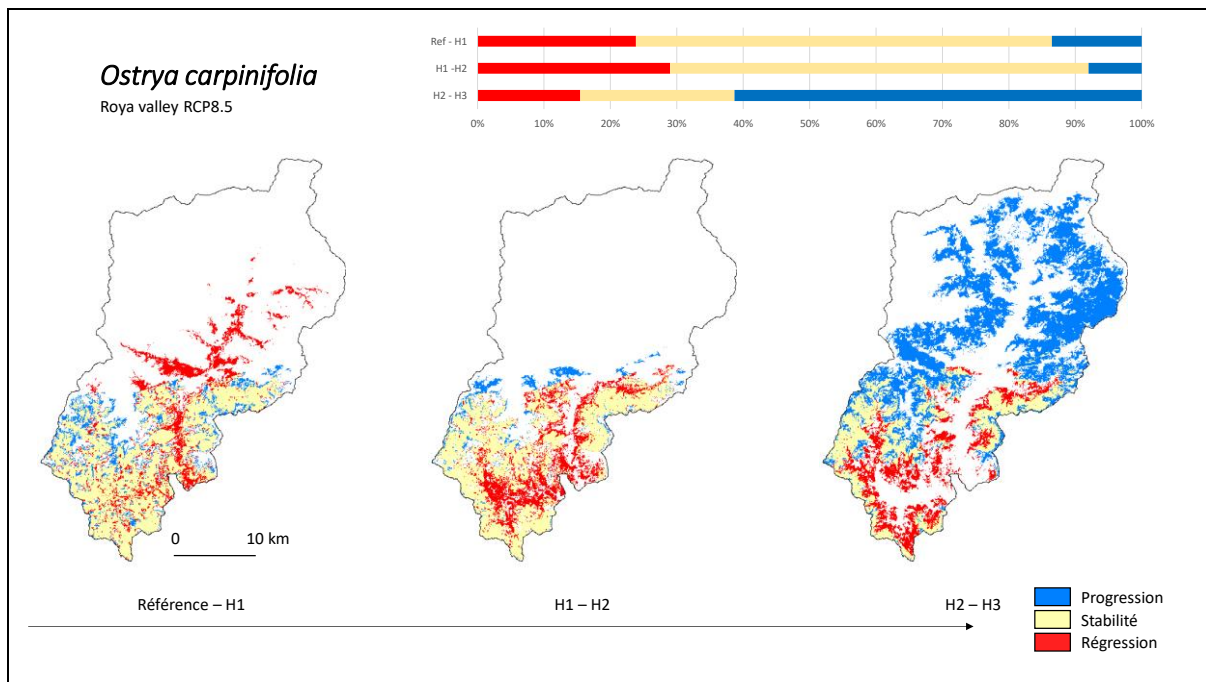


Figure 26 : Modélisation de la viabilité future du Charme-houblon

Figure 26, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Charme houblon selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l’horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité de la partie nord de l’aire et le fond de la vallée (25 %) associée à un gain vers les hauteurs (10 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, selon cette modélisation on observe une perte de viabilité de 30 %, de ce qui restait viable toujours dans la partie basse de la vallée avec un gain de 10 % vers le nord.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, cette tendance contrastée se poursuivrait selon cette modélisation mais en s’accélégrant fortement pour les gains. La perte de viabilité (15 %) s’observe au sud aux altitudes basses. Le gain (60 %) s’observe sur les versants de la haute vallée.

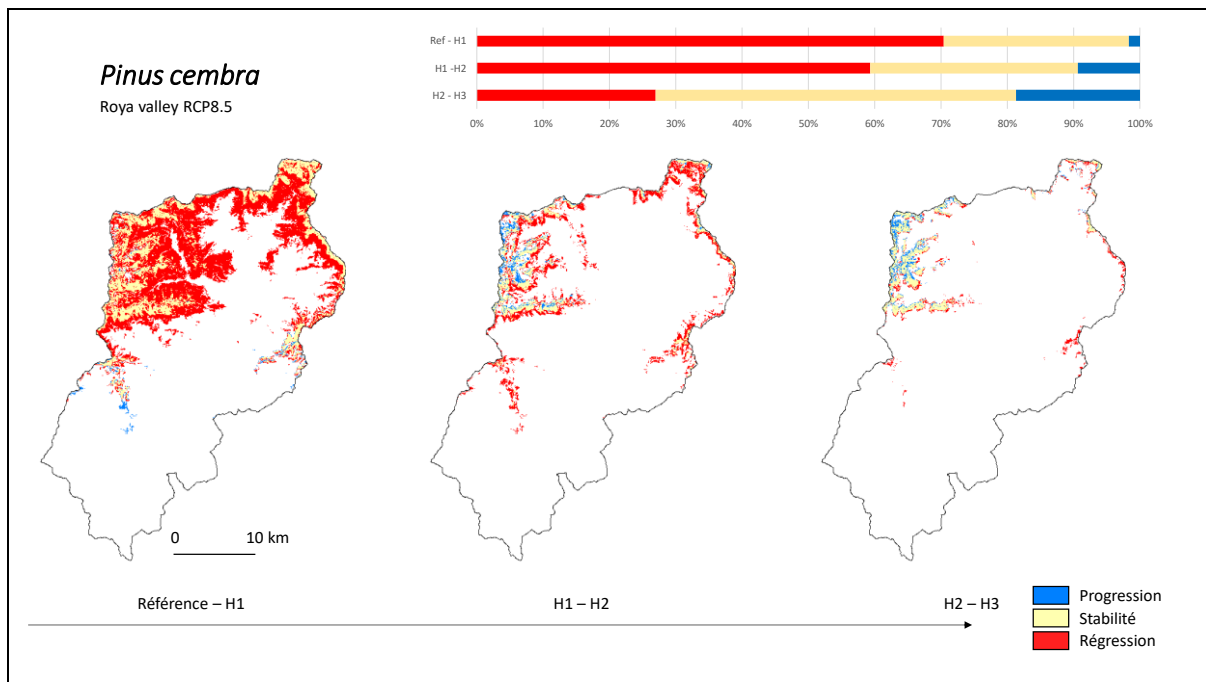


Figure 27 : Modélisation de la viabilité future du Pin cembro

Figure 27, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Pin cembro selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité dans les versants des vallées hautes, affluents de la Roya (70 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (60 %). Cependant, un gain se met en place (10 %) en haute altitude.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se poursuit et s'accélère avec 30 % de pertes de ce qui restait et 20 % de gains, toujours en très haute montagne.

Figure 28, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Pin à crochets selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité dans les versants des vallées hautes, affluents de la Roya (70 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (50 %). Cependant, un gain se met en place (15 %) en haute altitude.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se poursuit avec 45 % de pertes de ce qui restait et 15 % de gains, toujours en très haute montagne.

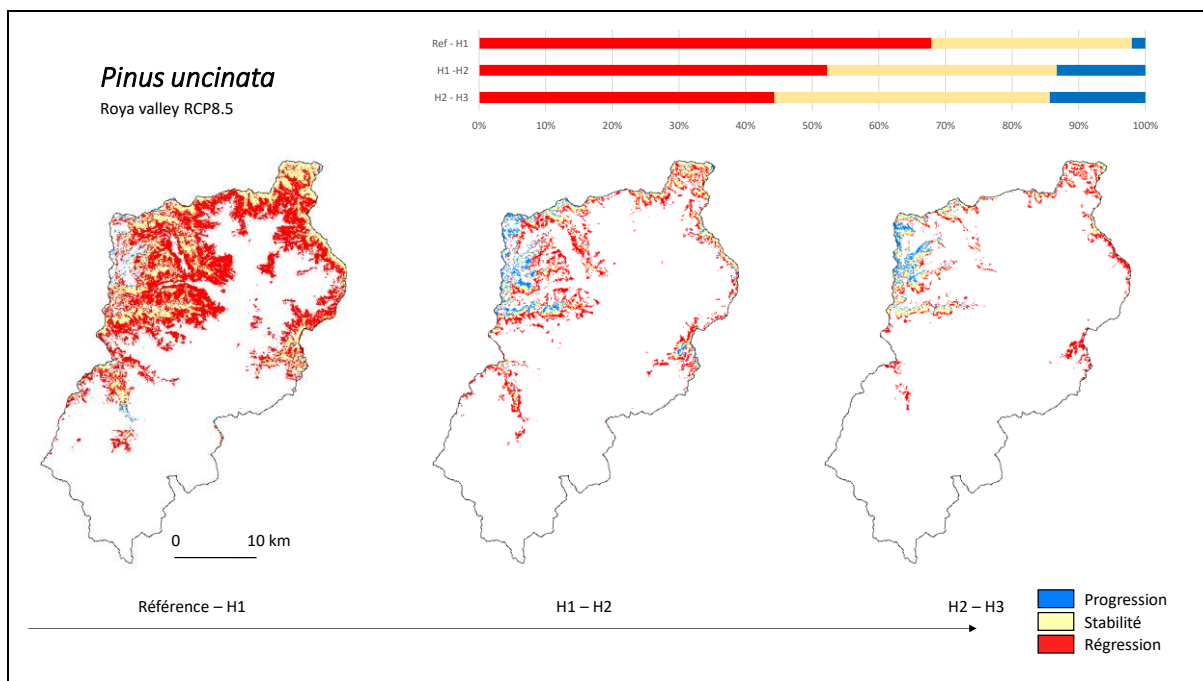


Figure 28 : Modélisation de la viabilité future du Pin à crochet

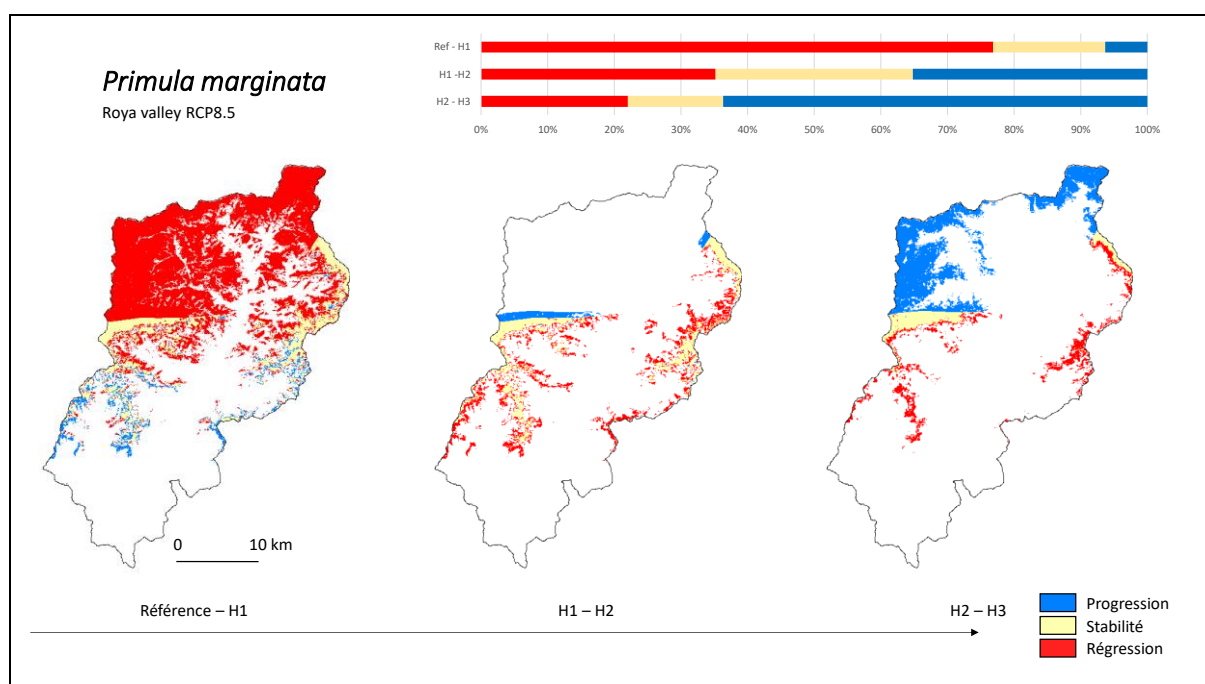


Figure 29 : Modélisation de la viabilité future de la primevère marginée

Figure 29, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Primevère marginée selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité dans le nord de la Roya (75 %) avec un gain sur les sommets les plus méridionaux.

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances s'inversent selon cette modélisation avec une perte de viabilité, dans les altitudes basses de ce qui restait viable (35 %). Cependant, un regain se met en place (35 %) vers le Nord.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance contrastée se poursuit avec 20 % de pertes de ce qui restait au sud et 65 % de gains, en haute montagne.

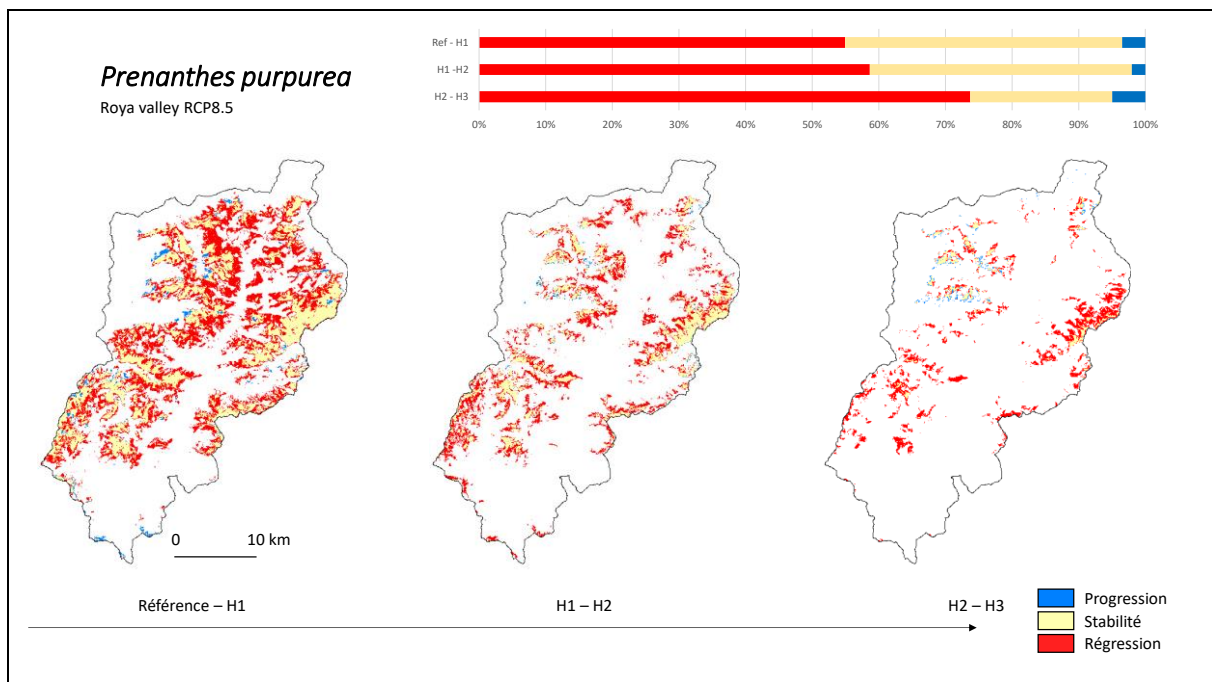


Figure 30 : Modélisation de la viabilité future de la Prenanthe pourpre

Figure 30, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de la Prenanthe pourpre selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité dans les parties basses de sa distribution (55 %) avec 5 % de gains vers les hauteurs.

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (60 %) et un gain qui se tasse.

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se poursuit et s'accélère avec 75 % de pertes non compensés par 5 % de gains.

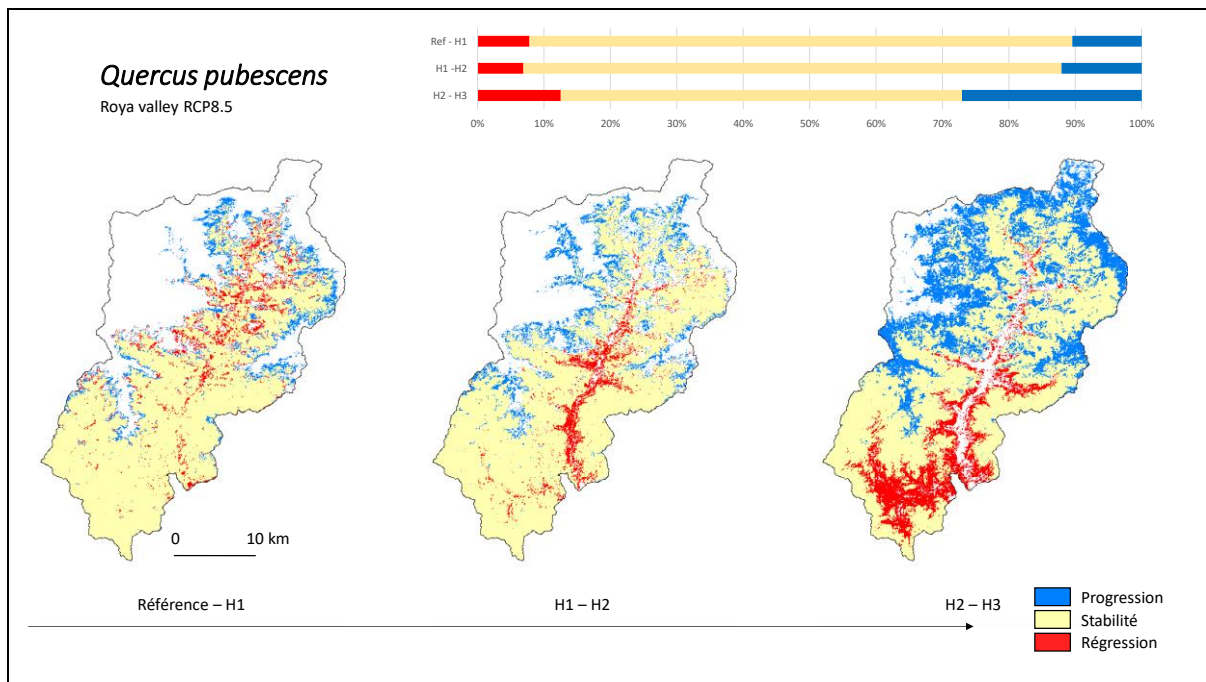


Figure 31 : Modélisation de la viabilité future du Chêne pubescent

Figure 31, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Chêne pubescent selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 il pourrait connaître une minime perte de viabilité dans les bas versants du nord de la Roya et de ses affluents (10 %). En même temps, cette espèce pourrait connaître un léger gain de viabilité dans des milieux de plus haute altitude où dans le passé récent, le climat était trop froid (10 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent avec, selon cette modélisation, une perte de viabilité, dans la basse vallée (5 %) et un gain qui se poursuit (10 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se renforce. En effet la perte de viabilité (10 %) s'observe encore aux marges basses de l'aire de viabilité mais le gain (25 %) s'observe sur les versants au nord.

Figure 32, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Sorbier blanc selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité dans les bas versants de la Roya et de ses affluents (20 %). En même temps, cette espèce pourrait connaître un très léger gain de viabilité dans des milieux de plus haute altitude où dans le passé récent, le climat était trop froid (5 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent avec, selon cette modélisation, une perte de viabilité, dans la vallée (25 %) et un gain modeste qui se poursuit (5 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore la tendance pour la perte de viabilité se maintien (25 %) aux marges basses de l'aire de viabilité mais le gain (25 %) s'accélère sur les versants du nord de la Vallée.

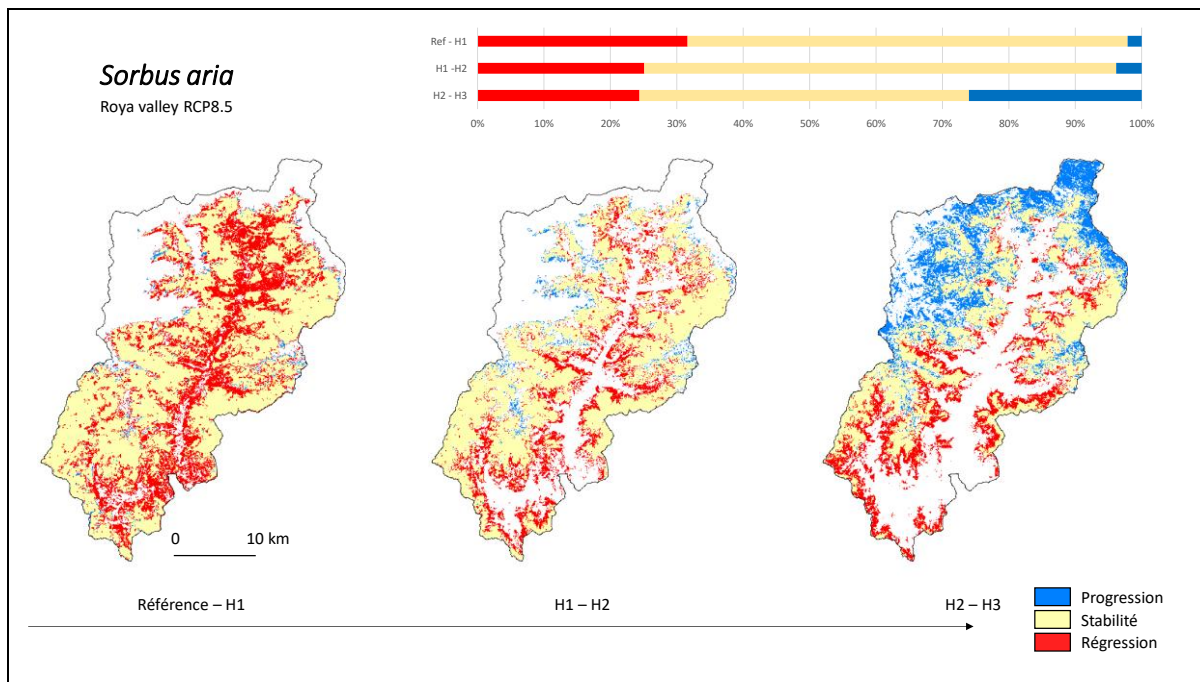


Figure 32 : Modélisation de la viabilité future du Sorbier blanc

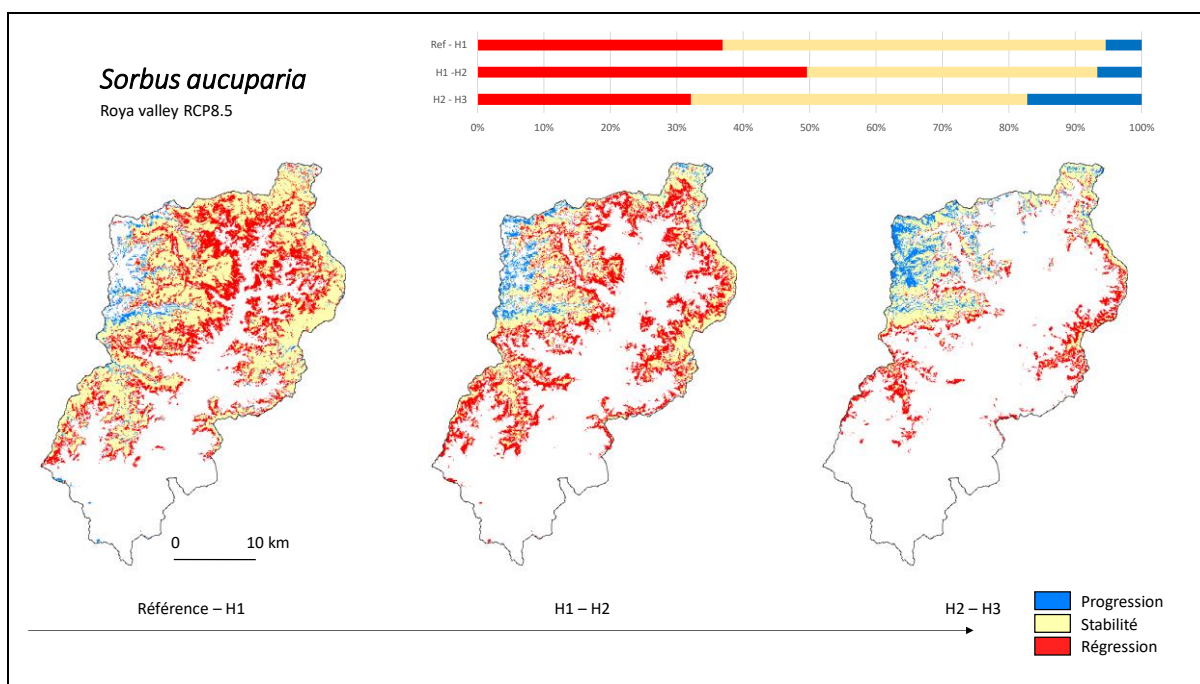


Figure 33 : Modélisation de la viabilité future du Sorbier des oiseleurs

Figure 33, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité du Sorbier des oiseleurs selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 il pourrait connaître une perte de viabilité dans les versants de l'amont de la Roya et ses affluents (40 %). En même temps, cette espèce pourrait connaître un léger gain de viabilité dans des milieux de haute altitude où dans le passé récent, le climat était trop froid (5 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent et se renforcent selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (50 %) et un gain qui se poursuit en haute montagne (5 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se module. La perte de viabilité se tasse (30 %) et s'observe aux marges de l'aire de viabilité au sud et à l'est notamment. Le gain (15 %) s'accélère sur quelques hauts sommets.

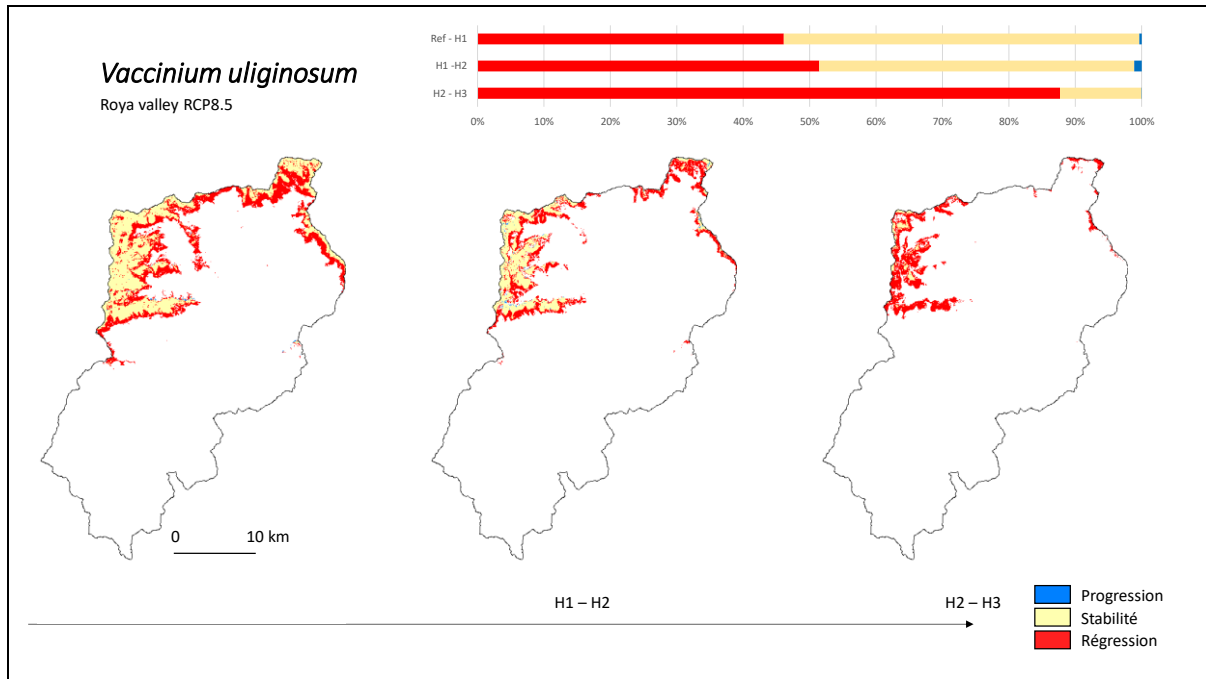


Figure 34 : Modélisation de la viabilité future de l'Airelle

Figure 34, la carte de gauche modélise les changements en cours pour la viabilité de l'Airelle selon le scénario 8.5 du GIEC. Entre le passé récent et l'horizon 1 elle pourrait connaître une perte de viabilité dans les versants des vallées hautes, affluents de la Roya (45 %).

Sur la carte au centre, entre les horizons 1 et 2, ces tendances se poursuivent selon cette modélisation avec une perte de viabilité, toujours dans les altitudes basses de ce qui restait viable (50 %).

Sur la carte de droite, entre les horizons 2 et 3, c'est encore cette tendance se poursuit et s'accélère fortement (90 %).

De manière synthétique, la modélisation de la viabilité montre que des lieux aujourd'hui viables pour les espèces ne le seront plus dans le futur, et inversement. Les plantes de montagne liées aux températures montrent presque toutes une perte en basse altitude et un gain en haute altitude. Les espèces méditerranéennes montrent des changements liés aux fluctuations des pluies dans le modèle mais le niveau d'incertitude bien plus grand.

b. Modélisation de la répartition actuelle

L'approche développée ci-dessus en carte de viabilité n'est cependant pas celle que nous considérons réaliste et que nous souhaitons mettre en avant auprès des élus des collectivités territoriales et des gestionnaires d'aires protégées. En effet, la répartition d'une espèce, aujourd'hui n'est pas celle de son aire « viable ». Les espèces n'occupent pas, aujourd'hui tous les espaces qu'elle peuvent occuper. Certaines espèces peuvent vivre dans des milieux assez différents et, en même temps être des espèces rares diffusant peu de graines et peu compétitives. Nous cherchons donc à ajuster cette cartographie à une répartition réaliste qui tient compte de la répartition de l'espèce (rare, ou fréquente).

- Données

Pour cela la modélisation de la répartition des espèces s'est appuyée sur une campagne de terrain qui a consisté à récolter des données sur l'abondance des espèces. La localisation des placettes (carrés de 50 mètres de côté) est le résultat d'un échantillonnage stratifié sur l'ensemble de la zone d'étude. Trois strates sont prises en compte : une strate climatique, une strate physiognomique et une strate géologique. Une fois cette stratification réalisée, les placettes ont été tirées de manière aléatoire au sein de chaque strate. Le nombre de placettes tirées aléatoirement dans chaque strate est proportionnel à sa surface. Dans chaque placette, trois transects d'une longueur de 50 mètres, espacés de 25 mètres sont réalisés. Sur ces transects, on observe la densité des espèces (ex : 2 Chênes pubescents de 3 et 4 mètres de large sur une ligne de 50m = 14% de recouvrement du sol par cette espèce).

- Méthode

Pour traiter, à l'échelle de la Roya, les données de cette campagne, nous avons utilisé une méthode statistique de type Hurdle (Potts et Elith, 2006). Il s'agit de réaliser deux régressions, l'une après l'autre. La première est une régression logistique afin de cartographier les milieux où l'espèce n'est probablement pas présente et ceux où elle l'est probablement. La seconde est une régression de poisson afin de cartographier la distribution des populations au sein des milieux où l'espèce est présente.

- Résultats (pour le Sapin uniquement, dans un souci de synthèse)

La répartition des espèces étudiées

La figure 35 montre les résultats de la régression de poisson. Elle permet d'observer que les valeurs modélisées sont proches des valeurs observées. En effet, l'erreur moyenne est de 6 %. La figure 35 montre également les difficultés du modèle à simuler les valeurs extrêmes.

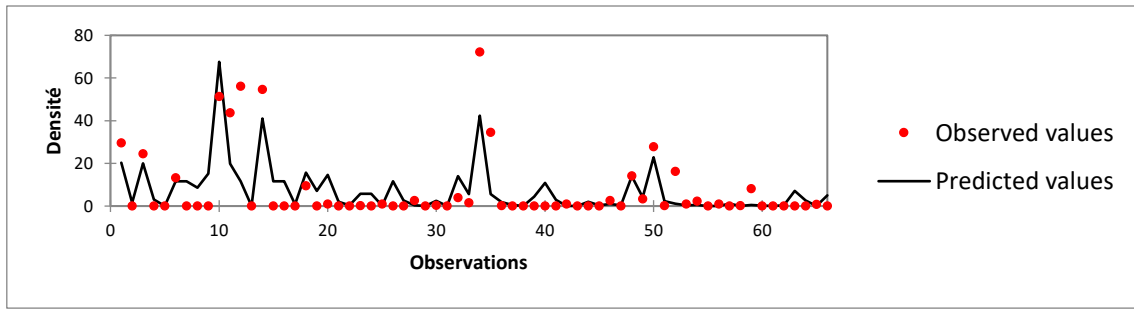


Figure 35 : Comparaison entre les valeurs de densité observées et les valeurs de densité modélisées pour le Sapin.

Les résultats de ce processus de modélisation pour le Sapin montrent des différences significatives entre l'aire de viabilité (cf. figure 36) et la répartition de l'espèce (cf. figure 37). Il apparaît le Sapin occupe 40 % des zones qui lui sont viables dans la vallée de la Roya. Dans la grande majorité de ces 40 % il n'est présent qu'avec des faibles densités (un ou deux sapin(s) dans une végétation composée d'autres arbres).

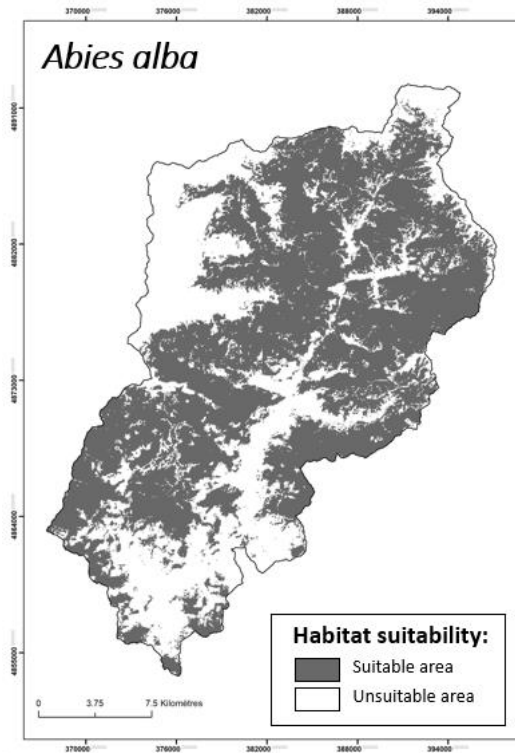


Figure 36. Aire de viabilité actuelle du Sapin

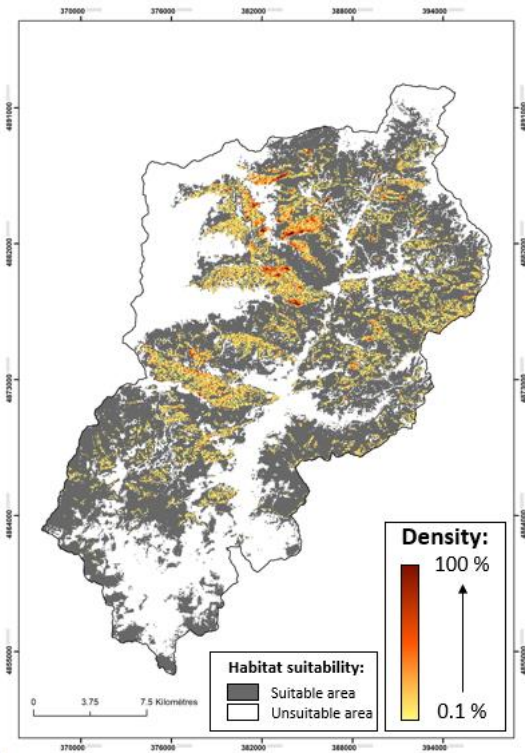


Figure 37. Aire de viabilité et répartition actuelle du Sapin

c. Modélisation de la répartition actuelle

- Méthode

La première étape consiste à analyser les données récoltées lors de la campagne de terrain « dynamique de population ». Un ensemble d'indicateurs ont été calculés et comparés en fonction de leur présence dans des zones de stabilité potentielle ou dans des zones de changement potentiel. Ces indicateurs synthétisent la réponse des espèces aux changements en cours et permettent, *de facto*, de concevoir et paramétrer un modèle prédictif.

La deuxième étape repose sur la création d'un modèle dynamique, spatialement explicite, capable de simuler les processus démographiques des espèces végétales. Ce modèle dynamique simule la production, la dispersion et la germination des graines ainsi que la croissance des individus et leur mortalité liée à différentes perturbations. La production des graines est conditionnée par l'âge des individus, la structure de la population ainsi que les conditions climatiques. La dissémination dépend du mode de dispersion de l'espèce ainsi que des conditions climatiques et topographiques. La germination est conditionnée par la viabilité du milieu pour l'espèce ainsi que par les conditions d'ensoleillement liées à la structure de la population. Le processus de croissance s'effectue au fil des mois. Ce dernier est conditionné par le processus de mortalité qui dépend de l'âge des individus, de la compétition entre les espèces pour la lumière ainsi que de diverses perturbations telles que les sécheresses, les feux de forêts ou encore l'artificialisation du territoire. Tous ces processus ont leur propre temporalité, en fonction des traits spécifiques des espèces. Ce modèle permet de modéliser l'impact du changement climatique sur la répartition des espèces étudiées à trois horizons temporels et pour trois scénarios climatiques.

- Résultats (Pour le Sapin uniquement, dans un souci de synthèse)

Quelles réponses des espèces aux changements en cours ?

L'analyse des données récoltées lors de la campagne de terrain « dynamique de population » montre des différences dans la dynamique des populations présentes dans des zones qui, selon le modèle, sont en train de perdre la viabilité et celles qui, selon le modèle, sont stables. En effet, l'analyse des données révèle que les populations de Sapin dans les zones en qui, selon le modèle perdent la viabilité, sont plus âgées, comportent un nombre d'arbres morts ou malades plus important et un nombre de jeunes individus moins important que les populations localisées dans des zones de stabilité potentielle (cf. tableau 2).

Tableau 2. Exemple d'analyses des données récoltées lors de la campagne de terrain « dynamique de population ».

Dynamiques	Ratio jeunes / vieux (moyenne)	Nbr jeunes individus (moyenne)	Nbr vieux individus (moyenne)	Taux vieux individus en mauvaise santé (moyenne)
Stabilité	0.9	8	15	14 %
Régression	0.1	2	11	6 %

Ces différences sont toutefois légères, mais elles permettent de simuler des taux de réussite des processus démographiques différents en fonction de la présence ou non de la population dans une zone de viabilité.

En ce qui concerne les dynamiques entre les espèces, l'analyse des données montre que le Sapin progresse sous les forêts, même les forêts dont les espèces dominantes sont plus adaptées aux températures plus élevées telles que le Charme ou encore le Chêne pubescent.

Simulation des processus démographiques et impact potentiel du changement climatique sur le Sapin à l'horizon 2100 selon le scénario RCP8.5.

Les résultats de la simulation des processus biologiques montrent qu'à l'horizon 2100 selon le scénario RCP8.5, la répartition du Sapin devrait diminuer de 5 % (cf. figure 38). Le modèle simule l'extinction de populations au sein des vallées et au sud de la vallée de la Roya, et une colonisation des milieux ouverts d'altitude de l'ordre de 200 mètres en 80 ans (cf. figure 38).

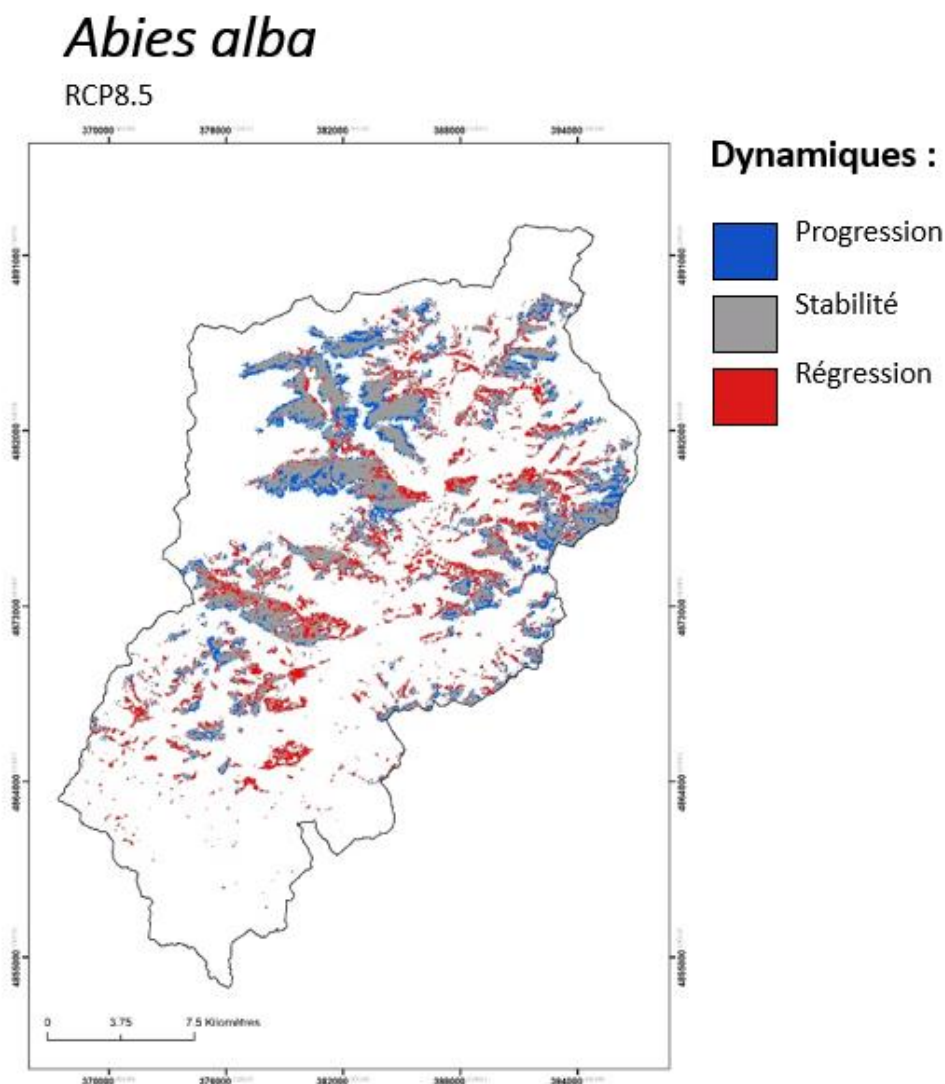


Figure 38. Changements dans la répartition du Sapin d'après les résultats du modèle processus. Simulation selon le scénario climatique RCP8.5 pour l'horizon 2071-2100.

Cette modélisation s'appuie sur une observation de terrain des densités et prend en compte les lieux où une espèce n'est pas présente même si elle pourrait l'être. Ensuite, elle simule les changements seulement s'ils sont réalistes : nombre de graines produites distance de dissémination de celles-ci, taux de mortalité mesurés sur le terrain etc. Les résultats diffèrent très nettement de la méthode la plus fréquemment employée basée uniquement sur la viabilité. (cf. 6.a). Nos résultats montrent bien un impact probable du changement climatique sur la végétation, mais bien moindre que par l'autre méthode.

Conclusion

Cette étude de l'impact du changement climatique sur la végétation de la Roya a permis de réaliser un grand nombre de travaux ; rarement réalisés (transect de botanique), voire complètement originaux et novateurs (modélisation de la répartition et de ses changements basés sur les processus biologiques). Elle a permis aussi de réaliser, ensemble, des travaux qui sont rarement menés de concert (botanique de terrain, suivi par les images satellites de l'occupation du sol et de la phénologie, travaux de modélisation etc.).

La majeure partie des résultats de l'observation des changements en cours montre avant tout la dynamique de fermeture des milieux liée au recul de certaines activités agricoles et pastorales et à la maturation des forêts et non des impacts clairs d'un changement du climat. Cependant, des signaux faibles apparaissent qu'il semble raisonnable d'attribuer à un impact du changement climatique sur la végétation. Par exemple, pour le Sapin, des légères différences dans les peuplements ont été observées entre les lieux où le climat était et est encore favorable à sa croissance et des lieux où, ces 30 dernières années, le changement de climat a rendu peu viable un lieu qui l'était précédemment.

Le programme Concert'eaux a, sur la base de ces observations, permis le développement d'une nouvelle méthode de modélisation de l'impact du changement climatique sur la répartition des espèces. Cette méthode est originale et plus proche de la réalité de la végétation que les précédentes. Les résultats qu'elle a produits sont plus précis que les méthodes précédentes pour modéliser la situation actuelle et, ne serait-ce que pour cela, probablement meilleurs pour modéliser le futur mais ici la science ne possède pas de moyen de mesurer la justesse, sans attendre 80 ans pour confronter le modèle à une réalité encore à venir.

Les résultats de ces travaux ne font que confirmer l'importance des outils de conservation de la biodiversité : d'une part l'importance du réseau d'aire protégées de la Vallée de la Roya, d'autre part les statuts d'espèces protégées. En effet, les zones identifiées comme les plus vulnérables (adret du Cairons) sont heureusement déjà en cœur de Parc. Les espèces identifiées comme les plus vulnérables (Nivéole de Nice) sont heureusement déjà des espèces inscrites en liste rouge de l'UICN.

Références bibliographiques

- Alexandre F., Genin A., 2011. *Géographie de la végétation terrestre ; Modèles hérités, perspectives, concepts et méthodes*. Edition Armand Colin, 302 pp.
- Andrieu J., 2017. Phenological analysis of the savanna–forest transition from 1981 to 2006 from Côte d’Ivoire to Benin with NDVI NOAA time series. *European Journal of Remote Sensing*, **50**, 1, 588-600.
- Diday E., 1971. Une nouvelle méthode de classification automatique et reconnaissance des formes : La méthode des nuées dynamiques. *Revue De Statistiques Appliqués*, **19**, 19–33.
- Fensholt R., Rasmussen K., Nielsen T.T., Mbow C., 2009. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends — Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment*, **113**, 1886–1898.
- IPCC, 2014. Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Mammola, S, Milano, F, Vignal, M, Andrieu, J, Isaia, M. 2019. Associations between habitat quality, body size and reproductive fitness in the alpine endemic spider *Vesubia jugorum*. *Global Ecol Biogeogr.*, **28**, 1325 – 1335.
- Martin N., Carrega P., Adnès C., 2013. Downscaling a fine résolution spatiale des températures actuelles et futures par modélisation statistique des sorties ALADIN-Climat sur les Alpes-Maritimes (France), *Climatologie*, **10**, 51-72.
- Médail F., Quezel P., 1997. Hot-Spots Analysis for Conservation of Plant Biodiversity in the Mediterranean Basin. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, **84**, 1, 112-127.
- Potts J. M., Elith J., 2006. Comparing species abundance models, *Ecological Modelling*, **199**, 2, 153-163,
- San Emeterio J.L., Alexandre F., Andrieu J., Génin A. et Mering C. 2013. Changements socio-environnementaux et dynamiques des paysages ruraux le long du gradient bioclimatique nord-sud dans le sud-ouest du Niger (régions de Tillabery et de Dosso), *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*. Vol. **13**, n°3