

## 1.4.2 Vers le développement d'une méthodologie d'analyse des données de suivis — cas d'étude des pelouses calcicoles

- *Synthèse méthodologique*

Un des objets de ce chapitre était de développer une démarche globale d'analyses des données de suivis qui sont récoltées dans le cadre du programme « les Sentinelles du climat ».

La méthodologie utilisée ici, combinant résultats d'analyses multivariées et comparaisons d'indicateurs écologiques ou de traits de vie d'espèces, s'avère particulièrement intéressante pour explorer les données et constituer une approche diachronique (ARCHAUX *et al.*, 2009 ; GAUDNIK *et al.*, 2011 ; VAN DEN BERG *et al.*, 2011 ; BOUTIN *et al.*, 2017).

Le choix du type d'analyses multivariées à utiliser se justifie en fonction de l'importance des gradients environnementaux en jeu (LEGENDRE & LEGENDRE, 2012 ; BORCARD *et al.*, 2018). Dans notre cas, ces gradients peuvent être assez larges (ex : pelouses très ouvertes à fermées, mésophiles à xérophiles...) et les données de suivis qui en découlent sont relativement hétérogènes avec de nombreux zéros liés à l'absence de taxons dans certaines gammes des gradients. Ces éléments justifient le choix de traiter les données par AFC plutôt que par ACP.

L'interprétation des dimensions, permettant de dégager des hypothèses sur l'évolution des cortèges, pourrait être réalisée de façon plus directe et plus robuste. En effet, le couplage de tableaux « données floristiques–variables explicatives » via des traitements par analyses de redondances (RDA) ou analyses canoniques des correspondances (ACC) serait à privilégier pour relier des variables réponses (ici quadrats de suivi et espèces) à des facteurs d'ordination (ici indices Baseflor et coordonnées géographiques des quadrats) (LEBART *et al.*, 1995 ; LEGENDRE & LEGENDRE, 2012 ; BOUTIN *et al.*, 2017 ; BORCARD *et al.*, 2018).

Par ailleurs, l'étendue des gradients observés justifie le partitionnement des dispositifs au sein de groupes plus homogènes floristiquement et écologiquement (DUPRE *et al.*, 2010 ; GAUDNIK *et al.*, 2011) au travers d'une étude typologique. Cette étape permet en effet de détecter des tendances d'évolutions différenciées et significatives, qui sont masquées en travaillant sur l'ensemble des dispositifs. Cependant, la méthode de classification exposée ici mériterait des compléments et une harmonisation avec les méthodes utilisées en phytosociologie ; cela permettrait notamment d'établir un rattachement de chaque groupe à des typologies existantes (BAR DAT *et al.*, 2004 ; BENSETTITI *et al.*, 2005 ; LOUVEL & GAUDILLAT, 2013).

- *Représentativité des suivis et tendances d'évolution*

En ce qui concerne le réseau de suivis des pelouses calcicoles de Nouvelle–Aquitaine, il apparaît que certains types de pelouses sont moins représentés que d'autres. Cela est directement en lien avec l'occurrence de chaque type de pelouses au sein de la région ; les plus fréquents étant davantage échantillonnés, et inversement. Si ceci a peu d'incidence sur les analyses réalisées pour l'ensemble des pelouses calcicoles et leur tendance d'évolution générale, il y a en revanche des conséquences sur les traitements réalisés par types de pelouses. En effet, un nombre insuffisant de dispositifs sur un type de pelouse ne permet pas de mettre en évidence des modifications jugées statistiquement significatives, et ce même si leur intensité semble forte. Les conclusions peuvent alors apparaître biaisées par ce manque de données.

Le renforcement des dispositifs sur la quasi-totalité des sites de pelouses du programme « les Sentinelles du climat » effectué en 2019 devrait permettre de pallier en partie ce biais en apportant plus de robustesse au réseau de suivis. Ainsi, ce réseau comportera pour les lectures suivantes plus d'une centaine de dispositifs relus contre 72 actuellement, dont 40 à travers le programme « les Sentinelles du climat ».

L'approche diachronique menée sur le réseau de pelouses calcicoles a permis de quantifier les modifications générales de cortèges floristiques et de qualifier les tendances d'évolution pour un intervalle de temps allant de 2 à 8 ans.

En résumé, une tendance significative vers une thermophilisation des cortèges est mise en évidence à l'échelle du réseau. Elle concerne plus particulièrement le groupe des pelouses « picto-périgourdines ». Les pelouses aquitaniennes « subhumides » semblent elles aussi évoluer dans ce sens mais de façon statistiquement non significative. Cette tendance s'illustre par la progression en nombre et en fréquence de certains taxons d'affinités méditerranéennes tels que *Fumana procumbens*, *Globularia bisnagarica*, *Convolvulus cantabrica*, *Carex halleriana* et *Linum suffruticosum*. Toutefois, le résultat apparaît plus mitigé pour l'évolution de l'indice de température.

Par ailleurs, une évolution non-significative vers une fermeture des pelouses peut être notée à l'échelle du réseau. Cette tendance devient significative pour les pelouses « picto-périgourdines ». Elle s'illustre par la progression de taxons d'ourlets ou ubiquistes (*Brachypodium rupestre*, *Rubia peregrina*, *Origanum vulgare* et *Carex flacca*), accompagnée par la régression de taxons plus typiques de pelouses comme *Carex humilis*, *Cerastium gr. pumilum* et *Festuca auquieri*. De plus, des changements significatifs des indices de lumière (diminution) et de trophie (hausse) vont dans le sens de cette tendance à la fermeture.

- **Approche corrélative**

Ces évolutions, en termes de cortèges floristiques, d'indices écologiques et de traits de vie d'espèces, doivent désormais pouvoir être reliées à des phénomènes explicatifs. Cet objectif complémentaire passe par une approche corrélative de traitement des données de suivi. Elle repose sur la disponibilité de variables indépendantes susceptibles d'expliquer les changements. Les sites de pelouses calcicoles, mais aussi des autres indicateurs floristiques suivis dans le cadre du programme les Sentinelles du climat, sont équipés de stations météorologiques enregistrant les variables de température et d'humidité atmosphérique. En effet, la mise en relation des dynamiques climatiques locales avec les tendances d'évolution de la flore sur sites constitue l'un des objectifs majeurs du programme.

Ces relations peuvent être mises en évidence via des tests des corrélations de Spearman (GAUDNIK *et al.*, 2011 ; BOUTIN *et al.*, 2017). Dans le cas où elles se montrent significatives, elles peuvent alors être analysées grâce à des modèles linéaires de divers types (DUPRE *et al.*, 2010 ; STEVENS *et al.*, 2011 ; VAN DEN BERG *et al.*, 2011 ; DIEKMANN *et al.*, 2014 ; BOUTIN *et al.*, 2017). Des projections de l'évolution des cortèges floristiques en fonction de la modification des variables explicatives, ici température et/ou humidité atmosphérique, pourraient ainsi être proposées à l'échelle des sites suivis.

Ces prédictions peuvent être effectuées pour chaque indicateur biologique suivi (ex : pelouses calcicoles), ou bien déclinées par sous-groupes de cet indicateur (ex : type de pelouse précis). Elles pourront ensuite être comparées avec les prédictions issues de la modélisation des répartitions

d'espèces ou de groupes taxonomiques à l'échelle régionale. Cette perspective sera discutée plus loin (§ 1.4.3).

- *Liens faune-flore*

Enfin, la mise en place d'analyses mêlant des indicateurs faunistiques et floristiques apparaît comme un axe de travail pertinent et enrichissant du programme « les Sentinelles du climat ». En effet, la disponibilité de données de suivis protocolés sur un ensemble de sites identiques pour ces 2 groupes d'indicateurs, associée à des données météorologiques, permettrait la détection d'évolutions plus globales à l'échelle d'écosystèmes. Par ailleurs, cela offrirait la possibilité d'utiliser les données floristiques en tant que variables explicatives des modifications de cortèges faunistiques. Ces perspectives seraient à développer principalement dans le cadre d'indicateurs multi-espèces type « cortèges » (ex : communautés végétales et cortèges de lépidoptères de pelouses calcicoles, landes humides et tourbières).

### 1.4.3 Discussion générale

- *Constitution de bases de données et variables opérationnelles*

En amont du travail d'analyse et de production de premiers modèles de répartition d'espèces, la phase de préparation des données floristiques et environnementales reste une partie fondamentale mais relativement chronophage. Le rassemblement des différentes couches de variables environnementales d'intérêt et disponibles, suivi de leur harmonisation sous forme de rasters a représenté la portion la plus conséquente du travail pour cette année. Ce n'est qu'une fois celui-ci achevé que les étapes de sélection du type de modèle, des paramétrages, ainsi que des variables pertinentes ont pu être entreprises.

Concernant les suivis, l'harmonisation des formats de données puis l'harmonisation taxonomique ont concentré un temps conséquent à l'issue de la période de terrain. L'exploration des données et les analyses préliminaires ont également servi pour la rétro-validation de la base de données brute des suivis. La production d'indicateurs synthétiques, à partir de Baseflor, pour chaque dispositif a été une étape essentielle en vue de l'interprétation des résultats.

- *Relations entre approche locale et approche régionale*

Les analyses au niveau local et les prédictions à l'échelle régionale forment des volets relativement distincts à l'heure actuelle (résolutions, types de données, méthodes et objectifs différents). Cela se justifie par le fait que les données floristiques issues des suivis ne bénéficient pas encore d'un recul suffisant pour pouvoir déterminer des tendances d'évolution et des corrélations nettes avec des variables explicatives, notamment climatiques. En effet, une connaissance de la variabilité et de la résilience de l'indicateur, à court et moyen termes, est nécessaire pour prédire des modifications à plus long terme, notamment en contexte de plaine (BERTRAND *et al.*, 2011). Ainsi, bien que des liens robustes entre les changements de compositions floristiques et l'évolution temporelle des conditions bioclimatiques aient pu être avancés, il n'est pour l'instant pas possible de faire la part entre une tendance générale liée au changement climatique et la variabilité interne aux écosystèmes.

Les modèles spatiaux quant à eux accèdent à une part nettement plus importante de cette variabilité, non pas dans le temps mais dans l'espace. Ils permettent ainsi d'identifier des corrélations robustes entre les présences/absences des espèces et les conditions environnementales des milieux.

L'hypothèse d'un lien de causalité est ensuite avancée, appuyée par la connaissance *a priori* des facteurs écologiques influençant la répartition des espèces végétales. Les évolutions de ces paramètres environnementaux sont ensuite considérées comme des vecteurs potentiels de modifications floristiques. Ces modifications peuvent enfin être prédites, en fonction de l'intensité et de la spatialisation des changements environnementaux.

Des liens existent néanmoins entre ces deux volets, et nombreux sont ceux qui restent à développer. Notamment, l'aspect prédictif des résultats issus des modèles régionaux, pour différents scénarios climatiques et à différents horizons, peut informer sur les évolutions futures potentielles des cortèges à l'échelle des sites. Ainsi, des hypothèses sur les taux de substitution et les vitesses des changements des cortèges par site pourraient être formulées et testées au fil du temps.

Dans une perspective inverse, les prédictions issues des modèles spatiaux pourront être confrontées aux évolutions réelles, mises en évidence à travers l'analyse des données de suivis. Trois cas de figure sont alors possibles : 1- les évolutions prédites et les évolutions réelles suivent des tendances similaires en termes de progression/régression d'espèces permettant une validation des modèles prédictifs ; 2- les évolutions prédites montrent une modification de composition floristique alors qu'aucune différence n'est constatée réellement, illustrant alors la résilience ou la dette climatique des cortèges ; 3- les évolutions prédites et réelles montrent des tendances divergentes ; pouvant signifier que le changement climatique n'est pas le facteur primordial des modifications observées ou que des conditions microclimatiques particulières, et qui ne suivent pas les tendances macroclimatiques, sont prépondérantes à l'échelle locale (DE FRENNE *et al.*, 2013).

Les modèles spatiaux, s'ils permettent de cerner efficacement les gammes de présence potentielle des espèces pour chaque variable climatique, ne prennent cependant pas en compte leurs capacités de résilience et donc la dette climatique potentielle des cortèges. L'un des apports spécifiques des suivis au processus de prédiction pourrait donc être l'estimation de cette dette. Divers travaux attestent de ce décalage entre changement climatique et modifications effectives des compositions floristiques (JACKSON & SAX, 2010 ; BERTRAND *et al.*, 2011 ; DULLINGER *et al.*, 2012 ; BERTRAND *et al.*, 2016). L'un des axes de travail à explorer pourrait donc être de quantifier l'écart entre des variables climatiques simulées à travers les observations floristiques (ex : indices Baseflor de température et d'humidité) et des variables climatiques réellement mesurées (BERTRAND *et al.*, 2011).

C'est via des suivis *in situ* plutôt qu'avec des prédictions de modèles régionaux qu'une compréhension des processus d'évolution engendrés par le changement climatique peut être approchée avec le plus de précision, et potentiellement aussi plus de nuances, à fine échelle (micro à mésoclimatique). Des modèles linéaires réalisés à partir des données de suivis (§ 0) devraient ainsi permettre de prédire les évolutions des cortèges à cette échelle, en complément de l'approche régionale. Toutefois, des séquences de suivis plus longues sont nécessaires pour établir des liens de façon robuste. ARCHAUX *et al.* (2009) indiquent qu'une séquence de 10 ans ne permettait pas de déceler de tendance globale au sein de suivis forestiers car le signal est masqué par la variabilité du système.

Les travaux déjà réalisés au sein du programme montrent en effet que la variabilité interannuelle des conditions microclimatiques se révèle assez importante sur les sites de suivis (MALLARD, 2018a). Dans le laps de temps de ce programme (2016-2021), l'étude de cette variabilité pourra être mise à profit pour illustrer les effets du changement climatique. Les évolutions de cortèges mises en évidence entre deux années contrastées pourraient ainsi permettre d'identifier des modifications floristiques « types ».

Une fois mis en lien avec les prédictions des modèles régionaux, ces résultats permettront de proposer de premières hypothèses sur les trajectoires des communautés végétales. En somme, les résultats des suivis *in situ* pourront être utilisés à plus long terme en interaction avec les modèles prédictifs pour les valider et/ou les affiner.

## 1.5 Conclusion

La sensibilité climatique des plantes et milieux naturels de Nouvelle-Aquitaine peut être évaluée selon différents aspects, méthodes, échelles géographiques et/ou temporelles. Dans ce rapport, celle des cortèges floristiques de pelouses calcicoles est abordée à l'échelle de quelques années pour les sites de suivis « Sentinelles du Climat », via plusieurs étapes de traitements par analyses multivariées. Il ressort de cette étude une tendance significative vers une thermophilisation des pelouses calcicoles de la région. Cette dynamique est plus nettement marquée dans la partie picto-périgourdine du territoire. De manière plus équivoque, elle s'observe aussi mais de façon statistiquement non significative dans les pelouses subhumides d'ex-Aquitaine. La progression, en nombre et en fréquence, des taxons d'affinités méditerranéennes illustre cette tendance.

Parallèlement, ces milieux semblent évoluer naturellement vers une fermeture, provoquée par le développement de taxons d'ourlets ou ubiquistes. A l'inverse, les espèces plus typiques des stades de pelouses subissent une régression. Ces tendances n'apparaissent statistiquement significatives que pour la frange picto-périgourdine, et pas encore dans le reste de la région. La fermeture de ces milieux s'accompagne d'une diminution de l'indice de lumière associée à une augmentation de celui de trophie.

Au cours de développements ultérieurs, des liens entre les évolutions de la flore déjà constatées et des mesures indépendantes de variables environnementales, et plus particulièrement climatiques, pourront être recherchés. Des modèles linéaires, ou bien suivants d'autres types de lois de distribution, permettront alors de dégager des relations quantitatives entre les variations climatiques et les dynamiques des cortèges floristiques. En se basant sur les projections climatiques de Météo France, des prédictions de changements de la composition floristique des sites de suivis pourront alors être proposées à différents horizons temporels et selon divers scénarios de réchauffement.

Selon une approche plus spatiale, des liens entre les conditions bioclimatiques des milieux et les potentialités de développement des plantes peuvent également être établis. C'est l'objet de la modélisation des répartitions régionales d'un lot d'espèces végétales pour la période actuelle. Dans ce rapport, les choix méthodologiques nécessaires à la réalisation de ces cartes sont présentés et argumentés, au vu des premiers résultats obtenus pour quelques espèces de pelouses calcicoles.

Les suites à apporter à ces travaux concernent donc la déclinaison de ces méthodes pour un ensemble beaucoup plus vaste d'espèces et de milieux différents, en vue d'obtenir un catalogue de cartes de répartition potentielle des plantes pour l'actuel. Une fois celui-ci suffisamment étayé et les méthodes pour y parvenir définitivement fixées, le même travail pourra alors être réitéré, en prenant cette fois en compte les conditions climatiques prédites pour les décennies à venir par les modèles de Météo France. La confrontation de ces résultats relatifs à des époques successives devrait *in fine* permettre de mettre en évidence les espèces les plus sensibles aux impacts des changements climatiques.