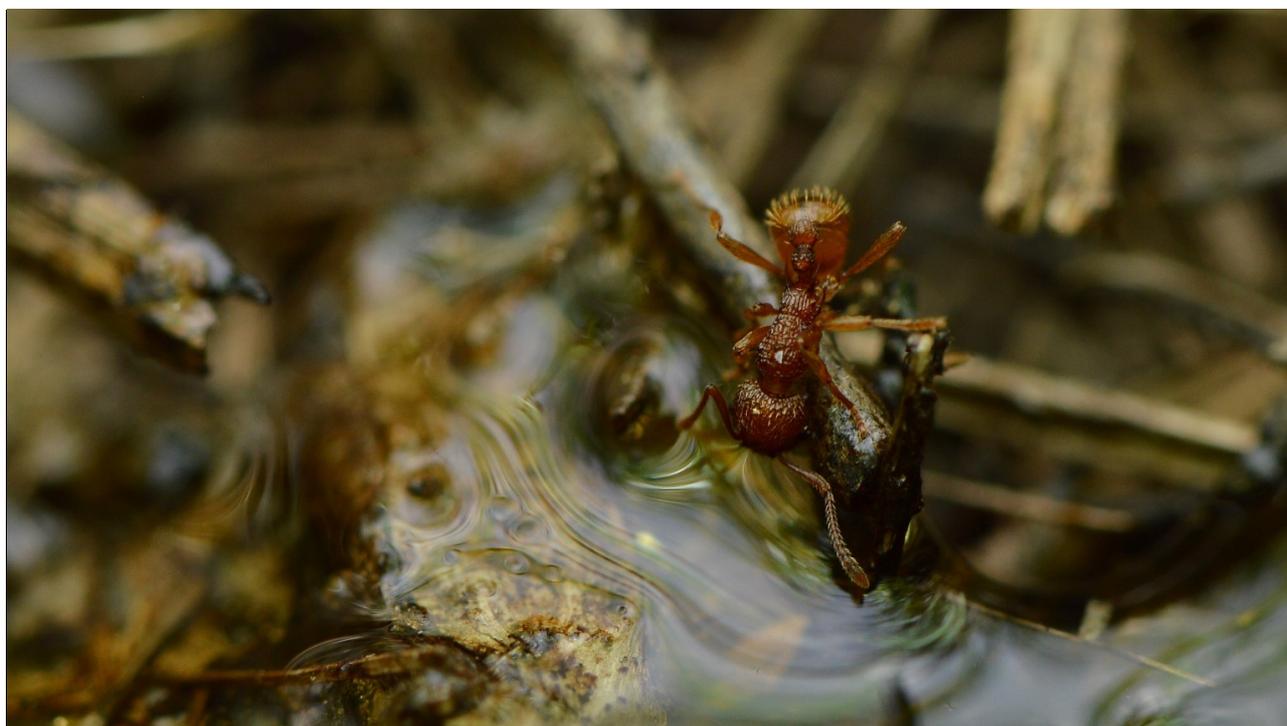


MASTER 2 PNB : PATRIMOINE NATUREL ET BIODIVERSITÉ  
-ANNÉE 2019/2020-

RAPPORT DE STAGE - Septembre 2020

ROBERT Christal



L'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon* écotype « *alcon* ») en Nouvelle-Aquitaine :  
fourmis hôtes et changement climatique

STRUCTURE D'ACCUEIL : Association Cistude Nature  
Responsable de Stage : BULTÉ Sandy – Chargée de mission  
flore/habitat/entomologie

Anne-Marie Cortesero, Sébastien Dugravot et Frédéric Ysnel  
Co –responsables Master PNB

## Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier Sandy BULTE qui a parfaitement rempli son rôle de maître de stage, et ce même après la fin de mon contrat. Un grand merci pour ta présence (même durant tes vacances), ta pédagogie, tes encouragements et tout ce que tu as pu me transmettre ! Merci également de t'être gentiment dévouée (tu remerciera dame nature) pour le relevé des appâts contenant les fourmis les plus... acides, ainsi que pour le comptage des sous-quadrats les plus denses en Gentiane et en ponte d'alcon !

NB : les sous-quadrats paires c'est le bon plan.

Je remercie également Akaren GOUDIABY pour son aide précieuse durant les protocoles fourmis, et pour ses connaissances transmises sur les Odonates et Coléoptères !

Merci également à tout les deux pour cette très bonne ambiance globale ainsi que sur le terrain, sans oublier Pierre-Yves GOURVIL, qui nous a initié tout les 3 au protocole fourmis, et que je remercie aussi pour cette super chasse de nuit dans les Pyrénées Atlantique (malgré la météo, cette petite virée dans les Pyrénées était super !), ainsi que pour son partage des connaissances concernant le complexe *Phengaris alcon-Gentiana pneumonanthe-Myrmica*.

Enfin, un grand merci à Christophe GALKOWSKI pour son implication, notamment par la validation des identifications de l'ensemble des échantillons de fourmis, mais également pour s'être rendu disponible afin de répondre à mes questions concernant l'écologie des fourmis et leur comportement. De même, je remercie Bernard KAUFMANN, qui a rapidement répondu à mes questions sur ce même sujet et qui m'a également transmis un document de Seifert sur l'écologie des fourmis et que je recherchais depuis des mois...

Je souhaite également remercier l'ensemble des personnes qui ont participé au suivi Gentiane ou au protocole fourmis, ainsi que les salariés de Cistude Nature, que j'ai eu l'occasion de rencontrer, pour leur accueil sympathique au sein de l'association.

Pour conclure, merci à mes 2 bénévoles Gaëlle LAC et Sophia REICHENAUER qui m'ont accompagné sur le terrain afin de localiser les nids de *Myrmica*, la recherche n'est pas une partie de plaisir mais j'ai été ravi de pouvoir vous transmettre mes connaissances sur le reste de la faune présente dans la lande humide.

# Sommaire

Introduction	1
Matériel et Méthodes	
○ Sites d'étude	6
○ Matériel biologique	7
○ Protocole – inventaire des espèces de fourmis	7
○ Identification des espèces	9
○ Protocole – recherche des nids de <i>Myrmica</i>	9
○ Paramètres environnementaux	10
○ Analyses statistiques	11
Résultats	
○ <i>Inventaire des espèces de fourmis</i>	12
○ <i>Densité de nids dans les quadrats de suivis</i>	14
○ <i>Analyses des variables environnementales autour du nid</i>	14
○ <i>Analyses des variables environnementales au dessus du nid</i>	16
○ <i>Analyses des relations biotiques entre les <i>Myrmica</i> et les autres espèces recensées</i>	17
Discussion	
○ Résultats	
▪ <i>Inventaire des espèces de fourmis</i>	18
▪ <i>Densité de nids dans les quadrats de suivis</i>	19
▪ <i>Analyses des variables environnementales autour du nid</i>	21
▪ <i>Analyses des variables environnementales au dessus du nid</i>	23
▪ <i>Analyses des relations biotiques entre les <i>Myrmica</i> et les autres espèces recensées</i>	24

Conclusion

25

Références bibliographiques

26

## Introduction

La préservation de la biodiversité est aujourd'hui au cœur de nombreux débats, avec notamment celui d'une 6<sup>ème</sup> extinction de masse. Depuis de nombreuses années, les scientifiques alertent sur la perte exceptionnellement rapide de la biodiversité au cours des siècles derniers, indiquant ainsi une 6<sup>ème</sup> extinction de masse déjà en cours ([Ceballos et al., 2015](#) ; [Barnosky et al., 2011](#)). En effet, le taux d'extinction actuel des espèces serait 100 à 1000 fois supérieur à celui des précédentes extinctions ([Ceballos et al., 2015](#)). La préservation de la biodiversité n'est donc plus à débattre mais devient une urgence, afin d'enrayer cette 6<sup>ème</sup> extinction de masse et ainsi préserver l'intégrité des écosystèmes. Par conséquent, l'absence d'action en faveur de la biodiversité engendrera une perte drastique de celle-ci et donc des conséquences négatives sur le fonctionnement des écosystèmes, avec notamment la perte des services écosystémiques rendus par la nature et dont les populations humaines ont besoin pour se maintenir ([Ceballos et al., 2017](#)).

Toutes d'origine anthropique, les causes de cette 6<sup>ème</sup> extinction de masse sont nombreuses. La destruction et la fragmentation des milieux naturels sont les principales causes de la perte de la biodiversité car elles rendent compliqué la mise en place de mesures de protection. En effet, il devient difficile de préserver une espèce si l'habitat qui lui était favorable n'est plus présent. Bien que des mesures adaptées de protection ou de limitation des dégâts soient possibles, les autres causes n'en restent pas moins négligeables et participent au renforcement des 2 menaces précédentes : La surexploitation des espèces sauvages (surpêche, déforestation, braconnage...), la pollution de l'eau, des sols et de l'air ainsi que l'introduction d'espèces exotiques envahissantes ([Ministère de la Transition Écologique et Solidaire<sup>1</sup>](#)).

Alors que la biodiversité est déjà sous la pression directe des activités anthropiques, le changement climatique (d'origine naturelle) se voit fortement renforcé par ces dernières. En effet, les populations humaines ont considérablement augmenté la quantité de gaz à effet de serre ce qui a pour conséquence une modification de l'équilibre climatique naturel ([Ministère de la Transition Écologique et Solidaire<sup>2</sup>](#)). Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) estime que ce changement climatique se traduira, à moyen et à long terme, par des phénomènes climatiques aggravés à travers une modification de la fréquence, de l'intensité, de la répartition géographique et de la durée des événements météorologiques extrêmes tels que les tempêtes, les inondations et les sécheresses. Ces changements entraîneront la perturbation de nombreux écosystèmes dont la perte des espèces animales et végétales est estimée entre 20 et

30%, mais également des crises liées aux ressources alimentaires, des dangers sanitaires, l'acidification des océans ainsi que le déplacement des populations en raison de l'augmentation du niveau de la mer. Des conséquences de ce changement climatique sont d'ores et déjà visibles, notamment l'augmentation de la température mondiale moyenne, estimée en 2015 à 0,74°C de plus par rapport à la moyenne du XX<sup>e</sup> siècle, ainsi que l'acidification des océans avec une baisse du pH passant de 8,25 à 8,14 ou encore l'élévation du niveau marin de 3,2mm par an ([Ministère de la Transition Écologique et Solidaire<sup>1</sup>](#)).

En raison de sa progression rapide et de son ampleur, le changement climatique est susceptible de devenir l'une des principales causes de la perte de biodiversité ([Sala et al., 2000 in Mallard et al., 2016](#)).

La conséquence principale du changement climatique est donc une augmentation de la température moyenne à l'échelle mondiale. L'ensemble des organismes sont alors susceptibles d'être impactés, notamment si la température moyenne de leur habitat s'élève au delà de leur tolérance limite et/ou modifie les conditions environnementales favorables à leur développement et leur survie.

Afin de pouvoir préserver la biodiversité, il est important de comprendre comment les espèces sont impactées par le réchauffement climatique, mais aussi de prédire leur réponse face à cette menace. Ainsi, d'après [Davis & Shaw \(2001\)](#), les espèces n'ont que 3 alternatives :

- persister dans l'habitat modifié par adaptation génétique ou plasticité phénotypique ;
- migrer vers un habitat plus favorable ;
- s'éteindre localement.

Il existe également une inégalité des espèces face au changement climatique. En effet, certaines espèces seront plus impactées que d'autres par ce dernier. Parmi les espèces les plus impactées, on retrouve les espèces peu mobiles (incapables de migrer vers un habitat plus favorable) et les espèces ectothermes (dont la température corporelle dépend de la température extérieure car incapable de thermo-réguler physiologiquement), des espèces pour la plupart spécialistes. Ces dernières seront donc, en théorie, les premières espèces à être impactées par le changement climatique et donc à y répondre, ce qui fait d'elles de parfait modèles d'étude.

D'après les scientifiques, la Nouvelle-Aquitaine est l'une des régions de France où le réchauffement climatique risque d'être le plus fort. En effet, cette dernière va être confrontée à un réchauffement systématique accompagné de vagues de chaleur plus intenses, particulièrement en été, avec notamment pour conséquence des situations d'évapotranspiration des sols également plus

intenses (Le Treut, 2013). La région Nouvelle-Aquitaine est donc une zone d'étude idéale afin de comprendre l'impact du changement climatique sur la biodiversité. De plus, celle-ci est composée d'une multitude d'écosystèmes (écosystèmes dunaires, pelouses calcicoles, lagunes, étangs-arrière littoraux, landes humides et tourbières acides, écosystèmes de montagne... ; Mallard *et al.*, 2016), de part cette mosaïque d'habitats, la région Nouvelle-Aquitaine permet d'étudier l'impact du changement climatique sur différents écosystèmes et donc sur diverses espèces de la faune et la flore. Ainsi, un programme multi-partenarial « Les Sentinelles du climat » a été mis en place en Nouvelle-Aquitaine afin d'étudier l'impact du changement climatique sur la biodiversité de la région.

Les différentes espèces étudiées au sein de ce programme sont appelées « Sentinelles ». Concernant les espèces faunistiques, ce sont principalement des amphibiens (*Rana pyrenaica*...), des reptiles (*Timon lepidus*...), des insectes (odonates, lépidoptères et orthoptères) et également des mammifères tel que la Marmotte des Alpes (*Marmota marmota* ; Mallard *et al.*, 2016). Ces espèces ont pour point commun une faible capacité de dispersion et/ou un habitat particulier (espèces spécialistes). De plus, à l'exception de la Marmotte des Alpes, ce sont toutes des espèces ectothermes soit des espèces plus sensibles au changement de température. Comme expliqué précédemment, celles-ci sont donc plus vulnérables au changement climatique et sont susceptibles d'y répondre en premier.

Parmi ces espèces, on en distingue certaines dont la vulnérabilité est renforcée par la complexité de leur cycle de vie. C'est notamment le cas de l'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon* Denis & Schiffermüller, 1775 ; écotype « alcon »), un papillon spécialiste du genre *Phengaris* (=anciennement *Maculinea*), inféodé aux landes humides et protégé selon l'article 3 de la liste des insectes protégés sur l'ensemble du territoire (Légifrance) dont le statut de menace est « quasi-menacé » (statut UICN « NT » en France ; INPN). La réalisation du cycle de vie de cette espèce « Sentinelle » nécessite la présence de la Gentiane des marais (*Gentiana pneumonanthe* Linnaeus, 1753) et de fourmis du genre *Myrmica* (Latreille, 1804), ceux sont donc des éléments essentiels à la survie des populations de l'Azuré des mouillères. Ce dernier ainsi que sa plante hôte, la *Gentiana pneumonanthe*, sont assez bien étudiés. Des suivis ont notamment été initiés en 2017 afin d'étudier la relation [*Phengaris alcon*-phénologie de la *Gentiana pneumonanthe*-changement climatique] dans le cadre du programme « Les Sentinelles du climat », mais jusqu'à maintenant les fourmis n'étaient pas étudiées alors qu'il s'agit d'un élément indispensable à la réalisation du cycle de vie de l'Azuré des mouillères. En effet, les études au sujet des fourmis sont peu nombreuses et

concernent surtout leur organisation et évolution sociale et quelques fois seulement leur écologie (Kaufmann, 2010), seule la plante hôte est donc généralement prise en compte dans les études ou les plans de gestion. Pourtant, d'après Sielezniew *et al.* (2005), la population d'un *Phengaris* restera faible si l'abondance de sa fourmis hôte l'est également et ce, même si sa plante hôte spécifique est abondante. Une densité en plante hôte bien inférieure à celle de la fourmis hôte serait à priori moins contraignant pour le papillon que l'inverse (Griebeler & Seitz, 2002 ; Soissons *et al.*, 2011 in Le Falher, 2018). Thomas (1980 in Rozier *et al.*, 2014) semble également démontrer cette théorie en appuyant sur le fait que de nombreuses populations de *Phengaris* ont disparu et ce malgré la présence en densité favorable de leur plante hôte.

L'étude de l'impact du changement climatique sur cette espèce « Sentinelle » nécessite donc également d'étudier l'impact de celui-ci sur l'ensemble du complexe *Phengaris*-plante hôte-fourmis hôte.

La densité en nids des fourmis hôtes semble donc être un facteur essentiel à la pérennité des populations de *Phengaris*. La présente étude vise donc à inventorier les espèces de fourmis hôtes de l'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon* écotype « alcon »), sur 4 sites de la région Nouvelle-Aquitaine, et à caractériser les variables environnementales conditionnant la répartition de celles-ci et de leur nids. Ces résultats permettront par la suite d'évaluer l'impact du changement climatique sur les populations de fourmis hôtes de l'Azuré des mouillères et donc d'évaluer les conséquences attendues sur les populations de ce dernier.

L'Azuré des mouillères est inféodé aux landes humides et aux tourbières, les espèces de *Myrmica* attendues dans ce type d'habitat sont *Myrmica scabrinodis*, *Myrmica ruginodis*, *Myrmica rubra* et *Myrmica gallienii* (espèce rare dans l'ensemble et même absente de nombreux endroits). Les 4 sites étudiés présentent un habitat de type lande humide, pelouse acidiphile ou tourbière, les conditions environnementales et la structure de végétation sont donc différentes. L'espèce dominante de *Myrmica* sur chacun des 4 sites sera donc potentiellement différente.

D'après Urbani & Collingwood (1977) les *Myrmica* font parti d'un groupe de fourmis communes dont la répartition en Europe du Nord est corrélée au nombre d'heure d'ensoleillement par jour. En effet, les travaux d'Elmes & Wardlaw (1982<sup>a</sup>) ou encore ceux de Barrett (1979) mettent en évidence l'importance de la durée d'ensoleillement (= insolation) sur la répartition des *Myrmica*, et montrent notamment qu'une différence de durée d'ensoleillement de 30min suffit à induire la présence ou l'absence d'une espèce de *Myrmica* sur un site. Cependant, cela n'est valable que pour l'Europe du Nord (et en altitude concernant la France). Dans les régions plus au

Sud où l'insolation est plus importante, comme en Nouvelle-Aquitaine, les fourmis ont tendance à fuir le soleil (Kaufmann comm. pers). La température d'un site étant en partie liée à l'insolation de celui-ci, elle semble donc jouer un rôle important dans la répartition des différentes espèces de fourmis. En effet, Seifert (2017) a étudié l'effet de 12 variables environnementales sur la ségrégation de 59 espèces de fourmis. La variable environnementale qui ressort comme la plus importante est la température maximale au sol au même rang que l'humidité du sol, suivis par la température moyenne au sol, soit des variables environnementales micro-climatiques. Elmes & Wardlaw (1982<sup>b</sup>) évoquent également l'importance des conditions micro-climatiques sur le succès des fourmis du genre *Myrmica*, notamment l'importance de la température au niveau du nid. En effet, en tant qu'organisme ectotherme, la température est susceptible de jouer un rôle important dans le développement des larves des fourmis.

Afin de comprendre la répartition des *Myrmica* au sein de nos 4 sites ainsi que leur choix concernant le site de nidification, il est alors important de prendre en compte ces 3 facteurs : température maximale, température moyenne et humidité mesurés au sol. Cependant, nous ne disposons pas du matériel adéquat pour mesurer de façon précise et fiable les 3 paramètres environnementaux précédents. Toutefois, ceux-ci sont conditionnés à la fois par l'ensoleillement global du site (déterminé par l'emplacement géographique, les particularités du climat local et l'aspect) et par l'ombrage lié à la structure de végétation (Elmes & Wardlaw, 1982<sup>a</sup> ; Elmes & Wardlaw, 1982<sup>b</sup>). La prise en compte de la structure de la végétation devrait donc nous aider à comprendre la répartition des *Myrmica* sur 2 sites en Nouvelle-Aquitaine et leur choix concernant le site de nidification. En effet, d'après Petal (1976 in Dahms *et al.*, 2005) le micro-climat dépend fortement de la hauteur et de la densité de la végétation. Les différentes strates de la végétation et leur densité seront alors étudiés.

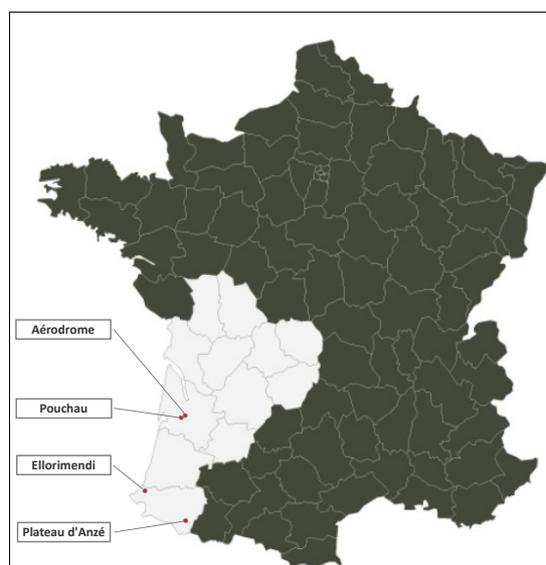
Ainsi, d'après les informations précédentes, on suppose qu'au sein des sites étudiés, les *Myrmica* vont rechercher les zones les plus à l'ombre soit des zones de moyenne ou haute végétation, voire des zones où la végétation a une structure particulière (végétation buissonnante par exemple).

Enfin, il est possible que le changement climatique entraîne la modification des conditions environnementales de façon plus ou moins importante et drastique. Les *Myrmica* étant des fourmis peu agressives (Blatrix *et al.*, 2013), si la modification des conditions environnementales évolue en faveur d'espèces plus agressives, cela pourrait nuire aux populations de *Myrmica*. Les relations interspécifiques seront donc étudiées afin de mettre en évidence des corrélations positives ou négatives entre la présence des *Myrmica* et celle des autres espèces présentes sur les sites étudiés.

## Matériel & Méthodes

### 1-Sites d'étude

Située sur la façade atlantique, la région Nouvelle-Aquitaine s'étend sur plus de 84 000km<sup>2</sup> (**fig. 1**). La région comprend environ 1 738 masses d'eau de surface et 116 souterraine, 720km de côte, plus de 52 000ha de surface protégée par voie réglementaire et un tiers de son territoire est boisé ([Le Treut, 2018](#)). Elle couvre ainsi un grand nombre d'habitats pouvant être étudiés afin de mieux comprendre les impacts du changement climatique sur la biodiversité.



**Figure 1** : Localisation géographique de la zone d'étude et des différents sites étudiés.

Les suivis inscrits dans le cadre du programme « Les Sentinelles du climat » ont débuté en 2017, les sites concernant l'étude des populations d'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon* écotype « alcon ») ont alors été sélectionnés selon 2 conditions, sur l'ensemble du territoire de la région Nouvelle-Aquitaine :

- le site doit présenter une population importante d'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon* écotype « alcon »)
- le site doit présenter une population importante de Gentiane des marais (*Gentiana pneumonanthe*)

Parmi les sites répondant à ces critères, les sites facilement accessibles d'un point de vue réglementaire et technique ainsi que ceux présentant une gestion minimale, ont été sélectionnés afin de limiter les effets extérieurs au changement climatique et de maximiser la collecte de données. Seuls 4 sites ont pu être sélectionnés pour l'étude des populations de l'Azuré des mouillères face au changement climatique en Nouvelle-Aquitaine, l'étude des fourmis-hôtes de ce dernier portera sur ces 4 même sites (**fig. 1, tab. 1**) :

**Tableau 1** : Caractéristiques des sites étudiés.

Site	Caractéristiques	Type de végétation	Code Corine	Infos sur la gestion
Aérodrome	Site basé sur un aérodrome civil au sein de la commune de Léognan (33850)	lande humide atlantique méridionale	31.12	Action de fauche ou de broyage effectuée en 2019
Pouchau	Site situé sous une ligne haute tension dans la commune de Saucats (33650)	Site non suivi par le CBNSA donc aucun relevé de flore ou caractérisation de la végétation n'est disponible		Action de Fauche ou de broyage à l'automne/hiver 2019. La ligne haute tension contraint à un fauche/broyage régulier
Ellorimendi	Site basé sur la commune de Mouguerre (64990)	Pelouse acidiphile thermo-atlantique	35.1	Fauche annuelle tardive
Plateau d'Anzé	Site situé en montagne à 800m d'altitude sur la commune de Laruns (64440)	- pré paratourbeux : prairie à Molinie et communautés associées - communauté à <i>Rynchospora alba</i> et <i>Drosera intermedia</i>	37.31 54.6	Écobuage ponctuel

## 2-Matériel biologique

Il existe 3 espèces de fourmis du genre *Myrmica* (Formicidae, Myrmicinae) reconnues comme hôte potentiel (fig. 2) de l'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon* écotype « alcon ») en Nouvelle-Aquitaine (Blatrix *et al.*, 2013) :

→ ***Myrmica rubra*** (Linnaeus, 1758) : espèce assez ubiquiste, recherche la fraîcheur et l'humidité mais semble éviter les tourbières et fuit les zones trop chaudes. Les nids sont situés sous les pierres, les troncs au sol ou les grosses branches mortes mais peuvent être tout simplement dans la litière

→ ***Myrmica ruginodis*** (Nylander, 1846) : espèce ubiquiste retrouvée aussi bien dans les forêts de feuillus que dans les milieux ouverts. Au dessus de 800m d'altitude, elle remplace *Myrmica rubra* dans les tourbières et milieux herbacés. Les nids sont situés sous les pierres, dans les touffes d'herbe ou de mousse, dans les branches mortes ou les souches mais également dans la litière ou directement dans le sol

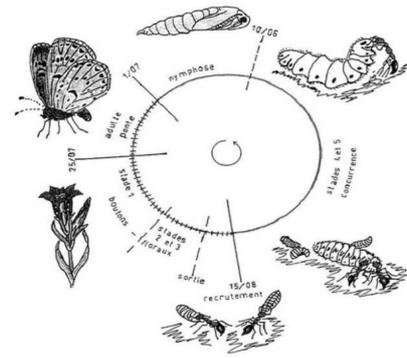
→ ***Myrmica scabrinodis*** (Nylander, 1846) : espèce ubiquiste, on la retrouve dans tous types de milieux ouverts (prairies, landes à bruyères, tourbières...), elle évite les forêts fermées ainsi que les prairies à herbes hautes. Les nids sont situés sous les pierres, dans les souches ou sous l'écorce du bois mort ainsi que dans les amas de mousse ou directement dans le sol. Dans les tourbières et prairies humides, les nids sont dans les touradons ou simplement dans les touffes d'herbe ou de mousse où ils forment de petits dômes de débris végétaux ou de terre visibles entre les herbes.

Plusieurs espèces de *Myrmica* peuvent cohabiter sur un même site. Toutefois, une seule espèce héberge généralement le papillon, d'après (Rozier & Guérin, 2014), l'espèce la plus abondante serait l'hôte principal.

## 3-Suivis sur le terrain

### Protocole – inventaire des espèces de fourmis

Le protocole mis en place sur les 4 sites d'étude est celui issu du Plan National d'Actions en faveur des *Maculinea* « Protocole d'échantillonnage simple permettant d'évaluer la présence et l'importance des *Myrmica* au sein des communautés de fourmis » (Kaufmann *et al.*, 2014). Celui-ci



**Figure 2 :** Cycle de vie de l'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon*, D'après Lhonoré, 1998) : Les imagos émergent début juillet, après accouplement, les femelles pondent sur les boutons floraux de leur plante-hôte (*Gentiana pneumonanthe*). Les œufs éclosent environ une semaine après, les chenilles se nourrissent des bouton floraux de leur plante hôte durant les 3 premiers stades larvaires, puis elles se laissent tomber au sol. Celles-ci ont acquis la capacité de sécréter des hydrocarbures semblables à ceux utilisés lors de la reconnaissance olfactive chez leur fourmis hôte, les fourmis récupèrent alors les chenilles tombées au sol pensant qu'il s'agit d'une de leur larve. Ces dernières sont protégées et nourries comme le couvain par trophallaxie des ouvrières durant 10 mois, elles effectuent donc au sein de la fourmilière les stades larvaires 4 et 5 avant d'entrer en nymphose. Les adultes émergent environ 1 mois après (Thomas & Elmes, 1998).

est biaisé en faveur des *Myrmica* et consiste à déposer des appâts répartis sur le site étudié puis à récolter en 2 passages quelques individus des différentes espèces présentes dans un rayon de 10 cm autour de l'appât. Afin d'assurer l'efficacité du protocole, il doit être réalisé entre le 15/04 et le 15/07 (activité annuelle maximale des fourmis). Les étapes sont les suivantes :



**Figure 3 :** *Myrmica sabuleti* sur l'un des appâts utilisés lors du protocole « inventaire des espèces de fourmis ».

→ La pose des appâts se fait par transect, ceux-ci peuvent être disposés en grille ou de façon linéaire, nous avons choisi d'utiliser seulement des transects linéaires car ils sont plus facile à mettre en œuvre sur le terrain lorsque les sites sont grands. D'après nos hypothèses, la structure de l'habitat joue un rôle important dans la répartition des fourmis, les transects ont donc été positionnés de façon à échantillonner un maximum d'habitats et de micro-habitats différents. Toutefois, ne disposant pas de cartographie d'habitat pour l'ensemble des sites, un repérage des zones d'intérêt est effectué en amont du protocole afin de positionner de façon pertinente les différents transects, et ce dans les zones à forte concentration en Gentiane des marais puisque l'étude s'inscrit dans le cadre du suivi des populations de l'Azuré des mouillères.

→ Les appâts sont constitués d'un carré de feuille bristol (4x4cm) déposé à même le sol ou sur la végétation préalablement aplatie, une portion de rillettes de saumon et une goutte de miel sont déposées côte à côte sur celui-ci. Un pilulier contenant de l'alcool à 70° et portant le même numéro que l'appât est déposé à quelques centimètres de ce dernier, il permettra de stocker les fourmis récoltées lors des deux relevés (**fig. 3**). Afin de récolter suffisamment de données pour obtenir des résultats fiables, le nombre d'appâts installés est fixé à 100 pour chaque site. On estime que l'activité de fourragement des fourmis ne s'étend pas au delà de 2m autour du nid ([Gourvil comm. pers.](#)), les appâts sont donc espacés de 4m sur un même transect.

→ Une mesure de la température, au sol et à l'ombre, est effectuée avant la pose du premier appât et avant le début du 1<sup>er</sup> et du 2<sup>nd</sup> relevé. En effet, on estime que les fourmis sont actives entre 17 et 22°C ([Kaufmann et al., 2014](#)), pour être efficace et représentatif du site étudié, le protocole doit donc être réalisé dans cette fourchette de température.

→ Le prélèvement des espèces s'effectue en deux passages à l'aide d'aspirateur à insecte. Le 1<sup>er</sup> relevé a lieu 30min après la pose du premier appât, le 2<sup>nd</sup> relevé s'effectue 1h après le 1<sup>er</sup> relevé du premier appât. Les relevés des différents appâts se réalisent dans l'ordre de pose des appâts donc de l'appât 1 à l'appât 100. Environ 5 individus de chaque espèces (forme, couleurs, aspects différents) sont prélevés à chaque passage.

## Identification des espèces

Les fourmis prélevées sur le terrain sont placées dans des tubes eppendorf contenant de l'alcool à 95° (meilleure conservation) et étiquetés de la date, du site et du numéro d'appât/nid. Celles-ci sont ensuite identifiées sous une loupe binoculaire à l'aide de la clé issu du guide « Fourmis de France, de Belgique et du Luxembourg » (Blatrix et al., 2013). Un oculaire de grossissement x60 est nécessaire pour l'identification des *Myrmica* qui est plus délicate. Afin de s'assurer de la fiabilité des identifications, les échantillons sont envoyés à un expert (C. GALKOWKI de l'association ANTAREA) pour validation.

Seuls les sites « Pouchau » et « Aérodrome » ont fait l'objet des protocoles suivants :

### Protocole – recherche des nids de *Myrmica*

Par manque de temps et afin d'obtenir des résultats fiables, la recherche des nids est réalisée sur seulement 30 appâts positifs aux *Myrmica* tirés aléatoirement sur chacun des sites. Il s'est avéré que la recherche active des nids, dans un rayon de 2m autour de l'appât, était plus efficace que la traque des fourmis jusqu'au nid (fig. 4) suite à la pose d'appât. La recherche des nids consiste donc à retourner sur le lieu de pose des différents appâts grâce aux points GPS enregistrés lors du protocole « inventaire des espèces de fourmis », et à rechercher activement les nids de *Myrmica* à travers la végétation. Afin de s'assurer de l'espèce, 2 ouvrières ont été récupérées dans chacun des nids localisés puis identifiées. La recherche des nids a été effectuée à deux échelles :



**Figure 4 :** Nid de *Myrmica scabrinodis* présentant un dôme de terre (solarium) bien visible à travers la végétation.

→ à l'échelle du site : sur « Pouchau » et « Aérodrome » afin de relever les paramètres environnementaux

→ à l'échelle des quadrats de suivis : sur les 4 sites concernés, les 2 quadrats de 100m<sup>2</sup> de suivis des pieds de *Gentiana pneumonanthe* et des pontes de *Phengaris alcon*, présents sur chacun des sites ont été séparés en 25 sous-quadrats de 4m<sup>2</sup> au centre desquels un appât a été déposé. Cela permet de focaliser la recherche des nids sur les sous-quadrats dont l'appât est positif et donc d'éviter de fouiller l'entièreté du quadrat de 100m<sup>2</sup>, la recherche des nids étant très chronophage. L'objectif est d'avoir une estimation de la densité de nids sur chacun des 4 sites étudiés et d'avoir un suivi dans le temps de celle-ci afin d'inclure un indicateur « fourmis » facilement reproductible dans le protocole de suivi des pieds de *Gentiana pneumonanthe* et des pontes de *Phengaris alcon*. Ce protocole a également été mis en place car la localisation des nids est parfois impossible,

comme c'est le cas sur les sites « Aérodrôme » et « Ellorimendi ». La technique des appâts permet donc de mettre en évidence la présence de nids de *Myrmica* au sein de ces quadrats de suivis.

### Paramètres environnementaux

Lorsque le nombre de nids était inférieur à 30, le nombre de relevés des paramètres environnementaux a été complété avec des appâts négatifs pour garder le même nombre de relevés entre chaque site afin de maximiser la collecte de données. De même, lorsque les nids n'étaient pas localisables, le relevé a été effectué à l'endroit où l'appât a été déposé lors du protocole « inventaire des fourmis ».

#### Autour du nid :

L'activité de fourragement des fourmis étant limitée à 2m autour du nid ([Gourvil comm. pers.](#)), des quadrats de 4m<sup>2</sup> sont utilisés pour le relevé des paramètres environnementaux. Pour faciliter l'estimation des paramètres, le quadrat de 4m<sup>2</sup> est séparé en 4 sous-quadrats de 1m<sup>2</sup> à l'aide de cordes. Le centre du quadrat est placé au dessus du nid pour les appâts positifs aux *Myrmica* et dont le nid a pu être localisé, pour ceux dont le nid n'a pu être localisé ainsi que pour ceux dont l'appât était négatif, le centre du quadrat est positionné à l'endroit où l'appât a été posé lors du protocole « inventaire des fourmis ». Les paramètres environnementaux suivants ont été relevés :

- le pourcentage de recouvrement de la litière ;
- l'épaisseur moyenne de la litière lorsqu'elle est présente : mesurée au centre de chaque sous-quadrat afin d'obtenir des mesures standardisées ;
- l'épaisseur moyenne de la couche cryptogamique lorsqu'elle est présente : mesurée au centre de chaque sous-quadrat afin d'obtenir des mesures standardisées ;
- le pourcentage de recouvrement des différentes strates sur la base 6 classes d'après l'étude de ([Boitier, 2005 in Le Falher, 2018](#)) :

**Tableau 2 :** Classes de végétation et végétation associée d'après [Boitier \(2005 in Le Falher, 2018\)](#).

<b>Classe 1</b>	recouvrement en sol nu et rocher/cailloux
<b>Classe 2</b>	recouvrement cryptogamiques (lichens et bryophytes)
<b>Classe 3</b>	strate herbacée basse (végétation <10cm)
<b>Classe 4</b>	strate herbacée moyenne (végétation entre 10 et 50cm) strate arbustive basse (végétation <50cm)
<b>Classe 5</b>	strate herbacée haute (végétation >50cm) et strate arbustive moyenne (végétation entre 50cm et 200cm)
<b>Classe 6</b>	strate arbustive haute (végétation >200cm) et strate arborée

La classe 6 n'étant présente sur aucun des relevés, elle ne sera pas prise en compte dans les analyses. De même, la classe 2 n'est pas présente sur le site « Pouchau » et la présence de litière n'a pas été relevée sur le site « Aérodrôme ».

#### Au dessus du nid :

Les paramètres environnementaux suivants ont été relevés dans un rayon de 10cm autour du nid :

- le type de végétation présente au dessus du nid (graminée, arbuste, chaméphyte, litière, mousse, sol nu) et leur pourcentage de recouvrement ;
- l'épaisseur moyenne de la litière lorsqu'elle est présente : mesurée à 4 points différents autour du nid ;
- l'épaisseur moyenne de la couche cryptogamique lorsqu'elle est présente : mesurée à 4 points différents autour du nid.

#### 4-Analyses statistiques

L'ensemble des analyses ont été réalisées sous le logiciel **R 3.5.3**, elles nécessitent l'utilisation des packages **ade4** pour les analyses descriptives, **RVAideMemoire**, **MuMIn** et **car** pour les analyses univariées, et **pvclust** pour les analyses multivariées.

→ Concernant l'inventaire des fourmis hôtes, une ACP a été réalisée sur la base des paramètres environnementaux étudiés, afin d'illustrer la végétation caractérisant les sites et déterminer si celle-ci est en accord avec les résultats de l'inventaire. Les données étant de type compositionnelles, les variables « classe\_4 » et « sol nu » ont été retirées pour éviter la redondance d'information, celles-ci étant peu variable au niveau intra et inter-sites.

→ Des analyses univariées de type GLM ont été utilisées afin de comprendre l'influence de la structure de la végétation présente autour du nid sur la présence des *Myrmica* sur les sites « Pouchau » et « Aérodrome ». L'espèce de *Myrmica* dominante étant différente entre les sites, les analyses ont été effectuées séparément. La variable réponse est binaire (présence-absence de *Myrmica*), les conditions du modèle étant vérifiées pour « Pouchau » (linéarité du modèle et relation V-mu) la loi « Binomiale » et la fonction de lien « logit » ont été utilisées, le critère associé pour la sélection de modèle est donc « AICc » et le test effectué par la suite est le « LRtest ». En revanche, la relation V-mu n'étant pas valide pour le site « Aérodrome », la loi « quasi-binomiale » et la fonction de lien « logit » ont été utilisées, le critère associé pour la sélection de modèle est donc « QAICc » et le test effectué par la suite est le « Test F ». Les données étant de type compositionnelles, la variable « sol\_nu » a été retirée lors de l'analyse des 2 sites puisqu'elle est très peu variable par rapport aux autres paramètres relevés.

→ Une Classification Ascendante Hiérarchique a été réalisée afin de déterminer si des nids se distinguent selon les paramètres environnementaux relevés et ainsi mettre en évidence une structure de la végétation particulière au dessus du nid. Les données sont présentées sous forme

de tableau de variables toutes quantitatives, la matrice de distance utilisée est donc euclidienne. Le protocole des appâts est un échantillonnage systématique mais ceux pour lesquels la recherche des nids a été réalisée ont été choisis aléatoirement, la méthode d'agglomération utilisée est donc « UPGMA ». Une Analyse en Composante Principale a également été réalisée pour compléter la CAH. Les données sont de type compositionnelles, la variable « chaméphyte » a donc été retirée, la valeur de celle-ci étant soit de 0% soit de 5%. Les effectifs de ces 2 valeurs ont par la suite été comparés afin de déterminer si la présence de chaméphyte est recherchée par les fourmis. Le nombre de relevés étant inférieur à 200, c'est le « Test multinomial exact » qui a été utilisé. Aucun nid n'ayant été localisé sur le site « Aérodrome », ces analyses ne concernent que le site « Pouchau ».

→ Enfin, des comparaisons d'effectifs ont été réalisées afin de déterminer si la présence de *Myrmica* est corrélée positivement ou négativement à la présence d'autres espèces. Le nombre de données étant inférieur à 200, le « Test multinomial exact » a été utilisé. Ces données étant disponibles pour les 4 sites, ces analyses ont été réalisées séparément pour les 4 sites.

## Résultats

### 1-inventaire des espèces de fourmis

Au total, 15 espèces de fourmis ont été inventoriées sur l'ensemble des 4 sites étudiés. Les sites présentant la plus grande diversité sont « Pouchau » et « Ellorimendi » avec 9 espèces inventoriées, puis « Plateau d'Anzé » avec 8 espèces et enfin « Aérodrome » avec seulement 3 espèces (**tab. 3**).

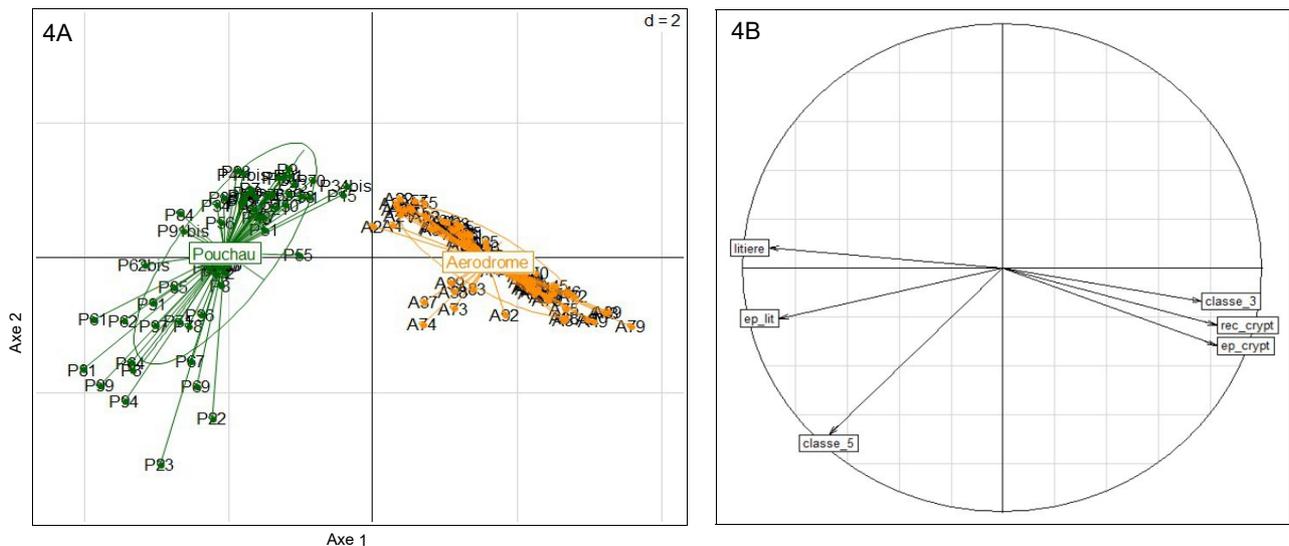
Concernant les *Myrmica*, 3 espèces ont été recensées : *Myrmica scabrinodis*, *Myrmica ruginodis* et *Myrmica sabuleti*. Les 3 espèces sont retrouvées presque systématiquement sur les sites étudiés avec une dominance de *Myrmica scabrinodis*, à l'exception du site « Aérodrome » où seule *Myrmica sabuleti* a été recensée. C'est sur le site de « Pouchau » que *Myrmica scabrinodis* était la plus abondante, avec 52% des appâts positifs contre 31% à « Ellorimendi » et seulement 23% au « Plateau d'Anzé » (**tab. 3**).

**Tableau 3** : Espèces de fourmis recensées sur chacun des sites étudiés et le pourcentage associé d'appât positif à l'espèce.

	Aérodrome	Pouchau	Ellorimendi	Plateau d'Anzé
<i>Myrmica scabrinodis</i>	0	52	31	23
<i>Myrmica sabuleti</i>	17	2	11	0
<i>Myrmica ruginodis</i>	0	3	0	8
<i>Tapinoma erraticum</i>	48	35	69	70
<i>Tetramorium gr. caespitum-impurum</i>	23	1	5	1
<i>Lasius platythorax</i>	0	10	22	9
<i>Lasius paralienus</i>	0	0	12	0

<i>Formica cunicularia</i>	0	29	27	8
<i>Formica fusca</i>	0	0	0	29
<i>Formica rufibarbis</i>	0	0	5	0
<i>Formica rufa</i>	0	0	0	5
<i>Formica exaecta</i>	0	0	0	5
<i>Camponotus vagus</i>	0	7	0	0
<i>Aphaenogaster subterranea</i>	0	2	0	0
<i>Plagioleopsis pygmaea</i>	0	0	11	0

Des relevés de végétation ayant été réalisés pour les sites « Pouchau » et « Aérodroome », une Analyse en Composante Principale (ACP) a été réalisée sur la base de ces relevés pour comprendre les différences observées lors de l'inventaire des fourmis.



**Figure 5 :** Résultats de l'Analyse en Composante Principale (ACP) réalisée sur les relevés de végétation pour les sites « Pouchau » et « Aérodroome ». Seuls les deux premiers axes ont été gardés car il expliquent 77.25 de la variance. Les valeurs de contribution absolues des 5 variables « herbacées basses » (classe\_3), « herbacées haute et arbustes moyens » (classe\_5), « litière » (litiere), « épaisseur de litière » (ep\_lit), « couche cryptogamique » (rec\_crypt) et « épaisseur de la couche cryptogamique » (ep\_crypt) sont respectivement de 14.84, 11.39, 20.54, 18.83, 17.20 et 17.20 pour l'axe 1 et 2.68, 67.47, 1.01, 6.16, 14.70 et 7.95 pour l'axe 2. D'après le cercle des corrélations (B) et les valeurs de contribution absolue, l'axe 1 sur le graphique des individus (A) est représenté par les variables « litière » et « épaisseur de litière » avec une augmentation de celles-ci de droite à gauche, et par les variables « couche cryptogamique » et « épaisseur de la couche cryptogamique » avec une augmentation de celles-ci de gauche à droite. L'axe 2 est quant à lui représenté uniquement par la variable « herbacées hautes » avec une augmentation de celle-ci de haut en bas.

D'après le **figure 5B**, les variables « litière », « épaisseur de litière » et « classe\_5 » sont positivement corrélées, tandis que les variables « couche cryptogamique » et « épaisseur de la couche cryptogamique » sont fortement positivement corrélées. A l'inverse, la variable « litière » semble négativement corrélée aux variables « couche cryptogamique » et « épaisseur de la couche cryptogamique ». En effet, les structures de végétation des sites « Pouchau » et « Aérodroome » sont bien distinctes, et la litière fortement présente à « Pouchau » semble absente du site « Aérodroome » et remplacée par la couche cryptogamique qui est elle-même absente du site « Pouchau ». Enfin, le site « Pouchau » est plutôt caractérisé par une végétation de classe 5, très présente dans certains relevés mais moins bien représentée dans d'autres, tandis qu'elle est peu représentée sur le site « Aérodroome » qui semble plutôt caractérisé par une végétation de classe 3

même si toutefois celle-ci est mal représentée par les analyses.

Il est probable que ces différences dans la structure de végétation explique la différence entre les espèces de *Myrmica* observées sur chacun des sites.

## 2-Densité de nids dans les quadrats de suivis

Afin d'ajouter l'indicateur « fourmis » dans le suivi annuel des pieds de *Gentiana pneumonanthe* et des pontes de *Phengaris alcon*, une recherche des nids présents dans les quadrats de suivis (2 quadrats de 100m<sup>2</sup> par site) a été réalisée. Les résultats sont présentés **tableau 4**. Le manque de temps n'a pas permis de localiser les nids pour les quadrats 2 des sites « Ellorimendi » et « Plateau d'Anzé ». Toutefois, la pose d'appât pour faciliter la recherche des nids a révélé 12 appâts positifs pour le site « Ellorimendi », cela indique que des nids de *Myrmica* sont bien présents dans les quadrats de suivis, tandis que tous les appâts se sont révélés négatifs sur le site « Aérodrome », aucun nid n'est donc présent dans les quadrats de suivis sur ce site.

**Tableau 4** : Densité de nids de *Myrmica* (pour 100m<sup>2</sup>) dans les quadrats de suivis des pieds de *Gentiana pneumonanthe* et des pontes de *Phengaris alcon* pour chacun des sites étudiés.

	Aérodrome	Pouchau	Ellorimendi	Plateau d'Anzé
Quadrat 1	0	5	0	12
Quadrat 2	0	0	NA	NA

## 3-Analyses des variables environnementales autour du nid

Dans l'optique de déterminer quelles variables contribuent à la répartition des *Myrmica* au sein des sites, des analyses par Modèles Linéaires Généralisés (GLM) ont été réalisées pour les sites « Pouchau » et « Aérodrome ». La structure de végétation et l'espèce de *Myrmica* dominante étant différente entre les sites, les GLM ont été réalisés séparément.

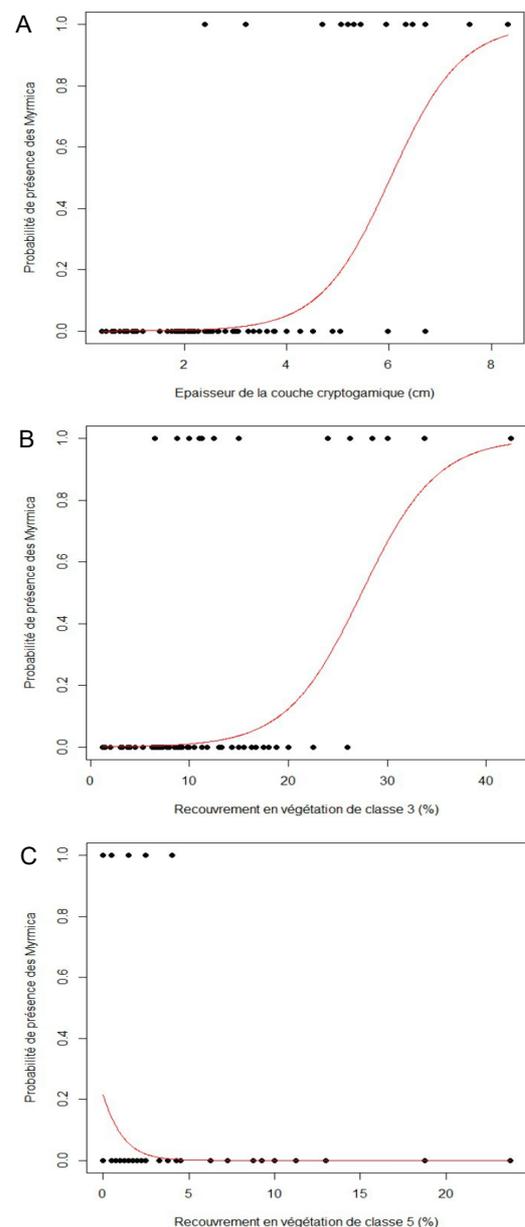
### Aérodrome

**Tableau 5** : Résultats du Modèle Linéaire Généralisé (GLM) pour le site « Aérodrome ». La présence des *Myrmica* a été analysée en fonction des variables suivantes : épaisseur de la couche cryptogamique (ep\_crypt), herbacées basses (classe\_3), herbacées hautes et arbustes moyens (classe\_5), herbacées moyennes et arbustes bas (classe\_4) et recouvrement de la couche cryptogamique (rec\_crypt). Quatre modèles ont été sélectionnés (delta<2).

	(Int)	ep_crypt	classe_3	classe_5	classe_4	rec_crypt	df	logLik	AICc	delta	weight
1	-9.7470	1.416	0.2159				3	-14.365	20.0	0.00	0.195
2	-9.1520	1.320	0.2923	-0.9239			4	-12.155	20.5	0.53	0.149
3	-6.5250	1.312					2	-18.979	21.4	1.44	0.095
4	-5.3470	1.208		-0.5333			3	-16.564	21.7	1.75	0.081

La variable « épaisseur de la couche cryptogamique » est présente dans les 4 modèles retenus, tandis que les autres variables ne sont présentes que dans deux modèles. Les variables « classe\_4 » et « recouvrement de la couche cryptogamique » ne sont quant à elles présentes dans aucun des modèles sélectionnés, il semble donc qu'elles n'interviennent pas dans la répartition

des *Myrmica* au sein du site (**tab. 5**). Les valeurs d'importance calculées à partir du « Model averaging » réalisé sur ces 4 modèles, indiquent que la variable « épaisseur de la couche cryptogamique » contribue à 100% à expliquer la répartition des *Myrmica* sur le site, contre 66% pour la variable « classe\_3 » et 44% pour la variable « classe\_5 ». En effet, la probabilité de présence des *Myrmica* augmente significativement avec l'épaisseur de la couche cryptogamique ( $P < 0.0027$  d'après le test F du « Model averaging » ; **fig. 6A**) avec une probabilité de présence de 50% pour environ 6 cm et 100% pour environ 8 cm. Celle-ci semble également augmenter avec la végétation de classe 3 mais de façon non significative, une probabilité de présence des *Myrmica* de 50% pour environ 28% de recouvrement et 100% pour environ 40% de recouvrement (**fig. 6B**). À l'inverse, celle-ci diminue avec l'augmentation de la végétation de classe 5 mais également de façon non significative, la probabilité de présence des *Myrmica* tombe à 0% pour à peine 3% de recouvrement (**fig. 6C**).



**Figure 6** : Prédictions réalisées à partir du modèle du site « Aérodrome » (tab.5). Probabilité de présence des *Myrmica* en fonction des variables environnementales « épaisseur de la couche cryptogamique » (A), « classe\_3 » (B) et « classe\_5 » (C), la valeur des autres variables pour la prédiction est fixée à leur valeur moyenne.

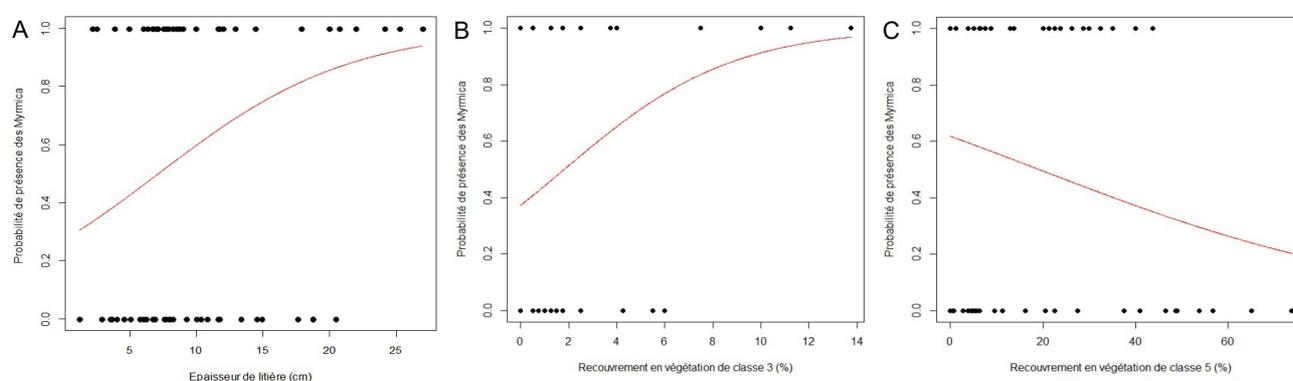
## Pouchau

**Tableau 6** : Résultats du Modèle Linéaire Généralisé (GLM) pour le site « Pouchau ». Les variables utilisées sont les suivantes : épaisseur de la litière (ep\_lit), herbacées basses (classe\_3), herbacées hautes et arbustes moyens (classe\_5), herbacées moyennes et arbustes bas (classe\_4) et litière (litière). Quatre modèles ont été sélectionnés ( $\Delta < 2$ ).

	(Int)	ep_lit	classe_3	classe_5	classe_4	litière	df	logLik	AICc	delta	weight
1	-1.8310	0.1223	0.3282				3	-36.668	79.8	0.00	0.214
2	-1.5650	0.1452	0.2886	-0.0242			4	-35.798	80.3	0.56	0.162
3	-2.7960	0.1428	0.3307		0.0167		4	-36.160	81.0	1.28	0.113
4	-2.3910	0.1094	0.3264			0.0215	4	-36.491	81.7	1.94	0.081

Les variables « épaisseur de la litière » et « classe\_3 » sont présentes dans les quatre modèles retenus, tandis que les autres variables ne sont présentes que dans un modèle (**tab. 6**). Les valeurs d'importance calculées à partir du « Model averaging » réalisé sur ces 4 modèles,

indiquent que les variables « épaisseur de la litière » et « classe\_3 » contribuent à 100% à expliquer la répartition des *Myrmica* sur le site, contre 28% pour la variable « classe\_5 », 20% pour la variable « classe\_4 » et 14% pour la variable « litière ». En effet, la probabilité de présence des *Myrmica* augmente significativement avec l'épaisseur de la litière ( $P < 0.0362$  d'après le LRtest du « Model averaging »; **fig. 7A**), avec une probabilité de présence des *Myrmica* de 50% à environ 7cm de litière et quasiment 100% à environ 30cm. Celle-ci semble également augmenter avec la végétation de classe 3 mais de façon non significative avec une probabilité de présence des *Myrmica* de 50% pour environ 1% de recouvrement et quasiment 100% pour environ 14% de recouvrement (**fig. 7B**). A l'inverse, elle diminue avec l'augmentation de la végétation de classe 5 hautes également de façon non significative avec une probabilité de présence des *Myrmica* de 50% pour environ 18% de recouvrement (**fig. 7C**).



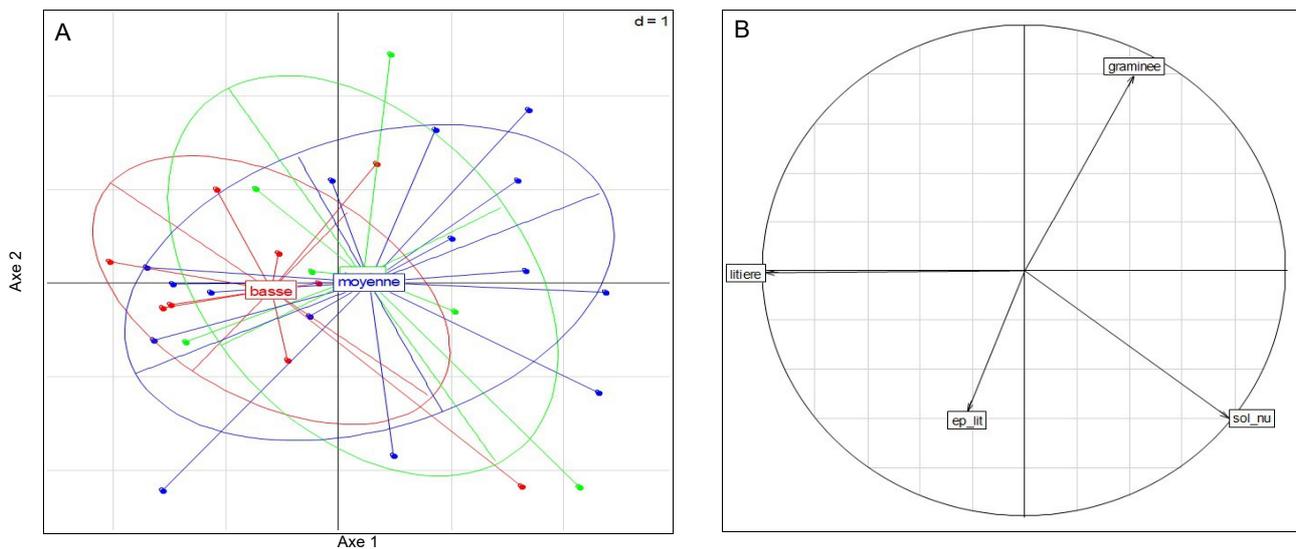
**Figure 7** : Prédictions réalisées à partir du modèle du site « Pouchau » (tab.6). Probabilité de présence des *Myrmica* en fonction des variables environnementales « épaisseur de la couche cryptogamique » (A), « classe\_3 » (B) et « classe\_5 » (C), la valeur des autres variables pour la prédiction est fixée à leur valeur moyenne.

#### 4-Analyses des variables environnementales au dessus du nid

Dans le but de déterminer les caractéristiques environnementales recherchées par les *Myrmica* concernant le site de nidification, une Analyse en Composante principale (ACP) et une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ont été réalisées sur les paramètres environnementaux relevés au dessus des nids.

Les analyses n'ont pas permis de mettre en évidence une structure de végétation particulière présente au dessus des nids. En effet, d'après le graphique des individus (**fig. 8A**), aucun nid ne semble similaire sur la base de ces paramètres environnementaux. C'est également ce que les résultats de la Classification Ascendante hiérarchique (CAH), réalisée sur ces mêmes paramètres, ont montré en établissant un total de 11 groupes. De plus, d'après le cercle des corrélations (**fig. 8B**) aucune des variables ne semblent corrélées.

Toutefois, la hauteur des nids ayant été relevée, et celle-ci étant relativement variable entre les nids, il est possible que les fourmis adaptent la hauteur de leur nid à la structure de la végétation



**Figure 8** : Résultats de l'Analyse en Composante Principale (ACP) réalisée sur les relevés de végétation au dessus des nids à « Pouchau ». Seuls les deux premiers axes ont été gardés car il expliquent 78.38 de la variance. Les valeurs de contribution absolues des 4 variables « graminée » (graminée), « sol nu » (sol\_nu), « litière » (litiere) et « épaisseur de litière » (ep\_lit) sont respectivement de 9.62, 54.18, 33.63 et 2.64 pour l'axe 1 et 47.98, 0.00, 27.16 et 24.83 pour l'axe 2. D'après le cercle des corrélations (B) et les valeurs de contribution absolue, l'axe 1 sur le graphique des individus (A) est représenté par la variable « litière » avec une augmentation de celle-ci de droite à gauche, et par la variable « sol nu » avec une augmentation de celle-ci de gauche à droite. L'axe 2 est quant à lui représenté uniquement par la variable « graminée » avec une augmentation de celle-ci de bas en haut, et par la variable « sol\_nu » avec une augmentation de celle-ci de haut en bas. Les classes de hauteur « basse », « moyenne » et « haute » ont été ajoutées.

du site de nidification choisi afin d'obtenir des conditions micro-climatiques désirées au sein du nid. La hauteur du nid a donc été séparée en 3 classes « basse », « moyenne » et « haute » d'intervalles égaux qui ont ensuite été ajoutées sur l'ACP afin de déterminer s'il existe une influence potentielle de la végétation sur la hauteur des nids. Cependant, les 3 classes apparaissent superposées sur la **figure 8A**, la hauteur des nids ne semble donc pas être influencée par la structure de la végétation.

Concernant le « Test multinomial exact », l'effectif de nid présentant des chaméphytes n'est pas significativement différent de l'effectif de nid n'en présentant pas ( $P = 0.098$ ).

### 5-Analyses des relations biotiques entre les *Myrmica* et les autres espèces recensées

Des tests de comparaison des effectifs (correspondant au nombre d'appât où l'espèce a été observée) ont été réalisés afin de déterminer si la présence des *Myrmica* peut également être liée à la présence ou l'absence d'autres espèces. Les effectifs suivant ont été comparés par site (**tab. 7**). Les résultats du « Test multinomial exact » pour le site « Aérodrome » ont montré que les effectifs entre *Myrmica sabuleti* seule ou avec *Tapinoma erraticum* n'était pas significativement différents ( $p = 0.332$ ). En revanche, il y a significativement plus de *Myrmica sabuleti* retrouvées seules qu'avec *Tetramorium gr caespitum-impurum* ( $P = 0.046$ ).

Concernant le site « Pouchau », la présence de *Myrmica scabrinodis* ne semble pas influencée par la présence de *Tapinoma erraticum* et *Formica cunicularia*, les effectifs en présence de ces espèces

n'étant significativement pas différent ( $P > 0.050$ ). Cependant, les effectifs de *Myrmica scabrinodis* seule sont significativement plus importants qu'en présence de *Tetramorium gr caespitum-impurum* ( $P < 0.005$ ), *Lasius platythorax* ( $P = 0.003$ ), *Camponotus vagus* ( $P < 0.005$ ) et *Aphaenogaster subterranea* ( $P < 0.005$ ).

Sur le site « Ellorimendi », les effectifs entre *Myrmica scabrinodis* seule et avec une autre espèce ne sont pas significativement différents ( $P > 0.050$ ) à l'exception de *Tapinoma erraticum* où l'effectif est significativement plus important que lorsque *Myrmica scabrinodis* est seule ( $P < 0.005$ ).

Les résultats concernant le site « Plateau d'Anzé » sont similaires à ceux du site « Ellorimendi », seuls les effectifs de *Tapinoma erraticum* en présence de *Myrmica scabrinodis* sont significativement supérieurs à ceux où *Myrmica scabrinodis* est seule ( $P = 0.019$ ).

**Tableau 7** : Effectifs correspondants au nombre d'appâts où l'espèce de *Myrmica* dominante (*Myrmica sabuleti* sur le site « Aérodrome » et *Myrmica scabrinodis* sur les sites « Pouchau », « Ellorimendi » et « Plateau d'Anzé ») a été retrouvée seule et en présence des autres espèces recensées sur chacun des sites.

	Aérodrome	Pouchau	Ellorimendi	Plateau d'Anzé
<i>Myrmica</i> seule	6	19	3	3
<i>Tapinoma erraticum</i>	11	12	22	14
<i>Tetramorium gr. caespitum-impurum</i>	0	0	0	1
<i>Lasius platythorax</i>	X	4	1	1
<i>Lasius paralienus</i>	X	X	1	X
<i>Formica cunicularia</i>	X	15	8	4
<i>Formica fusca</i>	X	X	X	6
<i>Formica rufibarbis</i>	X	X	1	0
<i>Formica rufa</i>	X	X	X	0
<i>Formica exaecta</i>	X	X	X	X
<i>Camponotus vagus</i>	X	2	X	X
<i>Aphaenogaster subterranea</i>	X	0	X	X
<i>Plagiolepis pygmaea</i>	X	X	3	X

## Discussion

### Résultats

#### 1-Inventaire des espèces de fourmis

Les inventaires ont permis de recenser un total de 3 espèces de *Myrmica* (**tab. 3**), *Myrmica scabrinodis* est l'espèce dominante retrouvée sur les sites « Pouchau », « Ellorimendi » et « Plateau d'Anzé », au vu de l'écologie de cette espèce, ces résultats sont tout à fait cohérents. De même pour *Myrmica ruginodis*, retrouvée sur les sites « Pouchau » et « Plateau d'Anzé » seulement, elle semble en effet éviter les milieux un peu plus chauds et secs comme c'est le cas sur les sites « Aérodrome » et « Ellorimendi ». Enfin, une 3ème espèce a été recensée sur les sites « Aérodrome », « Pouchau » et « Ellorimendi », il s'agit de *Myrmica sabuleti*, une espèce assez xérique qui affectionne les milieux ouverts (Blatrix *et al.*, 2013 ; Galkowski & Lebas), celle-ci évite

les sols ombragés et trop humides, ce qui explique sa présence sur ces sites (le site « Pouchau » ne semble toutefois pas approprié à l'espèce mais cette dernière ne représente que 1% des appâts). En effet, les résultats de l'ACP (**fig. 5**) montrent que le site « Aérodrome », identifié comme lande humide atlantique méridionale, est caractérisé par une végétation basse (classe 3) assez présente contrairement à la végétation haute (classe 5), et le recouvrement en espèces cryptogamiques est important sur la plupart des relevés, le milieu est donc très ouvert. En période estivale, on se retrouve alors dans des conditions environnementales plutôt chaudes et sèches ce qui correspond parfaitement à l'écologie de *Myrmica sabuleti*. A l'inverse, le site « Pouchau » est caractérisé par une végétation haute (classe 5) et un recouvrement en litière assez important, on est donc sur un milieu ouvert très ombragé ce qui évite l'augmentation trop importante des températures au sol en période estivale, ce qui expliquerait la forte présence de *Myrmica scabrinodis* et la quasi-absence de *Myrmica sabuleti*.

D'après [Rozier & Guérin \(2014\)](#), il existe une adaptation locale du papillon à l'espèce de fourmis hôte la plus abondante dans le milieu. Ainsi, il semblerait que *Myrmica scabrinodis* soit l'espèce hôte principale de *Phengaris alcon* sur les sites « Pouchau », « Ellorimendi » et « Plateau d'Anzé ». En effet, *Myrmica scabrinodis* est connu comme étant l'hôte principal de *Phengaris alcon* ([Gourvil et al., 2019](#)), notamment en Nouvelle-Aquitaine. Cependant, la présence seule de *Myrmica sabuleti* sur le site « Aérodrome » est intrigante. En effet, cette espèce n'est pas reconnue comme hôte potentiel de *Phengaris alcon*. Toutefois, il existe une donnée datant de 2018, de *Myrmica sabuleti* comme hôte de *Phengaris alcon* dans les Pyrénées Ariégeoises et il semblerait que *Myrmica sabuleti* remplace *Myrmica scabrinodis* lorsque le milieu ne lui est pas favorable ([Gourvil et al., 2019](#)). Sachant que la population de *Phengaris alcon* se maintient sur le site « Aérodrome », il est donc très probable que *Myrmica sabuleti* soit l'hôte principal de celui-ci sur ce site.

## 2-Densité de nids dans les quadrats de suivis

Aucun nid n'a pu être localisé sur les sites « Aérodrome » et « Ellorimendi » (pas de solarium formé par les *Myrmica*, entrées des nids probablement à même le sol). Cependant, la pose d'appât a permis de mettre en évidence la présence de *Myrmica* dans les quadrats de suivis sur le site « Ellorimendi » avec 12 appâts positifs aux *Myrmica* contre 0 sur le site « Aérodrome », il semble donc que les *Myrmica* ne soit pas présentent dans les quadrats de suivis sur ce site. Les nids n'étant pas localisables sur ces sites, il n'est pas possible de suivre la densité des nids de *Myrmica* dans le temps. Toutefois, la méthode de la pose des appâts dans les 25 sous-quadrats permet de suivre l'évolution de la présence des *Myrmica* dans les quadrats de suivis.

Finalement, le site « Pouchau », qui semblait être le plus favorable aux *Myrmica* (52% des appâts positifs aux *Myrmica*), présente des densité de nids au m<sup>2</sup> relativement faible avec seulement 0,05 nid/m<sup>2</sup> pour le quadrat n°1 et 0,01 nid/m<sup>2</sup> pour le quadrat de suivi n°2 (**tab. 4**). D'après [Belenguier et ses collaborateurs \(2020\)](#), les densités de *Myrmica scabrinodis* en milieu humide issues de la bibliographie sont les suivantes : 0.25, 0.39, 0.34 et 0.37 nid/m<sup>2</sup> (Rozier, 1999) ; 0.48-0.65 nid/m<sup>2</sup> (Thomas, 1984) et >0.8 nid/m<sup>2</sup> (Whynoff, 1996). La densité de nids observée sur le site « Pouchau » est donc faible par rapport aux résultats issus de la bibliographie. De même, la densité de nids obtenue sur le site « Plateau d'Anzé » est de 0.12 nid/m<sup>2</sup> soit deux fois plus de nids que dans le quadrat de suivis n°1 du site « Pouchau » qui présentait pourtant 52% d'appâts positifs aux *Myrmica* contre seulement 23% pour le site « Plateau d'Anzé ». Cependant, d'après [Elmes \(1974 in Forgeot 2007\)](#), les fourmis montrent une tendance agrégative aux endroits propices, ce qui pourrait expliquer les résultats obtenus pour le site « Plateau d'Anzé ». De plus, d'après [Louveaux et ses collaborateurs \(2004\)](#), une distribution au hasard des fourmis au sein d'un habitat pourrait signifier que le milieu est homogène, ce qui est potentiellement le cas sur le site « Pouchau » au vu des différents résultats obtenus. Ainsi, il serait intéressant de déterminer le type de répartition des *Myrmica* sur chacun des sites, par exemple avec l'indice de dispersion de Henry (2001 ; [Louveaux et al., 2004](#)). Cela permettrait de déterminer si les densités obtenues dans les quadrats de suivis sont représentatives des sites étudiés puisque celles-ci seront potentiellement très différentes entre une zone d'agrégation et le reste du site (il faudrait donc éventuellement ajouter un troisième quadrat de suivi afin de pouvoir suivre l'évolution des densités dans la zone d'agrégation et en dehors). En effet, une distribution de type agrégative indiquerait la présence d'un micro-habitat plus favorable au développement des *Myrmica*, cela permettrait dans un premier temps de comparer les paramètres environnementaux entre les zones d'agrégation et de non agrégation afin de mieux caractériser les variables environnementales qui conditionnent la répartition des *Myrmica* et de leur nid. Ensuite, cela permettrait de suivre l'évolution des populations de *Myrmica* sous la pression du changement climatique, dans des habitats d'optimum différent, et donc de comprendre comment celles-ci peuvent être impactées et ainsi évaluer l'impact de celui-ci sur les populations de *Phengaris alcon* via l'état de santé des populations de *Myrmica* dont elles dépendent.

### 3-Analyses des variables environnementales autour du nid

#### Aérodrome

D'après les analyses GLM (**tab. 5**), les variables « classe\_4 » et « recouvrement de la couche cryptogamique » ne semblent pas intervenir dans la répartition de *Myrmica sabuleti* au sein du

site. Cependant, d'autres études ont montré que les *Myrmica* recherchaient la présence de la couche cryptogamique, [Le Falher \(2018\)](#) montre notamment que la probabilité de présence de *Myrmica sabuleti* augmente avec le recouvrement de la couche cryptogamique. Toutefois, le recouvrement de cette dernière était important dans la plupart des relevés, ce qui explique les résultats obtenus par les analyses GLM, l'ensemble du site est donc favorable aux *Myrmica* du point de vue de cette variable. Concernant les autres variables environnementales, il semblerait que la probabilité de présence de *Myrmica sabuleti* diminue avec l'augmentation de la variable « classe\_5 » mais de façon non significative (cette variable étant très peu représentée sur ce site ; **fig. 6C**). En effet, *Myrmica sabuleti* est une espèce assez xérique ([Blatrix et al., 2013](#)), la variable « classe\_5 » étant surtout représentée par des ajoncs, il est possible que celle-ci procure un ombrage trop important rendant les conditions micro-climatiques défavorables au développement des *Myrmica sabuleti*. A l'inverse, la probabilité de présence de *Myrmica sabuleti* augmente significativement avec la variable « épaisseur de la couche cryptogamique » (**fig. 6A**) et de façon non significative avec la variable « classe\_3 » (**fig. 6B**), elle rechercherait donc une épaisseur importante de la couche cryptogamique. En effet, ce site présente un milieu très ouvert à végétation basse (classe 3), et aucun élément paysager susceptible de perturber l'insolation n'est présent, les températures au sol peuvent donc devenir très importantes. Ainsi, comme il est indiqué dans le protocole utilisé pour l'inventaire des espèces de fourmis, celles-ci ne sont actives qu'entre 15 et 22°C, l'augmentation de l'épaisseur de la couche cryptogamique aurait donc pour effet de limiter l'augmentation trop importante de la température au sol, permettant ainsi aux fourmis de rester actives plus longtemps. De même, d'après [Faurie et ses collaborateurs \(2011 in Mallard, 2016\)](#), la température et l'humidité conditionnent directement la répartition des organismes et le développement des populations, une épaisseur importante de la couche cryptogamique permettrait donc de garder un certain taux d'humidité. La probabilité de présence de *Myrmica sabuleti* augmente également avec la variable « classe\_3 ». Dans un premier temps, la présence de végétation de classe 3 est probablement recherchée par les *Myrmica sabuleti* pour les mêmes raisons que l'épaisseur de la couche cryptogamique, celles-ci procurant un ombrage bien moins important que la végétation de classe 4 ou classe 5 mais probablement suffisant pour modifier les conditions micro-climatiques en faveur des *Myrmica*. Ensuite, les variables « classe\_5 » et « classe\_4 » sont surtout représentées par la végétation chaméphytique et *Molinia caerulea*, tandis que la variable « classe\_3 » est globalement représentée par diverses plantes herbacées telles que *Potentilla erecta*, *Cirsium dissectum*, *Scorzonera humilis*... La présence de cette strate apporte donc une diversité floristique supplémentaire à laquelle est associée une

diversité faunistique, notamment des arthropodes dont se nourrissent les *Myrmica* (Blatrix *et al.*, 2013). Il est donc possible que sa présence soit recherchée en raison d'une meilleure disponibilité de la ressource alimentaire. En effet, d'après Dauber & Wolters (2000 in Dahms *et al.*, 2005), les communautés de fourmis sont structurées par les caractéristiques de la végétation en fonction de l'abondance des proies. La couche cryptogamique devrait elle aussi fournir une certaine diversité en arthropodes mais il est possible que le déplacement au sein de celle-ci soit difficile et donc plus coûteux en énergie.

### Pouchau

D'après les analyses GLM (**tab. 6**), les variables « classe\_4 » et « litière » contribuent peu à l'explication de la répartition de *Myrmica scabrinodis* au sein du site. En effet, comme pour le site précédent, ces variables sont très bien représentées sur l'ensemble du site et leur valeur est relativement peu variable entre chaque relevés. Ainsi, l'ensemble du site est favorable aux *Myrmica* du point de vue de ces variables d'où les résultats obtenus par les analyses GLM (relation positive entre la présence de *Myrmica* et ces variables ; **tab. 6**). Concernant la variable « classe\_5 », les résultats obtenus sont les mêmes que pour le site « Aérodrome » (**fig. 7C**). En effet, il semblerait que même pour une espèce moins xérique telle que *Myrmica scabrinodis*, la végétation de classe 5 entraîne des conditions micro-climatiques défavorables aux *Myrmica* en procurant un ombrage trop important. A l'inverse, la présence d'une épaisse couche de litière semble recherchée par *Myrmica scabrinodis*. La probabilité de présence de l'espèce augmente significativement avec l'épaisseur de la litière (**fig. 7A**). Pour les mêmes raisons que l'épaisseur de la couche cryptogamique sur le site « Aérodrome », une épaisseur importante de litière permet de limiter l'augmentation trop importante de la température aux heures les plus chaudes de la journée, ce qui permet aux *Myrmica* de rester actives plus longtemps. Mais contrairement à la couche cryptogamique, la structure de la litière est beaucoup plus « aérée » ce qui permet aux fourmis de se déplacer facilement à travers et donc d'être plus efficace en terme de fourragement. Enfin, la probabilité de présence de *Myrmica scabrinodis* augmente de manière non significative avec la variable « classe\_3 », mais ne semble pas avoir besoin de végétation de classe 3 en quantité importante puisque sa probabilité de présence atteint 100% pour un pourcentage de recouvrement en herbacées basses d'environ 14% seulement (**fig. 7B**). Il est probable que la présence de végétation de classe 3 permette d'obtenir de meilleures conditions micro-climatiques en « ouvrant » un peu plus le milieu (la végétation étant plutôt haute sur le site « Pouchau » ; **fig. 5**). Celle-ci permet également d'apporter une certaine diversité en arthropodes.

#### 4-Analyses des variables environnementales au dessus du nid

Les résultats n'ont pas permis de mettre en évidence une structure de végétation particulière au dessus des nids (**fig. 8A et 8B**). En effet, les différents paramètres environnementaux relevés ont des valeurs très variables entre les nids. De même, la hauteur du nid ne dépend pas de la structure de végétation autour de celui-ci (**fig. 8A**). Il semblerait donc que le choix de l'emplacement du nid ne dépendent pas de la structure de végétation mais d'autres variables environnementales. En effet, d'après l'étude de [Robert et ses collaborateurs \(2019\)](#), réalisée sur l'espèce invasive *Myrmica rubra* en Amérique, les nids étaient dépendant de l'humidité du sol avec une présence significative dans les zones les plus humides jusqu'à 30% d'humidité. La température du sol semblait également jouer un rôle avec aucun nids observés au delà de 19°C mais de manière non significative. Toutefois, [Elmes & Wardlaw \(1982<sup>a</sup>\)](#) ont conclu qu'au niveau de l'habitat, la température du point de nidification est l'une des variables environnementales les plus importantes affectant le succès des colonies de *Myrmica*. Il est donc indispensable de prendre en compte ces variables pour mieux comprendre la répartition des *Myrmica* et de leurs nid au sein des sites étudiés.

D'après [Elmes & Wardlaw \(1982<sup>b</sup>\)](#), la localisation géographique, l'aspect paysager et l'ombrage de l'habitat influent à la fois sur l'insolation et la température de l'air et déterminent donc l'adéquation globale d'un site pour une ou plusieurs espèces de *Myrmica*, ce sont ces mêmes facteurs, à une échelle micro-climatique, qui interviennent au niveau du site du nid et qui affecteront évidemment le succès de toute colonie vivant dans ce nid. A l'échelle micro-climatique, ces facteurs dépendent fortement de la hauteur et de la densité de la végétation ([Petal, 1976 in Dahms et al., 2005](#) ; [Elmes & Wardlaw, 1982 in Dahms et al., 2005](#)). Cependant, nos résultats ne démontrent pas une influence claire de la structure de végétation présente autour et au dessus du nid, ainsi soit les critères utilisés pour caractériser la structure de végétation ne sont pas adaptés, soit les paramètres micro-climatiques de température et d'humidité du sol sont également dépendant d'autres facteurs environnementaux. Ces 2 théories sont possibles, [Dauber & Wolters \(2000 in Dahms et al., 2005\)](#) stipulent en effet que la végétation et le sol affectent les fourmis indépendamment de la gestion et que les communautés de celles-ci sont en outre structurées par des critères géographiques (évoqués plus haut dans [Elmes & Wardlaw, 1982<sup>b</sup>](#)) et topographiques variables mais également par l'abondance des proies et les effets intra et interspécifiques.

L'étude de ces paramètres micro-climatiques à travers l'ajout de l'indicateur « fourmis » dans les suivis actuels de pieds de *Gentiana pneumonanthe* et de pontes de *Phengaris alcon*, pourrait permettre de mieux caractériser l'influence de ces variables sur la répartition des *Myrmica* et de

leur nid, notamment en déterminant la gamme de tolérance et les valeurs optimales vis-à-vis de ces paramètres environnementaux. Cela permettrait par la suite de prédire l'évolution de ces paramètres environnementaux, et donc l'évolution des populations de *Myrmica*, sous la pression du changement climatique et ainsi évaluer les conséquences attendues sur les populations de *Phengaris alcon*. Enfin, la structure de végétation pourrait à nouveau être prise en compte via des critères plus adaptés (mesure directe de la hauteur de végétation par exemple). En effet, il pourrait être intéressant de la relier aux résultats de température et d'humidité du sol obtenus chaque année au niveau du nid, afin de déterminer si le changement climatique entraîne une modification directe des paramètres micro-climatique et/ou une modification indirecte à travers les changements de la structure de végétation.

#### 5-Analyses des relations biotiques entre les *Myrmica* et les autres espèces recensées

Les résultats obtenus montrent que *Tapinoma erraticum* est très souvent retrouvée avec l'espèce de *Myrmica* dominante sur les 4 sites d'étude (**tab. 7**) mais de manière significative seulement pour les sites « Ellorimendi » et « Plateau d'Anzé ». On peut donc supposer que la présence de *Tapinoma erraticum* est recherchée par les *Myrmica*. Toutefois, celle-ci est l'espèce retrouvée la plus abondamment sur l'ensemble des sites (**tab. 3**), sa présence dans les appâts positifs aux *Myrmica* est donc dû à de la tolérance/cohabitation de la part des *Myrmica*. En revanche, *Tetramorium gr caespitum-impurum* n'est jamais retrouvée avec l'espèce dominante de *Myrmica* (**tab. 7**) et de manière significative pour les sites « Pouchau » et « Aérodrome ». En effet, d'après [Gourvil et al., \(2019\)](#), *Tetramorium gr caespitum-impurum* peut être qualifiée d'espèce compétitrice envers les *Myrmica*. Toutefois, cette espèce ne représentant pas plus de 5% des appâts (à l'exception du site « Aérodrome » où elle atteint 23%), les résultats observés sont donc très certainement indépendants d'un comportement de compétition mais simplement dû à la faible abondance de l'espèce dans les sites étudiés. Il en est de même pour les espèces *Lasius platythorax*, *Camponotus vagus* et *Aphaenogaster subterranea* sur le site « Pouchau ». En effet, d'après [Kaufmann et Galkowski \(comm. pers.\)](#), aucune espèce n'est suffisamment compétitrice pour exclure les *Myrmica*, la plupart des espèces ayant des niches écologiques bien distinctes, la présence de plusieurs espèces sur un même appât indique simplement que les fourmis partagent un même milieu mais utilisent des niches écologiquement distinctes. Toutefois, plus des espèces sont proches phylogénétiquement, plus les niches écologiques utilisées sont similaires, la seule menace pour une espèce de *Myrmica* est donc une autre espèce de *Myrmica*. C'est probablement pourquoi jamais 2 espèces de *Myrmica* n'ont été retrouvées sur le même appât, et ce quelque soit le site. Ainsi, dans la mesure où l'habitat est stable, aucune espèce n'est susceptible d'exclure les

*Myrmica*. En revanche, Kaufmann (comm. pers.) stipule que les comportements de compétition interviennent surtout durant la (re)colonisation d'un milieu à la suite d'une perturbation. En effet, les communautés de fourmis peuvent être affectées de 2 manières : effets directs par destruction des nids et réduction de la biomasse des fourmis (Heller & Rohe, 2000 in Wynhoff et al., 2011) ; effets indirects causés par des changements dans la structure de végétation (hauteur, densité, richesse spécifique) et dans les conditions du sol qui se retrouvent perturbées, entraînant ainsi des changements dans le micro-climat et l'approvisionnement en nourriture. Ces effets sont considérés comme les plus impactants (Elmes et al. 1998 in Wynhoff et al., 2011 ; Elmes et Wardlaw 1982<sup>a</sup>). Ainsi, le changement climatique est susceptible d'entraîner des perturbations importantes dans le milieu (vagues de chaleur et épisodes pluvieux intenses...). Dans le cas où ces perturbations ont pour conséquences des effets directs, les *Myrmica* étant des espèces peu compétitrices (Blatrix et al., 2013), la recolonisation pourrait être entravée par compétition avec les autres espèces présentes dans le milieu ; dans le cas où ces perturbations ont pour conséquences des effets indirects, l'habitat est susceptible de ne plus être favorable à l'espèce de *Myrmica* dominante qui peut se voir remplacer par une autre espèce de *Myrmica* si l'habitat lui est devenu favorable. Du point de vue de *Phengaris alcon*, le risque concernant l'impact du changement climatique sur ses fourmis hôtes est donc un changement de la densité des nids disponibles ou une modification de l'espèce de *Myrmica* dominante dans le milieu suite à la modification des conditions environnementales. Toutefois, d'après Gourvil (comm. pers.), *Phengaris alcon* n'est pas adapté à 100% à une espèce de *Myrmica*. On peut donc supposer que la nouvelle espèce de *Myrmica* dominante deviendra l'hôte principal de *Phengaris alcon*, ce qui limiterait l'impact indirect du changement climatique sur les populations de ce dernier.

## Conclusion

L'espèce hôte dominante en Nouvelle-Aquitaine semble être *Myrmica scabrinodis* mais les résultats obtenus sur le site « Aérodrome » montrent que *Myrmica sabuleti* est un hôte potentiel de *Phengaris alcon* écotype « alcon ». La présence de *Myrmica* semble liée à celle d'herbacées basses et à une épaisseur importante de la litière ou de la couche cryptogamique, ainsi qu'à l'absence d'herbacées hautes. En revanche, les résultats n'ont pas permis d'expliquer la répartition des nids sur les sites d'études. En dehors des autres espèces de *Myrmica*, aucune des espèces recensées sur nos sites n'est susceptible d'exclure les *Myrmica*. Enfin, il est indispensable de prendre en compte la température et l'humidité au sol, afin de mieux comprendre la répartition des *Myrmica* et de leur nid, et ce dans le but d'évaluer l'impact du changement climatique sur les populations de *Phengaris alcon* à travers l'impact sur ses fourmis hôtes.

## Références bibliographiques

Barnosky A. D., N. Matzke, S. Tomiya, G. O. U. Wogan, B. Swartz, T. B. Quental, C. Marshall, J. L. McGuire, E. L. Lindsey, K. C. Maguire, B. Mersey & E. A. Ferrer, 2011. Has the Earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature*, **471** : 51-57, doi :10.1038/nature09678.

Barrett K. E. J., 1979. Provisional atlas of the insect of the British isles. Part 2 : Hymenoptera, Formicidae. *Biological Records Centre*, ITE Monks Wood, Huntingdon.

Belenguier L., M. Kreder, V. Lombard, M. Poussin & C. Galkowsky, 2020. Densité de nids de *Myrmica* en tourbière : exemple de la tourbière de Jouvion (Puy-de-Dôme). *BIOM* **1** : 35-48, <https://doi/10.18145/biom.v1i1.255>.

Blatrix R., C. Galkowski, C. Lebas & P. Wegnez, . Fourmis de France, de Belgique et du Luxembourg. *Delachaux et Niestlé*, 2013.

Ceballos G., P. R. Ehrlich, A. D. Barnosky, A. García, R. M. Pringle & T. M. Palmer, 2015. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Sciences Advances*, **1** : e1400253 , doi : 10.1126/sciadv.1400253.

Ceballos G., P. R. Ehrlich & R. Dirzob, 2017. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **144** (30) : E6089-E6096, doi : 10.1073/pnas.1704949114.

Dahms H., C. Wellstein, V. Wolters & J. Daubers, 2005. Effets of management practices on ant species richness and community composition in grasslands (Hymenoptera : Formicidae). *Myrmecologische Nachrichten*, **7** : 7-9.

Davis M. B. & R. G. Shaw, 2001. Range shifts and adaptive responses to quaternary climate change. *Sciences*, **292** : 673-679.

Elmes G. W. & J. C. Wardlaw, 1982. A population study of the ants *Myrmica sabuleti* and *Myrmica scabrinodis* living at two sites in the south of England. I. A comparison of colony populations. *Journal of Animal Ecology*, **51** : 651-664.<sup>a</sup>

Elmes G. W. & J. C. Wardlaw, 1982. A population study of the ants *Myrmica sabuleti* and *Myrmica scabrinodis* living at two sites in the south of England. II. Effect of above-nest vegetation. *Journal of Animal Ecology*, **51** (2) : 665-680.<sup>b</sup>

Forgeot D, 2007. Densité des nids et activité des fourmis hôtes de *Maculinea alcon* D.&S., 1775 sur la Lande du Camp, influence de l'habitat et du mode de gestion. Rapport de stage – Syndicat Mixte Espaces Littoraux de la Manche. Université Paul Verlaine.

Galkowski C. & C. Lebas. Guide d'identification des fourmis du genre *Myrmica*. *Antarea*, 56p.

Inventaire National du Patrimoine Naturel, « *Phengaris alcon* (Denis & Schiffermüller, 1775) », [En ligne], [https://inpn.mnhn.fr/espece/cd\\_nom/631131/tab/statut](https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/631131/tab/statut) (page consultée de 15 août 2020).

Gourvil P.-Y., V. Duprat & M. Poussin, 2019. *Phengaris alcon* (Denis & Schiffermüller, 1775) – Azuré des mouillères, Azuré de la Pulmonaire. Référentiel technique du Plan Régional d'Actions en faveur des Lépidoptères d'Aquitaine, CEN Nouvelle-Aquitaine, in prep.

Griebeler E. M. & A. Seitz, 2002. An individual based model for the conservation of the endangered Large Blue Butterfly, *Maculinea arion* (Lepidoptera: Lycaenidae). *Ecological Modelling*, **156** (1) : 43-60.

Kaufmann B., Mercier J.-L., Itrac-Bruneau R. & Chmargounof G., 2014. Protocole d'échantillonnage simple permettant d'évaluer la présence et l'importance des *Myrmica* au sein des communautés de fourmis. Université Lyon 1- LEHNA, Université François Rabelais de Tours-IRBI et Office pour les insectes et leur environnement. Plan national d'actions en faveur des *Maculinea*.

Kaufmann B., 2010. Les fourmis en France à l'heure de la biodiversité. *In*: Bulletin mensuel de la Société linnéenne de Lyon, hors-série numéro 2. Évaluation de la biodiversité rhônalpine. pp. 167-173, doi : <https://doi.org/10.3406/linly.2010.13767>.

Le Falher K., 2018. Caractérisation des paramètres influençant la présence de fourmis-hôtes de l'Azuré du Serpolet (*Phengaris arion*) à l'échelle de 2 sites du Béarn (64). Rapport de stage - Conservatoire d'espaces naturels Aquitaine. Aix Marseille Université.

Légifrance, « Arrêté du 23 avril 2007 fixant les listes des insectes protégés sur l'ensemble du territoire et les modalités de leur protection. », [En ligne], <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000465500/2020-09-18/> (page consultée le 15 août 2020).

Le Treut H. (coord.), 2013. Les impacts du changement climatique en Aquitaine : un état des lieux scientifique. *Presses Universitaires de Bordeaux*, Pessac, 365p.

Le Treut H. (coord.), 2018. Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires. *Éditions Région Nouvelle-Aquitaine*, 488p.

Lhonoré J., 1998. Biologie, écologie et répartition de quatre espèces de Rhopalocères protégés (*Lycaenidae*, *Satyridae*) dans l'ouest de la France. Rapports d'études de l'OPIE, volume 2, Laboratoire de Biosystématique des Insectes, Université du Maine.

Mallard F. (coord.), 2016. Programme les sentinelles du climat – Tome II : Protocoles d'échantillonnage des indicateurs des effets du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle Aquitaine, 453 p.

Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, « Changement Climatique : causes, effets et enjeux », [En ligne], <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/changement-climatique-causes-effets-et-enjeux> (page consultée le 30 mai 2020).<sup>1</sup>

Ministère de la Transition Écologique et Solidaire, « La biodiversité : présentation et enjeux », [En ligne], <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biodiversite-presentation-et-enjeux> (page consultée le 30 mai 2020).<sup>2</sup>

Robert J., R. J. II Warren, M. Abby, R. Katelyn, S. Bayba, K. Krupp & D. J. Spiering, 2019. *Myrmica rubra* microhabitat selection and putative ecological impact. *Ecological Entomology*, **44** : 239-248, doi : 10.1111/een.12700.

Rozier Y. & C. Guérin, 2014. Les papillons du genre *Maculinea* : 20 ans d'études menées en biologie de la conservation dans la Réserve naturelle nationale du Marais de Lavours. *In*: Bulletin mensuel

de la Société linnéenne de Lyon, hors-série numéro 3. Bilan de 30 ans d'études scientifiques dans le marais de Lavours (1984-2014) pp. 202-218, doi : <https://doi.org/10.3406/linly.2014.13877>.

Sala O. E., S. Chapin III, J. J. Armesto, E. Berlow, J. Bloomfield, R. Dirzo, E. Huber-Sanwald, L. F. Huenneke, R. B. Jackson, A. Kinzig, R. Leemans, D. M. Lodge, H. A. Mooney, M. Oesterheld, N. LeRoy Poff, M. T. Sykes, B. H. Walker, M. Walker & D. H. Wall, 2000. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Sciences*, **287** : 1770-1774.

Seifert B., 2017. The ecology of Central European non-arboreal ants – 37 years of a broad-spectrum analysis under permanent taxonomic control. *Senckenberg*, **89** (1) : 1-67.

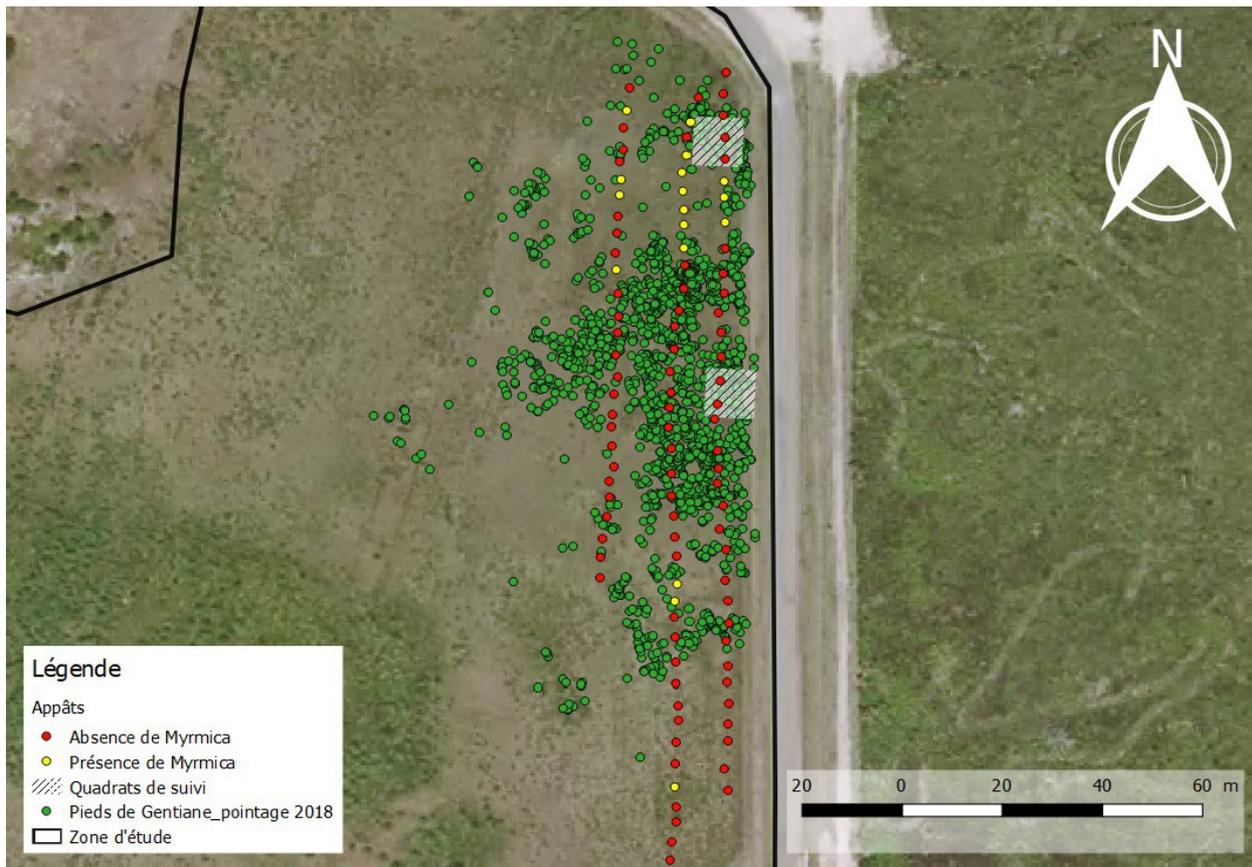
Sielezniew M., J. Buszko & A. M. Stankiewicz, 2005. Maculinea arion in Poland: distribution, ecology and prospects of conservation. *Studies on the Ecology and Conservation of Butterflies in Europe*, **2** : 231-233.

Thomas J. A., 1980. Why did the large blue become extinct in Britain? *Oryx*, **15** : 243-247.

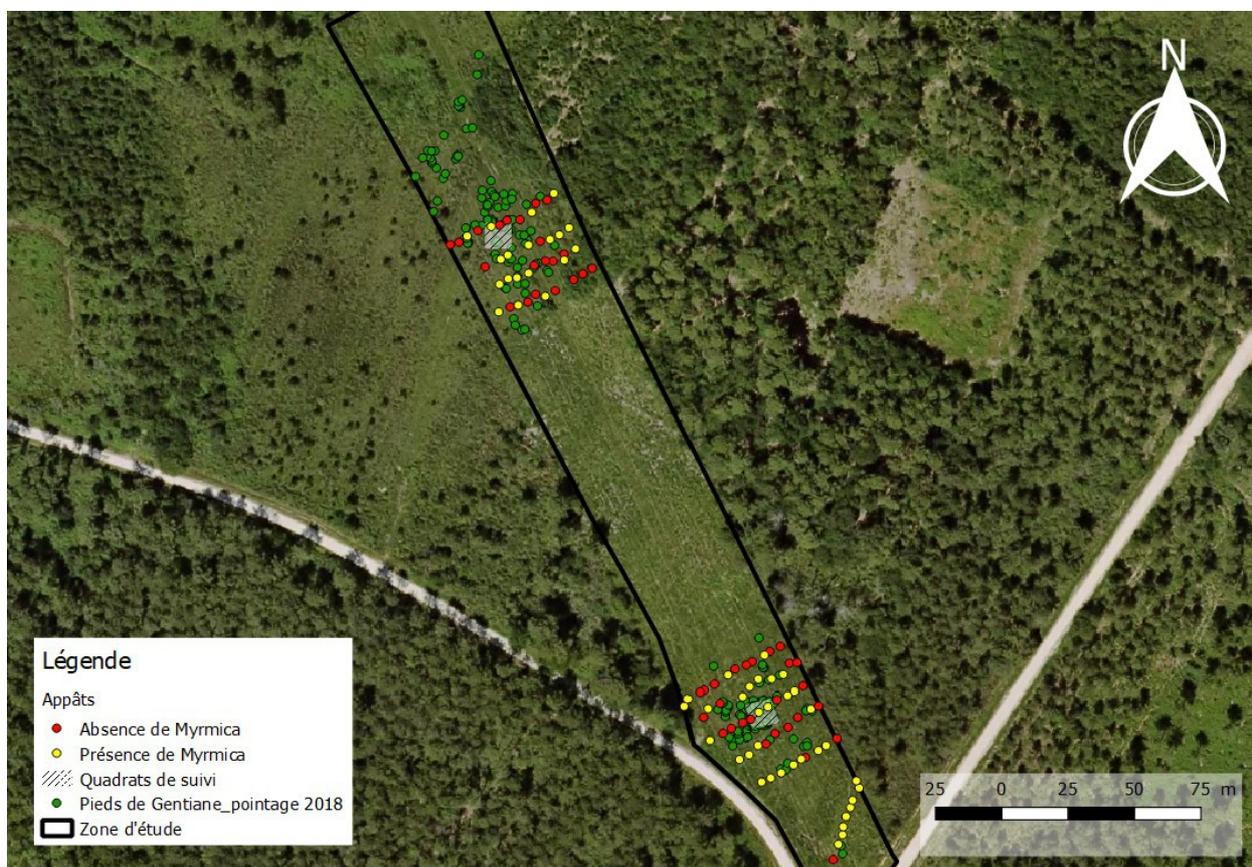
Urbani C. B. & C. A. Collingwood, 1977. The zoogeography of ants (Hymenoptera, Formicidae) in northern Europe. *Acta zoologica Fennica*, **152** : 1-34.

Wynhoff I., R. van Gestel, C. van Swaay & F. van Langevelde, 2011. No only the butterflies : manging ant on road verges to benefit *Phengaris* (Maculinea) butterflies. *Journal of Insect*, **15** : 189-206, doi : [10.1007/s10841-010-9337-8](https://doi.org/10.1007/s10841-010-9337-8).

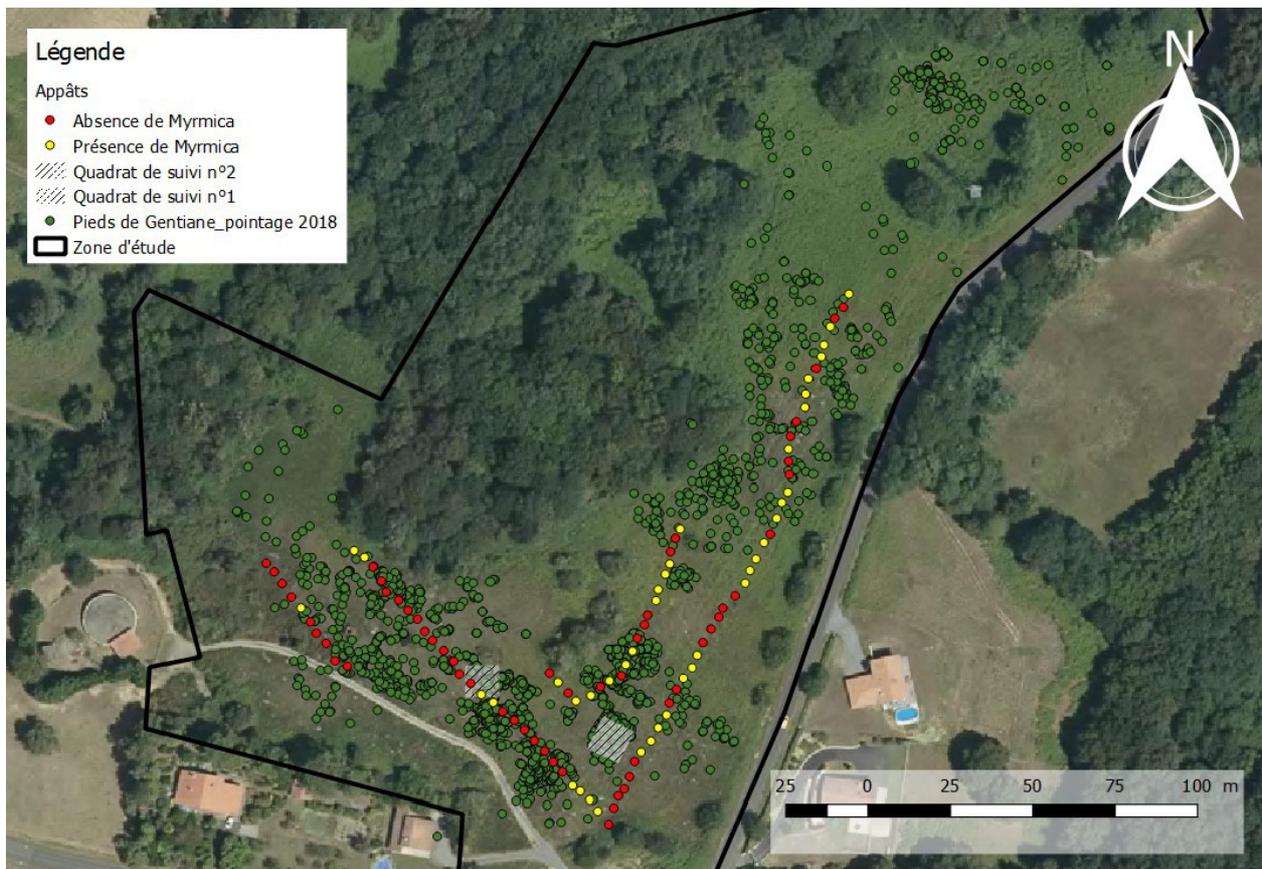
## Annexes



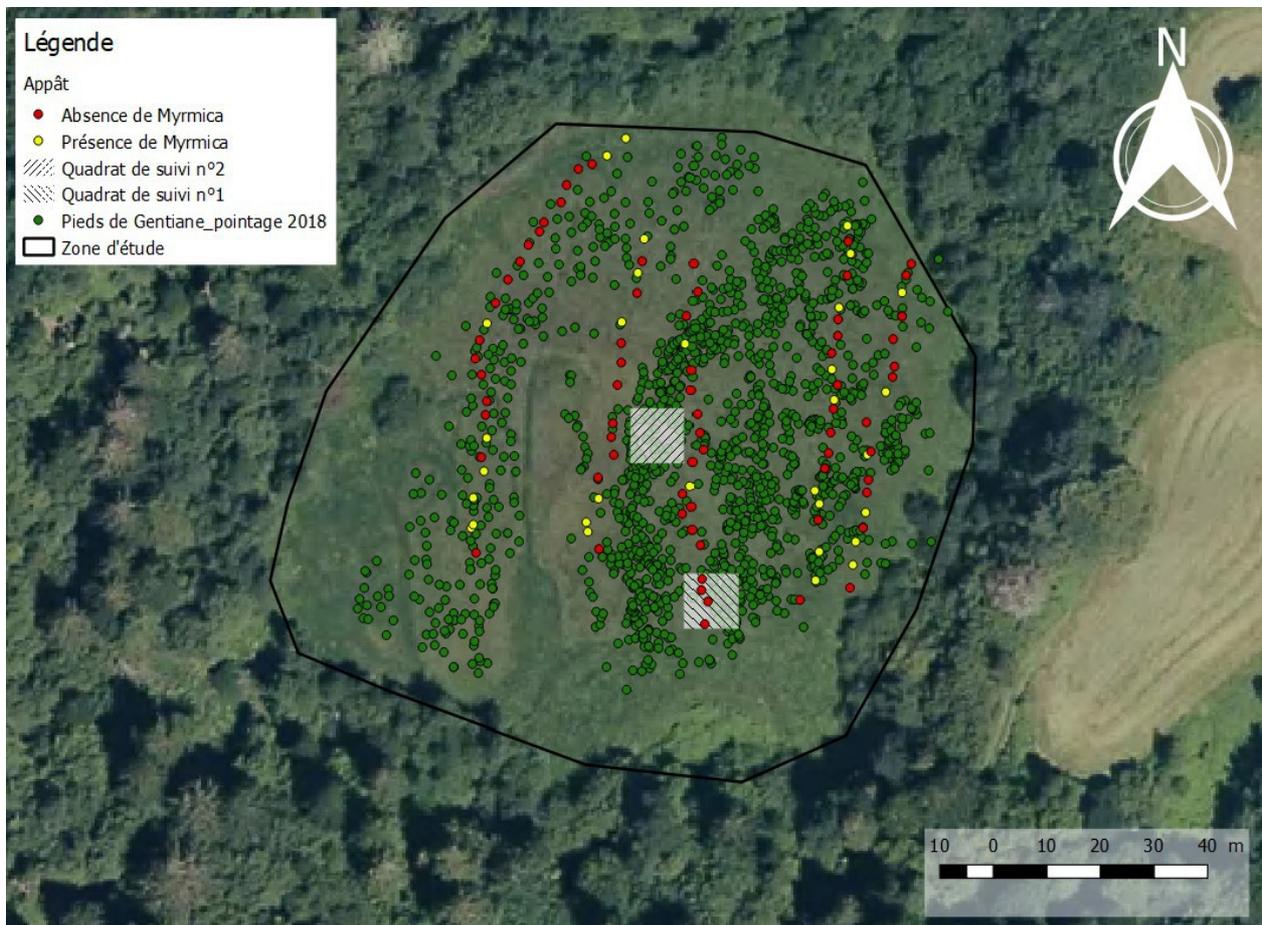
**Annexe 1 :** Représentation cartographique du site d'étude « Aérodrome » et du protocole « inventaire des espèces de fourmis » réalisé.



**Annexe 2 :** Représentation cartographique du site d'étude « Pouchau » et du protocole « inventaire des espèces de fourmis » réalisé.



**Annexe 3 :** Représentation cartographique du site d'étude « Ellorimendi » et du protocole « inventaire des espèces de fourmis » réalisé.



**Annexe 4 :** Représentation cartographique du site d'étude « Plateau d'Anzé » et du protocole « inventaire des espèces de fourmis » réalisé.

## Résumé

La pression du changement climatique exercée sur la biodiversité est de plus en plus alarmante. Ainsi, le programme multi-partenarial « Les Sentinelles du climat » a été mis en place afin de comprendre l'impact du changement climatique sur la biodiversité en Nouvelle-Aquitaine. L'une des espèces étudiée est l'Azuré des mouillères (*Phengaris alcon* écotype « *alcon* »), un papillon au cycle de vie complexe nécessitant la présence d'une plante hôte (*Gentiana pneumonathe*) mais également de fourmis hôtes (*Myrmica* sp.). Afin de mieux comprendre l'impact du changement climatique sur *Phengaris alcon*, cette étude vise à déterminer les variables conditionnant la répartition des *Myrmica* et de leur nid dans le but de prédire l'évolution des populations de celles-ci et ainsi évaluer les conséquences attendues sur les populations de *Phengaris alcon*.

Les résultats ont montré la présence de 2 espèces hôtes dominantes, *Myrmica scabrinodis* et *Myrmica sabuleti*. Les densités de nids observées sont inférieures à celles évoquées dans la bibliographie. Toutefois, celles-ci ne sont probablement pas représentatives des sites étudiés, il est important de mettre en place un protocole afin de suivre l'évolution de ces densités sous la pression du changement climatique. Quelque soit le site, les résultats montrent une augmentation significative de la probabilité de présence de l'espèce dominante de *Myrmica* en lien avec une augmentation de l'épaisseur de litière ou de la couche cryptogamique. La probabilité de présence des *Myrmica* semble également augmenter avec la présence de la strate herbacée basse mais semble diminuer fortement en présence des strates arbustive moyenne et herbacée haute. Aucune structure de végétation particulière, au dessus des nids, n'a pu être mise en évidence. Enfin, en l'absence de perturbation du milieu, aucune espèce n'est susceptible d'exclure les *Myrmica*.

Mots clé : *Myrmica*, ombrage, conditions micro-climatiques, structure de végétation, relations biotiques

## Abstract

The pressure of climate change on biodiversity is increasingly alarming. Thus, the multi-partner "Climate Sentinels" programme was set up to understand the impact of climate change on biodiversity in Nouvelle-Aquitaine. One of the species studied is the Wetland Azure (*Phengaris alcon* « *alcon* » ecotype), a butterfly with a complex life cycle requiring the presence of a host plant (*Gentiana pneumonathe*) but also host ants (*Myrmica* sp.). In order to better understand the

impact of climate change on *Phengaris alcon*, this study aims to determine the variables conditioning the distribution of *Myrmica* and their nest in order to predict the evolution of their populations and thus assess the expected consequences on *Phengaris alcon* populations.

The results showed the presence of 2 dominant host species, *Myrmica scabrinodis* and *Myrmica sabuleti*. The observed nest densities are lower than those mentioned in the bibliography. However, these are probably not representative of the sites studied, so it is important to set up a protocol in order to monitor the evolution of these densities under the pressure of climate change. Whatever the site, the results show a significant increase in the probability of the presence of the dominant species of *Myrmica* linked to an increase in the thickness of the litter or the cryptogamic layer. The probability of presence of *Myrmica* also seems to increase with the presence of the lower herbaceous stratum but seems to decrease sharply in the presence of the middle shrub and upper herbaceous strata. No particular vegetation structure above the nests could be found. Finally, in the absence of disturbance of the environment, no species is likely to exclude *Myrmica*.

Keys words : *Myrmica*, shading, micro-climatic conditions, vegetation structure, biotic relations