

3. Suivis météorologiques (relation température – biodiversité)

Auteur : Fanny Mallard

À l'échelle de la région climatique, le climat n'est pas le même en tout lieu ; les microclimats locaux sont eux-mêmes variables suivant l'altitude et la latitude. Les conditions climatiques particulières résultent notamment de la topographie et du couvert végétal. L'action combinée des facteurs climatiques, et notamment du couple température-humidité, conditionne directement la répartition des espèces végétales et animales et le développement de leurs populations (FAURIE *et al.*, 2011). Les suivis des espèces sentinelles sont donc complétés par des mesures ponctuelles de la température et de l'humidité sur chaque site.

À partir de ces mesures de température et d'humidité, la problématique posée est la suivante : comment analyser le lien entre les mesures de température, d'humidité de l'air et les suivis locaux des espèces sentinelles du climat ? Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- 1) L'année présente deux périodes principales pour les espèces, une de repos et une de développement et d'activité. Le cumul des températures en degrés-jours par mois est une mesure utilisée pour calculer l'accumulation de chaleur et estimer la durée d'un développement biologique tel que la croissance des insectes ;
- 2) Pendant ces deux périodes, les journées sur un pas de temps de 24h avec les alternances de flux thermique solaire renferment aussi, à une autre échelle de temps, l'alternance repos et activité. Elles se décomposent autour de journées types pendant les deux périodes précédentes. Elles apportent une signature particulière de l'évolution du milieu de vie. Le couvert végétal, évolutif, va changer le comportement thermique passif de conductivité, d'isolation, de transfert de flux de chaleur, d'absorption, de protection aux rayonnements, de capacité calorifique, introduisant une inertie aux conditions imposées ;
- 3) Les réponses climatiques sont spécifiques dans les deux classes principales de milieux catégorisés secs et frais agissant en retour sur la réponse des éléments biologiques qui leur sont associés.

Les objectifs pratiques sont les suivants : 1) créer un réseau de stations météorologiques des sites d'étude, 2) accumuler des données à une même échelle pour établir un lien entre la pression du changement climatique et les suivis de l'état de la biodiversité. Puis, il s'agit 3) d'agréger les données, pour leur exploitation dans des extrapolations liées à des scénarios climatiques, et 4) de suivre l'évolution de l'état de deux types de milieux humides et secs dans le temps et dans l'espace.

3.1 Complément au matériel et méthode

3.1.1 Sites équipés en station météorologique

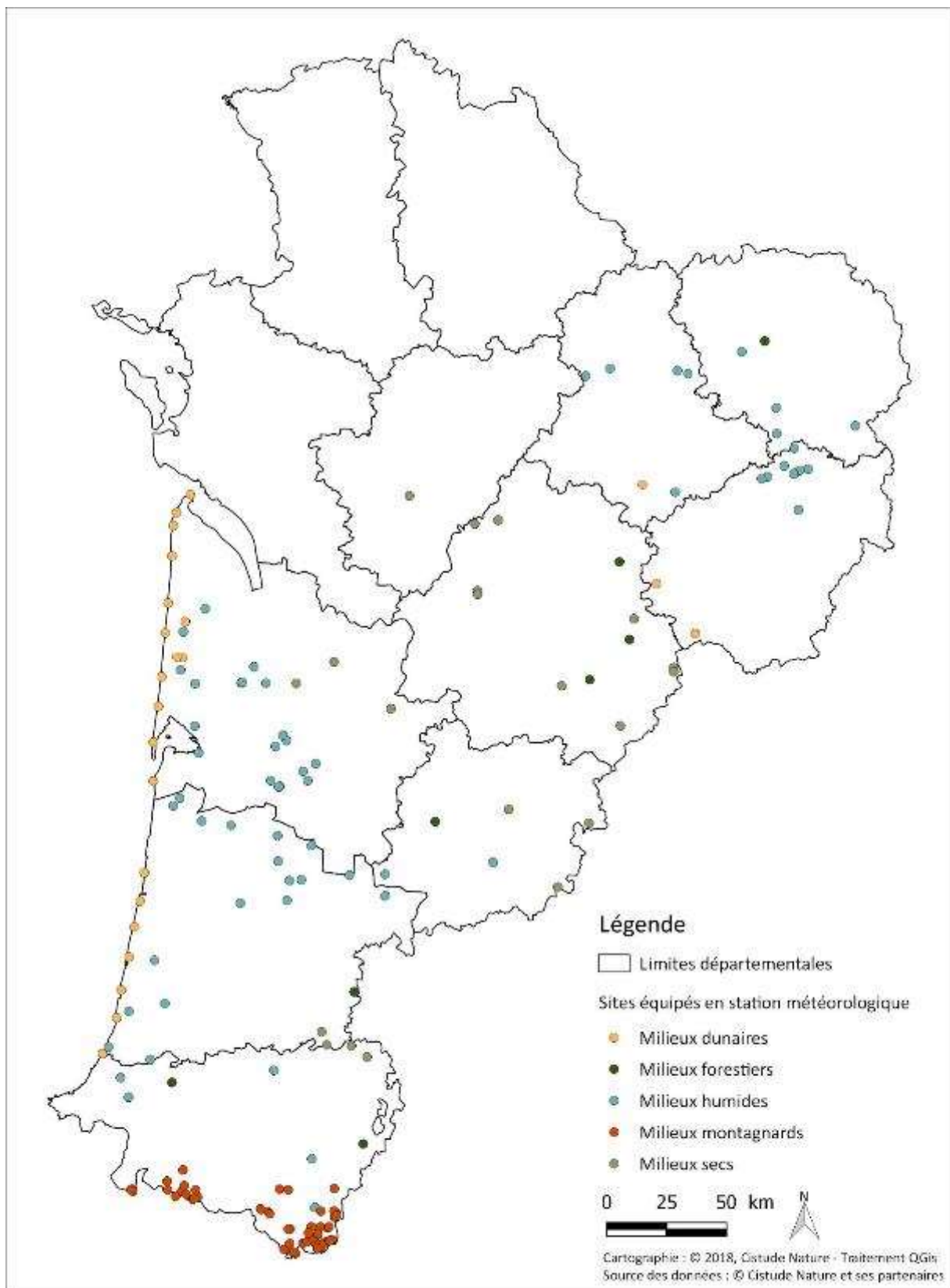
- Réseau de stations météorologiques 2018

Les mesures en température et humidité de l'air sont déployées sur les sites sentinelles. Une organisation de pose de station météorologique à l'échelle de la région Nouvelle-Aquitaine a été mise en place en partenariat avec l'ensemble des chargés d'étude de suivi floristique et faunistique (MALLARD, 2017b).

En 2016, 61 sites ont été équipés en stations météorologiques (MALLARD, 2016b). Le réseau de stations météorologiques représente, en 2017, 133 sites sentinelles (MALLARD, 2017b) et est déployé en 2018 sur 178 sites (Fig. 47).

Ce réseau de stations météorologiques à 1m10–1m30 du sol permet d'étudier le mésoclimat du type d'écosystème étudié, c'est-à-dire les modifications climatiques locales liées à différents facteurs altitudinaux, longitudinaux, topographiques, de couvert végétal, etc. À ce niveau, les données mésoclimatiques permettent d'étudier la température et l'humidité de l'air dans lesquelles évoluent les populations. Cette hauteur est choisie pour représenter en moyenne les conditions environnementales de vie de l'ensemble des populations des espèces suivies.

Ce réseau est complété par 15 stations météorologiques positionnées à 10cm–50cm du niveau du sol (6 en milieu humide, 6 en milieu sec et 3 en milieu dunaire). À cette échelle, un microclimat spécifique est produit par les caractéristiques du couvert végétal et les phénomènes thermiques associés, l'inclinaison du sol, l'humidité du sol (ou atmosphérique retenue sur les quelques centimètres au-dessus de sol par la végétation) ou de l'énergie solaire emmagasinée dans le sol. L'ensemble peut influencer la présence des espèces se déplaçant au niveau du sol ou dans la végétation basse.



Sites équipés en station météorologique en 2018 par type de milieu.

Fig. 47. Réseau de stations météorologiques en 2018.

• Stations météorologiques et suivi des espèces sentinelles du climat

Les sites d'étude ont été choisis pour réaliser des suivis multi-espèces des sentinelles du climat. Les stations météorologiques sont ainsi associées aux suivis d'un ou de plusieurs taxons. Globalement des suivis flore sont associés à des suivis faune (Fig. 48–Fig. 49). Les stations météorologiques sont réparties de la manière suivante : 20 en milieu dunaire, 9 en milieu forestier, 80 en milieu humide, 55 en milieu montagnard et 29 en milieu sec.

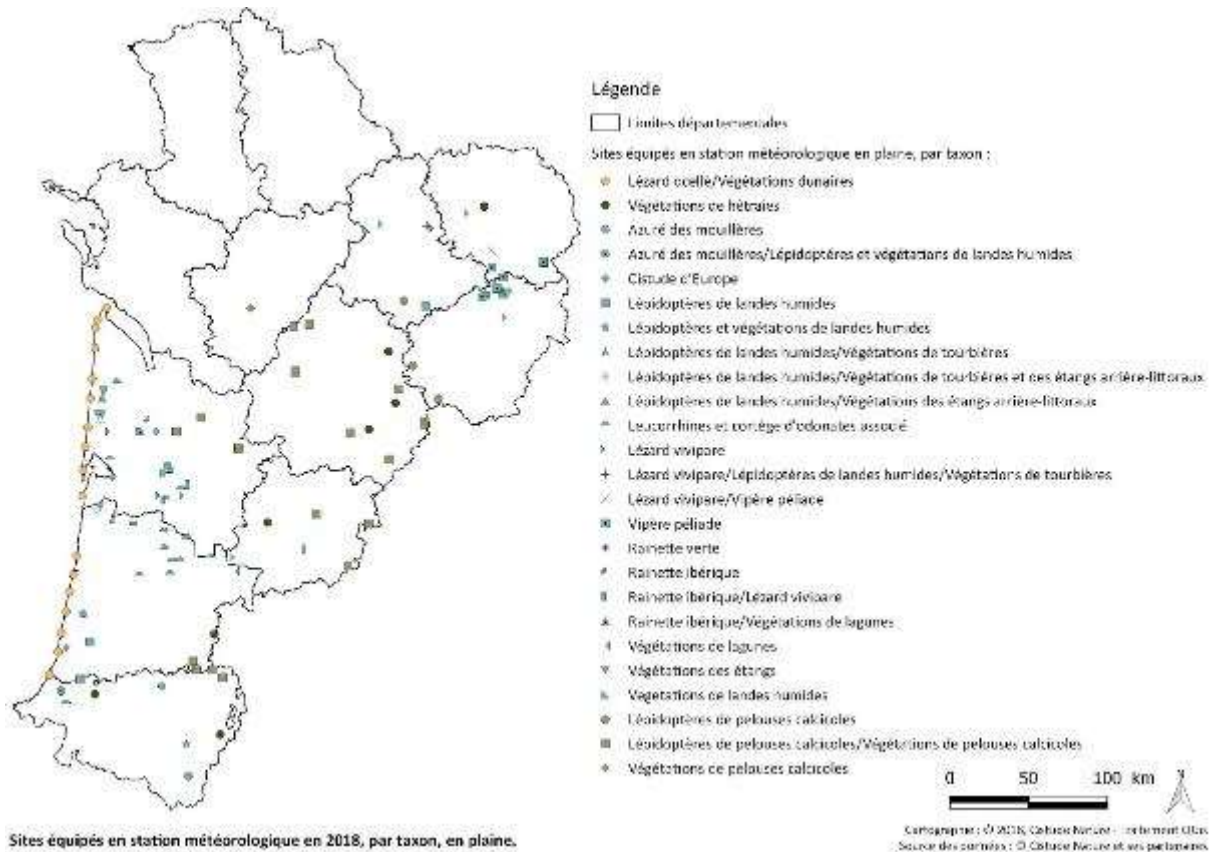
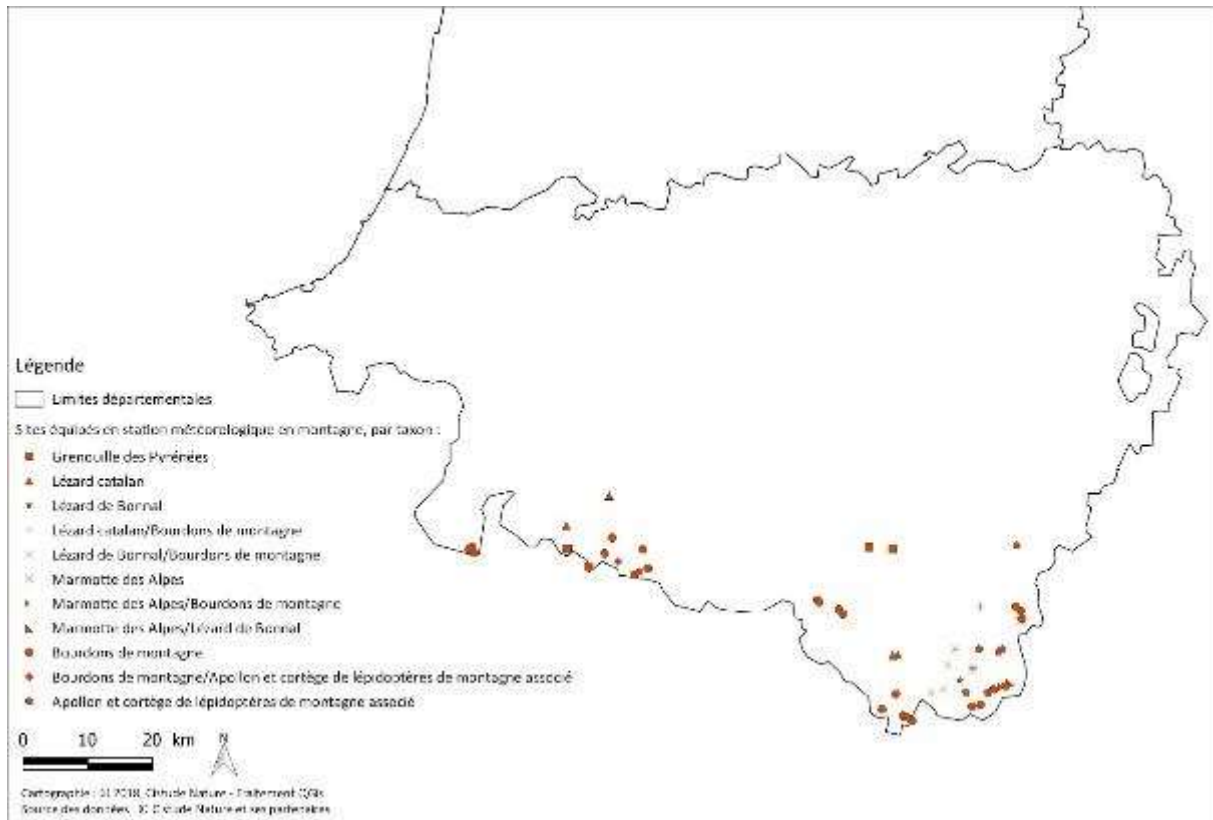


Fig. 48. Sites équipés en stations météorologiques par taxon en milieu de plaine.



Sites équipés en station météorologique en 2018, par taxon, en montagne.

Fig. 49. Sites équipés en stations météorologiques par taxon en milieu montagnard

3.1.2 Matériel

Le matériel de base choisi pour mesurer ces paramètres est l'enregistreur de température/humidité relative externe avec interface USB optique HOBO datalogger U23 Pro V2 (HOBO U23 Pro v2, Hobo®, Onset Computer Corporation, Bourne, MA, USA) et l'abri météorologique HOBO0039 RS1. La station météorologique est une station autonome à faible consommation disposant d'une mémoire suffisante pour enregistrer au minimum une année de suivi. Ce matériel a déjà été utilisé, testé et validé dans le cadre d'une étude des effets du changement climatique sur la phénologie des essences d'arbres en zone tempérée européenne (VITASSE *et al.*, 2011).

3.1.3 Protocole de mesures météorologiques

Le protocole de mesures météorologiques est détaillé dans le rapport Tome IV du programme les sentinelles du climat (MALLARD, 2017b). Les stations sont positionnées à proximité des points d'échantillonnage des populations, en situations représentatives des conditions des suivis de flore et de faune (milieu ouvert, lisière, etc.). Les données sont enregistrées toutes les heures et toute l'année.

3.1.4 Base de données 2016–2018

Un fichier de métadonnées recense toutes les informations de chaque station météorologique : N° de la sonde, structure en charge de la station, nom du site, la commune/secteur, le milieu (dunaire, sec, humide, forêt, montagne), le taxon, la date et l'heure de mise en route, la date et l'heure de pose

de la station, les points GPS en WGS84 (Longitude, Latitude), altitude (en m), évènements techniques, photos, le contact de la personne en charge de l'entretien de la station météorologique (MALLARD, 2017b).

Chaque année les données des stations météorologiques sont téléchargées au moins une à deux fois en début et en fin de suivi. La base de données fin 2018 est constituée de 413 fichiers de relevés des stations météorologiques (149 fichiers en 2017 et 264 en 2018).

3.1.5 Analyses mécanistiques et statistiques

- Plan d'analyse

Le plan d'analyse a été présenté dans le rapport Tome IV du programme les sentinelles du climat (MALLARD, 2017b). Il s'agit dans ce rapport de tester le plan d'analyse sur les données locales de température et humidité et de les mettre en lien avec l'exemple des dénombrements d'espèces. En résumé, les étapes de la démarche d'analyse en cours de mise en place sont les suivantes (Fig. 50) :

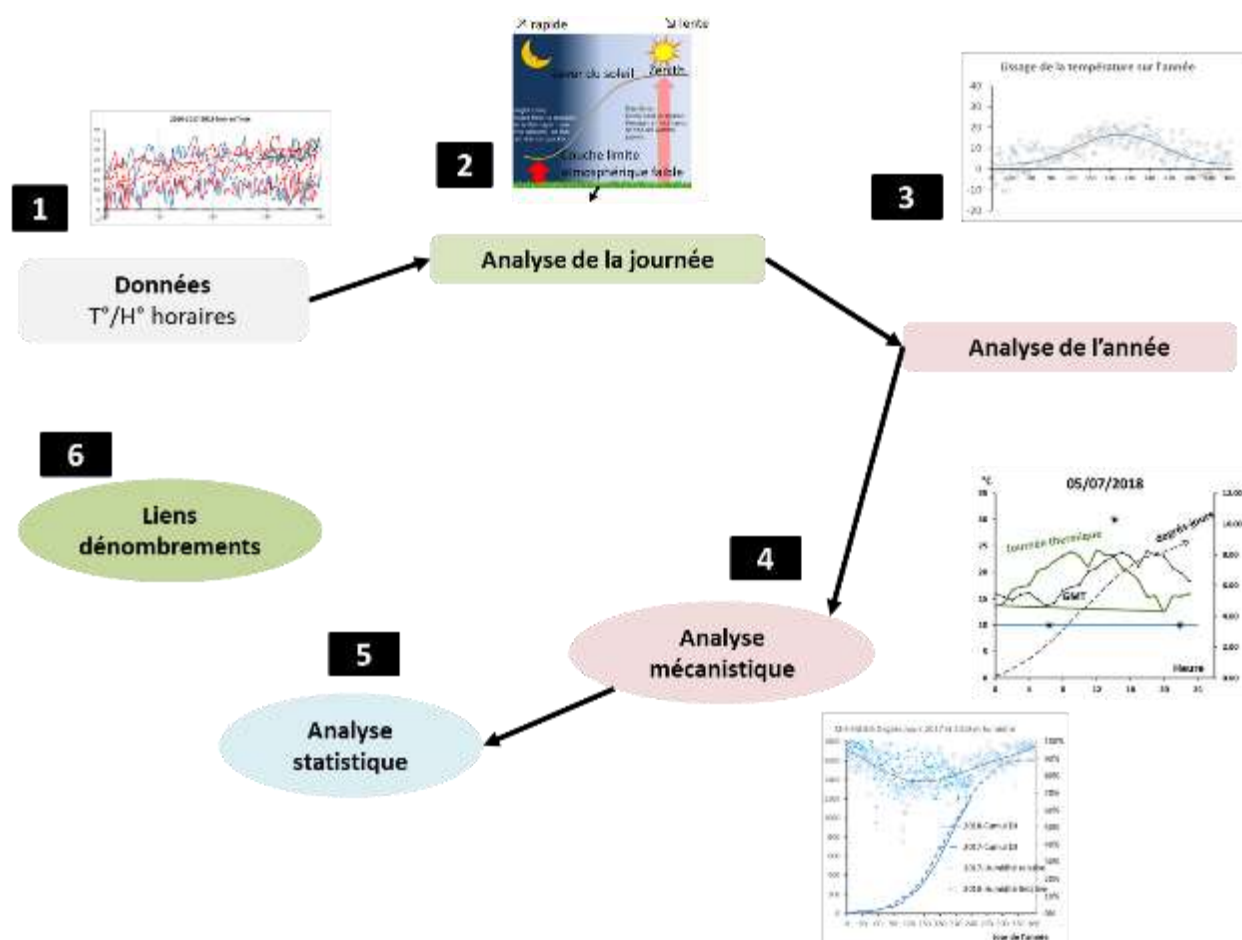


Fig. 50. Étapes d'analyse mécanistique et statistiques des données température et humidité de l'air.

- **Étape 1** : *Données brutes des relevés horaires des températures-humidités*. Les analyses sont réalisées sur les relevés les plus complets possibles. Lors de bugs de l'enregistreur quelques mesures de certaines heures ne sont pas disponibles. Elles sont repérées et remplacées par des valeurs du jour précédent ou du jour suivant au mieux. Ces bugs représentent moins de 0.1%.

- **Étape 2** : *Analyse de la journée*. L'analyse au niveau de la Journée « GMT » commence par le rajout de données complémentaires des heures du lever, du zénith et du coucher du soleil. En pratique, les fonctions du « NOAA » du National Oceanic and Atmosphérique Administration sont traduites en VBA sous Excel et sont utilisées.

- **Étape 3** : *Analyse de l'année*. À partir des données des journées, l'analyse climatique de l'année s'en déduit. L'extraction des degrés-jours sur l'année devient une donnée du développement de la biodiversité. Le lissage de ces données et leurs agrégations sont abordées et illustrées dans ce rapport.

- **Étape 4** : *Analyse mécanistique*. Analyse exploratoire dite « mécanistique » de la journée thermique ou solaire avec ses degrés-jours, de l'année, en lien avec le développement de la biodiversité, la faune et la flore :

Étape 4a : Extraction des profils de température de la journée, des degrés-jours ;

Étape 4b : Recherche de leurs normalisations, leurs lissages, paramétrages ;

Étape 4c : Agrégation année-journées ;

- **Étape 5** : *Analyse statistique* générale sur les données des journées, de l'année, sur les paramètres des fonctions résumant les journées ou l'année.

- **Étape 6** : *Liens dénombrements*. Bilan entre climat et degrés-jours et les dénombrements des suivis des espèces sentinelles du climat.

• Sites et espèces étudiés

Des premières analyses exploratoires sont illustrées dans ce rapport à partir de l'exemple de deux sites de référence de suivis de lépidoptères représentant un écosystème de milieu humide et de milieu sec : site BROUS (44.68456333,-0.573066731) Lande de Bousteyrot, commune de la Brède (33650) ; ARGEN (45.46570618, 0.388480442) Plateau d'Argentine, commune de La Rochebeaucourt-et-Argentine (24340) (cf. parties lépidoptères de pelouses calcicoles et de landes humides § 5.2 et 6.3). Les premières analyses exploratoires sur les données uniquement de température ont été effectuées sur les données de 2017 et celles de 2018 jusqu'à la fin août (premières données disponibles). Ces deux habitats, lande humide mésohygrophile et pelouse calcicole xérobromion, renferment une abondance importante de lépidoptères d'après les suivis précédents de 2016 et 2017 (MALLARD, 2016b ; MALLARD, 2017b).

3.2 Résultats exploratoires

3.2.1 Profils thermiques

L'analyse du profil annuel de température s'inscrit dans le cadre de l'étude de la relation climat-biodiversité. En résumé, il s'agit au niveau de cette démarche exploratoire de s'appuyer principalement sur les températures minimales et maximales journalières sur l'année. Dans un second temps, les températures de la journée affinent l'analyse précédente annuelle et sont relatives aux alternances repos-activité de la faune. Les paragraphes suivants proposent une analyse dissociée année et journée.

- Profil thermique annuel

Dans la littérature (UNDERWOOD, 2013), le lissage sur l'année est réalisé la plupart du temps par une sinusoïde et plus généralement une analyse de Fourier combinant des sinusoïdes qui va permettre de son côté d'aller jusqu'à la modélisation de la journée. Pour aborder cette analyse exploratoire avec une méthode intermédiaire, l'année des températures minimales ou maximales journalières est lissée par une fonction de type sinus afin d'avoir principalement deux enveloppes de points de température min ou de température max, enveloppe décrite par un minimum de paramètres. La démarche générale serait une analyse fonctionnelle des données. L'exercice de lissage des températures sur l'année recherche directement les 4 paramètres de l'équation suivante qui lissent au mieux l'ensemble des températures maximales ou minimales par la minimisation du carré de l'écart entre la température mesurée et la température calculée par l'équation :

$$T = (T_{moy} - DT) + 2 DT \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(2 \frac{(J - \tau)}{365} \right) \right)^\gamma$$

T : température au jour J de l'année civile

J : numéro du jour de l'année <=365,

τ : jour de l'année où la température est maximale,

T_{moy} est la température moyenne annuelle,

DT est l'amplitude de variation de la température annuelle autour de cette température moyenne,

γ : paramètre de courbure de la courbe à la température maximale, plus la courbure est grande et plus le pic de température est rapide dans le temps. $\gamma=1$ revient à une sinusoïde pure. $\gamma<1$ est une forme avec un rebroussement en début et fin d'année.

Les résultats du lissage des températures maximales (cercles vides) et minimales journalières (triangles) de l'année entière 2017 conduisent aux graphiques et tableaux suivants pour les 2 sites BROUS et ARGEN (Fig. 51, Tab. XI)

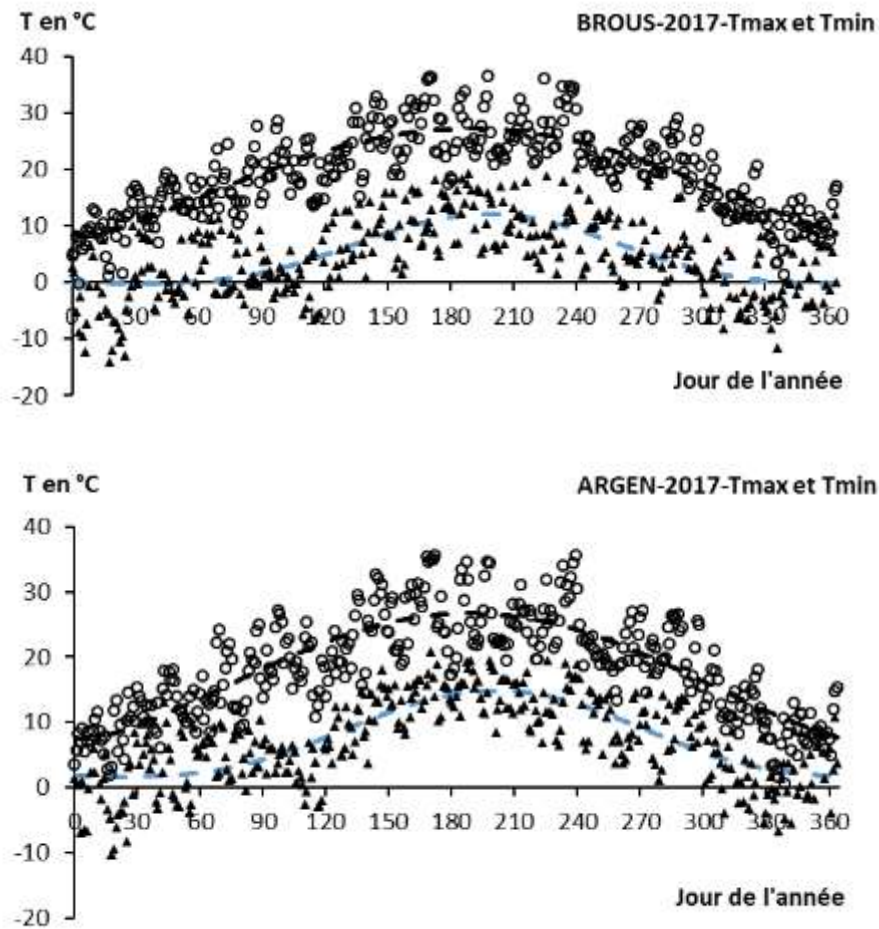


Fig. 51. BROUS et ARGEN Températures journalières min et max 2017 et courbes de lissage.

Tab. XI. Résultats du lissage des températures maximales et minimales journalières de l'année entière 2017.

En 2017	Min BROUS	Max BROUS	Min ARGEN	Max ARGEN
T moyen (°C)	5.9	17.7	8.3	17.1
DT : Amplitude	6.2	9.6	6.6	9.7
γ : Courbure	1.8	0.6	1.5	0.7
τ : Jour max	197.9	189.3	200.8	188.6
Date max	15/7	7/7	18/7	6/7

Pour le site BROUS, la moyenne des températures minimales et maximales journalières sur l'année est de $5.9 \pm 6.2^\circ\text{C}$ et de $17.7 \pm 9.6^\circ\text{C}$. Le paramètre de courbure est de 1.8 et de 0.6 et le jour de l'année du maximum est le 198^{ème} soit le 15 juillet et le 189^{ème} jour. Pour le site ARGEN, la moyenne des températures minimales et maximales journalières sur l'année est de $8.3 \pm 6.6^\circ\text{C}$ et de $17.1 \pm 9.7^\circ\text{C}$. Le paramètre de courbure est de 1.5 et de 0.7 et le jour de l'année du maximum est le 201^{ème} jour et le 189^{ème} jour (Tab. XI).

Cette analyse exploratoire indique que le milieu humide BROUS est 2.4° plus frais que le milieu sec. Les températures maximales des deux milieux sont proches, le milieu sec présente toutefois une

courbure plus faible 1.5 contre 1.8 qui pourrait être un indice de caractérisation de son inertie thermique plus faible, répondant plus rapidement au rayonnement solaire.

Après avoir caractérisé et résumé l'année, il s'agit d'analyser la journée thermique agissant sur la diversité des lépidoptères.

- **Profil thermique journalier**

Le paragraphe précédent résume l'année climatique à partir des températures minimales et maximales annuelles des journées. Ce paragraphe se concentre sur les températures horaires de la journée comprises entre les deux courbes de ces températures minimale et maximale. La Fig. 52 sur les allures des profils de température des journées montre les éléments suivants :

- Tracés du bas : les courbes nommées JH sont des enregistrements types des températures horaires d'un site, ici le site BROUS, jour par jour, sur 11 jours du 5 au 15 juillet 2018. La journée en GMT+2 en bas de figure correspond au fichier de données brutes. Les allures des profils des journées sont visuellement semblables, il s'agit de les caractériser.
- Les journées thermiques sont tracées au-dessus des journées de 24h. Elles sont le séquençement et les niveaux de température agissant sur la faune. Reprises en l'état, elles deviennent aussi plus facilement analysables statistiquement.

Le minimum de température du jour n T_{min1} survient en général durant la nuit et le minimum de température du jour $n+1$ T_{min2} survient en moyenne 24h après. Un maximum T_{max} se développe en relation avec la position du soleil au zénith. En recherchant ces minima, maxima et leurs horaires, ils deviennent des indices caractérisant les journées thermiques agissant sur le développement des populations et cela particulièrement pendant leurs périodes d'activité de mai à septembre. Cette journée thermique va être impactée finement par la dérive climatique. Elle peut devenir un moyen d'analyse pour suivre les conséquences de l'évolution climatique qui ne sont « que » de quelques degrés mais s'appliquent à un domaine de vie principal du vivant entre 10 et 30°C, sachant que la vitesse de développement est quasi linéaire entre 10°C et 30°C.

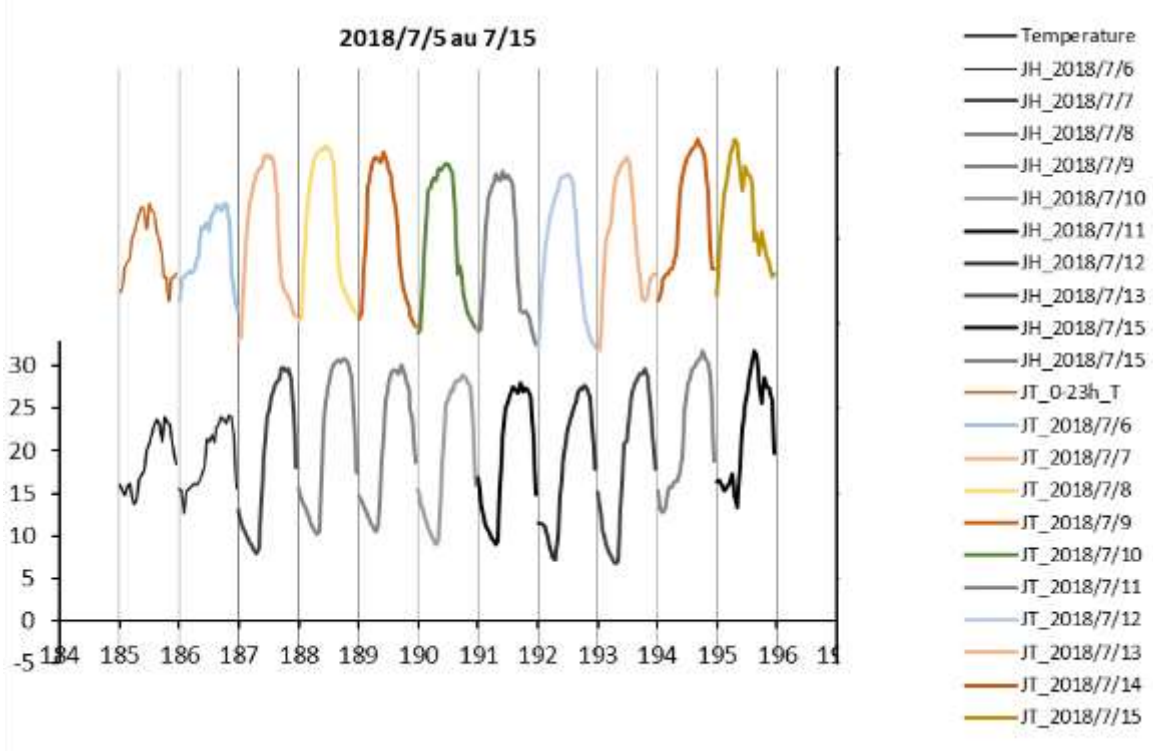


Fig. 52. Allures des profils de température des journées mesurées et « journée thermique » agissant sur la faune.

La paramétrisation des journées peut *a priori* donner des informations très fines. La littérature met en avant les évolutions de ces cycles en indiquant qu'elles présentent des asymétries, des aplatissements sensibles à l'évolution climatique qui est généralement résumé par une moyenne. Les moyennes par journées « GMT » écrasent et peuvent cacher leurs évolutions. Ainsi, le mécanisme de base étudié concerne la Couche Limite Atmosphérique (CLA) (MALLARD, 2017b ; DAVY *et al.*, 2017) : zone d'épaisseur de l'atmosphère où la surface terrestre lui est directement liée. Le soleil rayonne sur la surface du sol. Le terrain absorbe et renvoie en partie la chaleur dans l'espace. Le CO₂ dans l'air bloque cette ré-émission et réchauffe la couche CLA. Plus son épaisseur est faible et plus elle est facile à réchauffer par le sol au cours de la journée. L'épaisseur de la couche limite de la convection est une donnée de base dans l'asymétrie jour-nuit et sa réponse est très liée au CO₂. T_{min} évolue avec le changement de climat plus rapidement que le T_{max}. Une moyenne de 3° en plus peut être de 2° sur le T_{min} et 1 degré sur le T_{max}. L'arrivée des chaleurs est plus précoce. Le nombre de nuits froides diminue rapidement. La montée en température est rapide en début de jour car la CLA est faible, puis passe par un maximum et diminue lentement ensuite. D'où l'intérêt de conserver un modèle jour nuit asymétrique dans le modèle de la journée.

La journée thermique est un phénomène transitoire, cyclique en lien avec le flux thermique d'irradiation reçu et les propriétés locales du milieu, etc. Elle se superpose distinctement au profil thermique annuel à partir d'avril jusqu'en octobre. Elle varie en intensité dans l'année et sur le cours de la journée. Le profil moyen a au premier ordre une allure de sinusoïde qui est utilisée dans la littérature mais puisque qu'il montre aussi une asymétrie début/fin de journée, les lissages utilisent des fonctions par morceaux.

La Fig. 53 ci-contre est la journée du 5/7/2018 du site BROUS et correspond à un zoom de la figure précédente (Fig. 52). La température est en ordonnée à gauche et l'heure de la journée en abscisse. La courbe en noir avec des cercles sont les 24 données brutes en heure GMT. Les « soleils » sur le

graphique sont disposés au lever, zénith et coucher en heure GMT. Le minimum en température correspond dans ce cas pratiquement au lever du soleil, le maximum est de son côté décalé de 1h environ et le minimum qui va définir la journée thermique suivante survient 23 heures après. La courbe verte avec des carrés est la même courbe mais recalée à 0h, c'est la journée thermique à analyser.

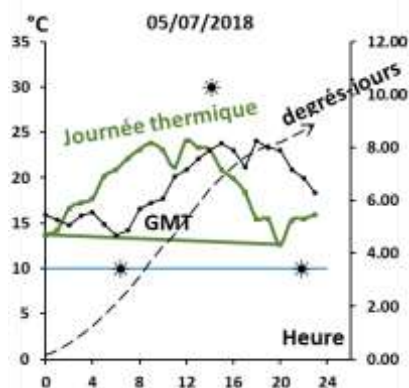


Fig. 53. Journée thermique et GMT du 5/7/2018 du site BROUS.

L'heure « tmin1 » de la température minimale « Tmin1 » de la journée « n » est distribuée autour de celle du lever du soleil « tr1 », en retard en général, ou en avance en fonction de données locales de la veille et du temps de réponse du milieu. La température « Tr1 » à l'heure du lever du soleil « tr1 » n'est donc pas identique à la température « Tmin1 » au temps « tmin1 ». Lors d'une journée type, significative en ensoleillement, la température augmente d'abord assez rapidement en lien avec la CLA mentionnée ci-dessus, elle passe par un maximum après le zénith puis décroît exponentiellement jusqu'au jour suivant. Cette analyse complémentaire sur la journée thermique est plus pertinente que la simple moyenne statistique d'une journée basée sur une journée de 24h afin de comprendre en conséquence la qualité de l'alternance jour-nuit agissant sur le développement de la faune. Elle correspond à l'analyse du mécanisme climatique agissant sur la biodiversité en prenant en compte la journée du lever du jour au coucher du soleil et la réponse du milieu avec son taux de CO₂ agissant en conséquence sur les espèces non pas seulement par le niveau mais par le profil.

Le profil thermique de la journée peut être résumé par 4 paramètres associés au jour j : température minimale du début de journée « Tmin1 », « Tr1 », par défaut la température minimale au lever du soleil, « Tmax » ou « Tz » température maximale de la journée ou par défaut la celle au zénith par défaut, et « Tmin2 » ou « Tr2 » (associées au jour suivant) température minimale du jour j+1 ou par défaut la température au lever du soleil du jour j+1. Cette dernière température « Tmin2 » permet de raccorder les courbes des profils journaliers. Sur le graphique, nous posons une courbe de base, une droite qui relie les températures minimales des 2 journées (droite en vert reliant les deux points sur la Fig. 53). Il peut y avoir 5 à 10°C de différence entre 2 journées. Et au-dessus de cette base, le phénomène thermique d'ensoleillement se met en place.

La fonction de lissage utilisée est basée sur une forme de Weibull qui est parmi les plus simples et qui respecte la donnée d'asymétrie et d'aplatissement, dont nous recherchons la mesure. La forme de Weibull est liée à une équation différentielle. Elle caractérise l'évolution autour d'un niveau en fonction du niveau lui-même avec une non linéarité. Elle semble plus adaptée que les formes discontinues de lissage en sinus et exponentielle utilisée dans la littérature et se rapproche de forme plus difficile à utiliser (UNDERWOOD, 2013). La Fig. 53 précédente mentionne avec des valeurs sur

l'ordonnée de droite ce lissage de la journée dont on ne garde en fait que le cumul des degrés-jours qui correspond au mécanisme biologique de développement des espèces.

3.2.2 Comparaison du mésoclimat de 2017 et 2018

Au niveau du développement biologique, dans la fenêtre des températures de référence, l'accumulation des degrés heures ou jours est une courbe croissance rapidement de mai à octobre. D'après la littérature scientifique, ce développement se met en place principalement dans la plage de 10 à 30°C (DENNIS *et al.*, 1986 ; WAGNER *et al.*, 1991 ; GU & NOVAK, 2006 ; JAROSIK *et al.*, 2011 ; BONNEFOY, 2013 ; LYONS *et al.*, 2013 ; SCHMUCKI *et al.*, 2016). Les différentes classes de température agissant sur la faune et la flore se résument alors à :

- En dessous des températures moyennes des jours inférieures à 5°, le gel met les réactions biologiques en latence,
- 5 à 10°C, est la plage d'initiation des réactions biologiques,
- 10°C à 30°C correspond au développement de la faune et la flore avec une vitesse liée quasi linéairement à la température,
- 30°C à 35°C entraîne un déclin du développement,
- >35°C plage létale.

En résumé, le taux de développement par unité de temps des insectes obéit à des règles générales quasiment indépendantes des types d'espèces. Les vitesses de développement s'activent à partir de 5°C, croissent en fonction de la température entre 10°C et 30°C et décroissent ensuite (DENNIS *et al.*, 1986). Les températures en dessous de 10°C ont en marge un rôle particulier nécessaire de « repos ».

• Cumul des degrés heures

En Fig. 54, les journées en abscisse apportent de l'énergie, des degrés, heure par heure, qui vont se rajouter ensuite aux degrés de la veille, des degrés au-delà des 10°C, valeur de base pour le développement de la flore et la faune. La figure de gauche montre ce cumul de degrés-heures lors de 4 journées de l'année 2017 : 180 (30 juin) à 184 (4 juillet). La figure de droite correspond à l'ensemble des 365 jours de l'année de 2017.

Situés à 100km l'un et l'autre dans une zone climatique semblable, les deux sites étudiés BROUS et ARGEN présentent des valeurs de degrés-heures proches en 2017. La période estivale correspond à des variations d'amplitudes de degrés heures un peu plus importantes pour le milieu sec ARGEN (> 15 degrés-heure) sur une durée plus courte qui est caractérisée par l'exposant du modèle de lissage utilisé pour l'année (Fig. 54).

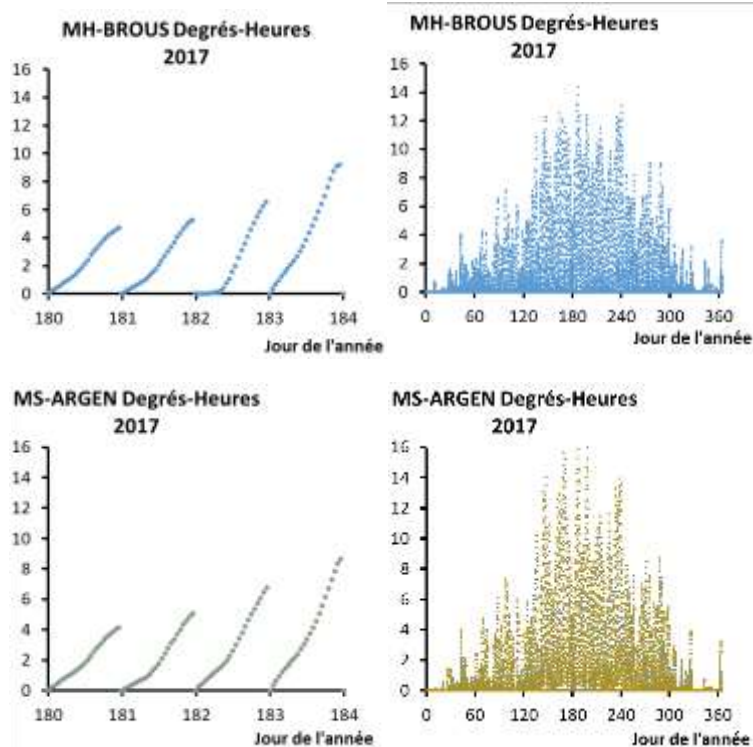


Fig. 54. 2017-Cumul par journée des degrés-heures au-dessus de 10°C pour chaque jour de l'année pour les sites de la lande Brousteyrot (BROUS) et Argentine (ARGEN).

• Cumul des degrés jours

Au niveau du développement biologique, dans la fenêtre des températures de référence, l'accumulation des degrés jours « °J » ou « DJ » est une courbe croissante de mai à octobre. Les degrés-jours correspondent au nombre de degrés dans la plage de 10°C à 35°C accumulés dans une journée. Les degrés-heures sont acquis sur une durée d'une heure. La somme des degrés-heures divisés par 24 donne des degrés-jours, la somme des degrés-jours sur l'année est de l'ordre de 1000 en Nouvelle Aquitaine, la somme des degrés-heure sur une journée est de l'ordre de 10. Les développements des différents stades des papillons par exemple demandent environ 100 degrés-jours. Une différence de 10% sur le cumul des degrés-jours annuels correspond ainsi directement à un manque ou un accroissement de ressources énergétiques pour faire aboutir les réactions enzymatiques d'un stade de développement.

En Fig. 55, sur la période de comparaison de janvier à août, les courbes de cumul des degrés jours de l'année 2017 est supérieur au cumul de l'année 2018 pour les deux sites d'étude BROUS et ARGEN (Test de Wilcoxon signé ($\alpha=0.05$) : $V=14749702$, $p < 0.0001$; $V=13335853$, $p < 0.0001$) (Fig. 55). À la date de l'analyse, les données disponibles des stations météorologiques du site en 2018 s'arrêtent fin août (correspondant au dernier relevé des stations météorologiques).

Le cumul des degrés sur l'année montre une différence de l'ordre de 1 semaine pour atteindre le même niveau entre 2017 et 2018 et la différence est de 100 degrés-jours début juillet, cela correspond à l'ordre de grandeur de l'énergie nécessaire pour passer pour un insecte d'un stade à un autre. Les courbes se rejoignent fin août suggérant une année 2018 qui va dépasser 2017.

Sur cette illustration d'analyse, l'hypothèse est la suivante : 2017 est caractérisée plus généralement par un printemps plus chaud et 2018 un printemps moins chaud que l'année 2017. Cette hypothèse est confirmée par le rapport de Météo-France : pour l'année 2017 0.8°C au-dessus de la normale, déficitaire en pluie, vague de chaleur fin juin, début août (METEO-FRANCE, 2017).

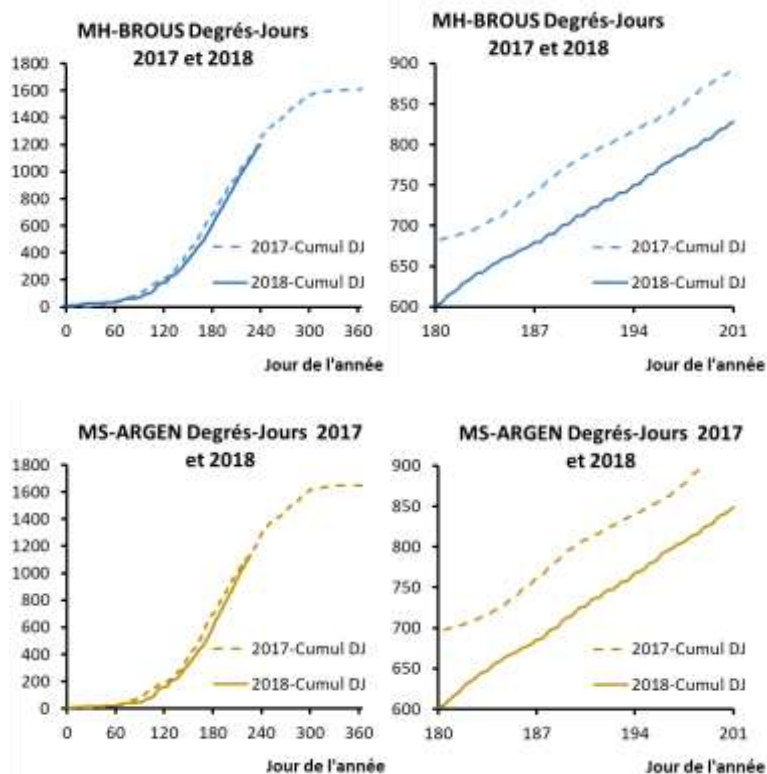


Fig. 55. Cumul degrés jours au-dessus de 10°C en fonction du jour des années (180=30 juin) en 2017 et 2018 pour les sites de la lande Brousteyrot (BROUS) et d'Argentine (ARGEN).

3.2.3 Relation climat-abondance de lépidoptères en 2017 et 2018 sur les sites

Les cumuls de degrés jours par année sont associables aux cumuls du nombre d'individus de lépidoptères. L'analyse est pertinente sur la période d'observations entre mai et août. Elle est illustrée ci-dessous toujours à partir des 2 sites de milieux secs et humides BROUS et ARGEN.

Les lépidoptères de landes humides sont observés sur des longueurs de transect de 200m et pour les pelouses calcicoles de 100m. Les comptages sur le terrain sont effectués tous les 15 ou 30 jours de mai à août. Le cumul des individus au cours du temps est fonction de la longueur des transects observés et du nombre de transects (cf. parties lépidoptères de pelouses calcicoles et de landes humides § 5.2 et 6.3).

Les tracés suivants dans les résultats donnent un cumul brut du nombre d'individus de lépidoptères en fonction du jour décimal de l'année de mai à août, pour l'année 2018, pour les 2 sites BROUS (7 dates, 4 transects de 200m, milieu humide) et ARGEN (4 dates, 6 transects de 100m, milieu sec) et pour l'année 2017 (4 dates et 4 transects dans les 2 sites) (Fig. 56). Puis, ces données sont divisées par le nombre de km parcourus (5.6 km pour BROUS et 2.4 km pour ARGEN) (Fig. 57) afin de les comparer à présence équivalente de dénombrement sur le site.

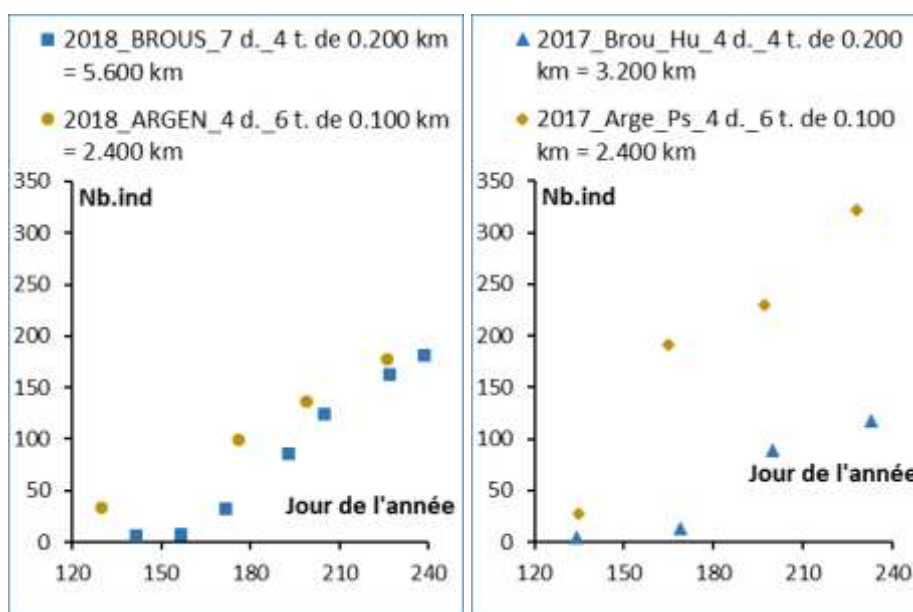


Fig. 56. Nombre d'individus de lépidoptères observés entre mai et août en 2017 et 2018.

Le cumul du nombre d'individus de lépidoptères observés dans le temps est lié à la longueur du transect et au nombre d'observations dans l'année. Les valeurs des données de terrain demandent à être rapportée à un nombre de km parcouru. Dans le temps de mai à début septembre, le cumul brut des individus est en conséquence divisé par le cumul de la distance observée dans le milieu afin d'éliminer les différences d'effort de dénombrement (MALLARD, 2017b) (Fig. 57).

Le nombre d'individus rapporté au nombre de km parcouru pour le site BROUS montre une valeur équivalente en 2018 à celle de 2017 et pour le site de milieu sec ARGEN un nombre d'individus plus important en 2017 qu'en 2018 (Test de Wilcoxon : V=131, p <0.0001 ; V=561 p <0.0001) (Fig. 57).

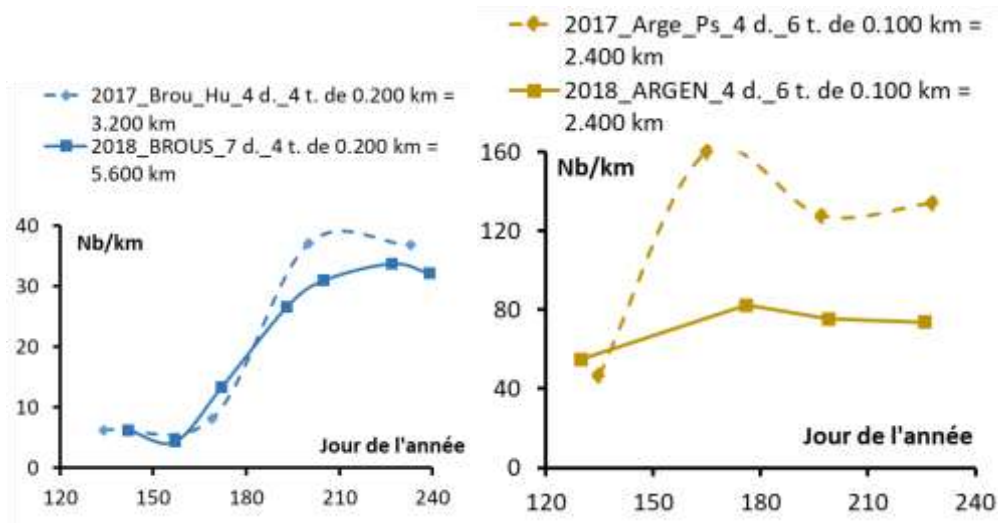


Fig. 57. Cumul des individus par km dans le temps sur les sites BROUS et ARGEN.

Dans les diagrammes à barre ci-dessous, pour les années 2017 et 2018, le cumul du nombre total d'individus sur l'ensemble des sites est mis à gauche (bâton bleu clair et jaune clair) et celui du nombre d'espèces est accolé à droite (bâton bleu foncé et jaune foncé) ceci pour tous les sites des milieux humides et des milieux secs. La comparaison entre les milieux secs et humides permet de mettre en évidence un nombre d'individus et d'espèces plus faible pour les milieux humides sur les deux années (Fig. 58–Fig. 59).

MH-2018-Nombre d'individus à gauche et d'espèces à droite par km parcouru dans les 15 sites de milieux humides, classés par latitude, 37 transects de 0.2km, 72 dates, 35.4 km

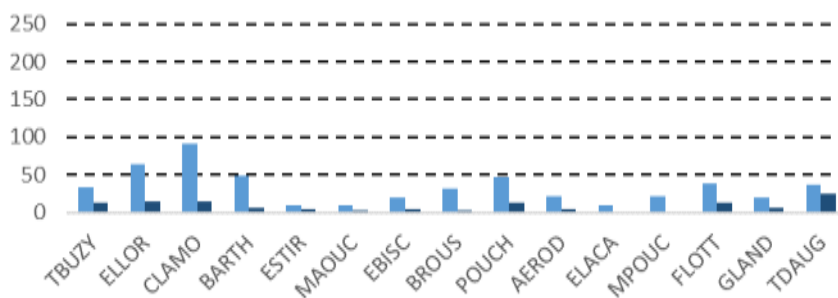


Fig. 58. Nombre d'individus et d'espèces par km parcouru dans les 15 sites de milieux humides en 2018.

MS-2018-Nombre d'individus à gauche et d'espèces à droite
 par km parcouru dans les 23 sites de milieux secs,
 classés par latitude, 72 transects de 0.1 km, 102 dates, 25.1 km

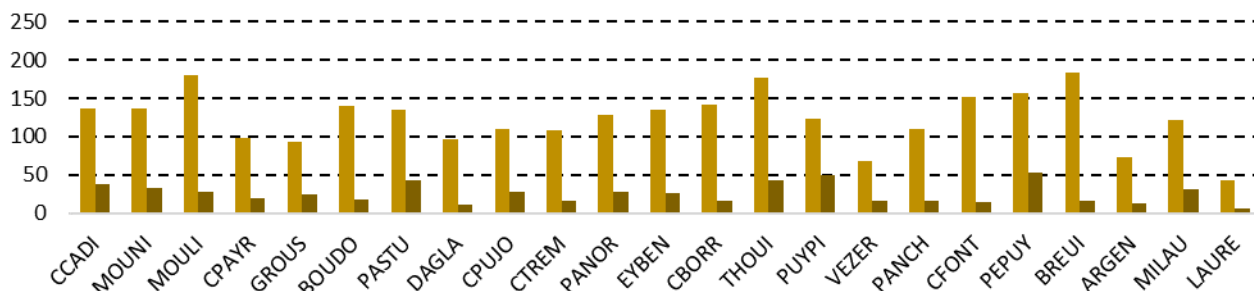


Fig. 59. Nombre d'individus et d'espèces par km parcouru dans les 23 sites de milieux secs en 2018.

MH-2017-Nombre d'individus à gauche et d'espèces à droite
 par km parcouru dans les 12 sites de milieux humides,
 29 transects de 0.2km, 44 dates, 20.8 km

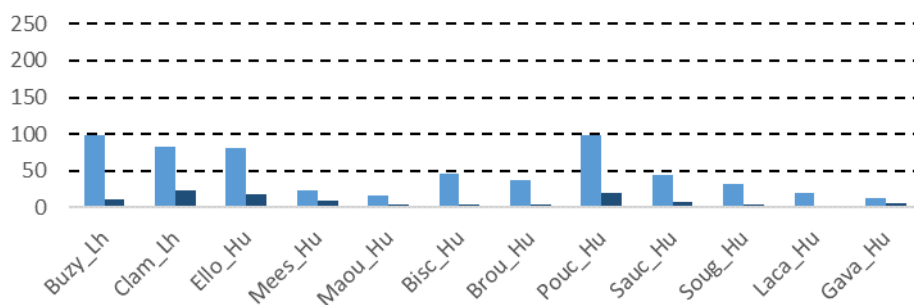


Fig. 60. Nombre d'individus et d'espèces par km parcouru dans les 12 sites de milieux humides en 2017.

MS-2017-Nombre d'individus à gauche et d'espèces à droite
 par km parcouru dans les 22 sites de milieux secs,
 56 transects de 0.1 km, 76 dates, 19.3 km

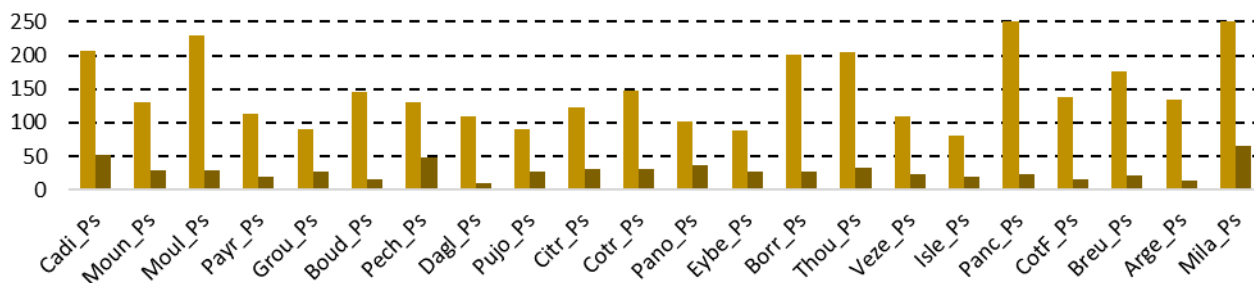


Fig. 61. Nombre d'individus et d'espèces par km parcouru dans les 22 sites de milieux secs en 2017.

3.2.4 Relation climat-diversité spécifique des lépidoptères de 2017 et 2018

Les profils de diversité spécifique sont des graphiques calculés à partir des abondances de chaque espèce (CHIU *et al.*, 2014a). Le profil (Fig. 62–Fig. 63) est décrit par une fonction incluant un paramètre q , dit « d’indifférence aux espèces rares » (MAGURRAN, 2004 ; CHAO *et al.*, 2012 ; CHAO & CHIU, 2016). Plus q est grand et moins les espèces rares sont prises en compte. Le profil caractérise en résumé l’hétérogénéité des abondances relative des espèces (MALLARD, 2016b) et il est une image de la fragilité du milieu dans la mesure où à nombre d’espèces égal plus le profil est plat et plus il est stable. Les résultats des profils de diversité des milieux secs et humides et des deux sites d’étude (développés dans le §5.2 et §6.3) sont reliés aux résultats des profils de degrés jours obtenus à partir des stations météorologiques. L’analyse des profils est un complément au bilan du nombre d’espèces.

Pour $q=0$, le nombre d’espèce est D_0 et pour $q=\infty$ (8 en pratique), le nombre d’espèces est D_{inf} . Sur les figures Fig. 62–Fig. 63 à gauche, le tracé du nombre d’espèces D varie en fonction de q de D_0 à D_{inf} . En regard à ce profil, afin de révéler la courbure du profil de façon indépendante du nombre d’espèces, un tracé donne non pas D mais une valeur dite adimensionalisée $D^*=(D-D_{inf})/(D_0-D_{inf})$ (Fig. 62–Fig. 63 à droite). Cette donnée est alors comparable entre un site. L’allure de D^* pourrait être une mesure de la fragilité, de stabilité, d’homogénéité de l’écosystème car un profil plat à nombre d’espèces égales a un potentiel de variabilité faible, il est statistiquement plus résistant aux pressions.

Sur la Fig. 62 à gauche, l’allure de la courbe du profil de la diversité spécifique du site BROUS en nombre d’espèces est peu différente entre 2017 et 2018. Les milieux humides de l’ensemble des sites MH en 2017 et 2018 montrent en valeur absolue une différence entre les deux années.

L’allure des profils de diversité du site ARGEN et des sites milieux secs est identique en 2017 et en 2018 (Fig. 63). La diversité des milieux secs est plus importance que celle des milieux humides.

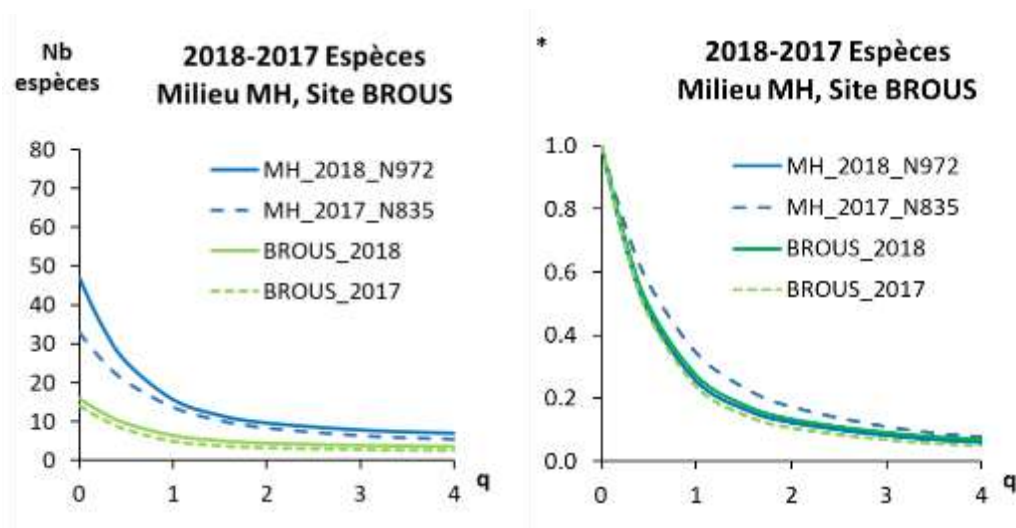


Fig. 62. Profil de diversité du nombre d’espèces D (à gauche) et D^* (à droite) du site BROUS en 2017 et 2018.

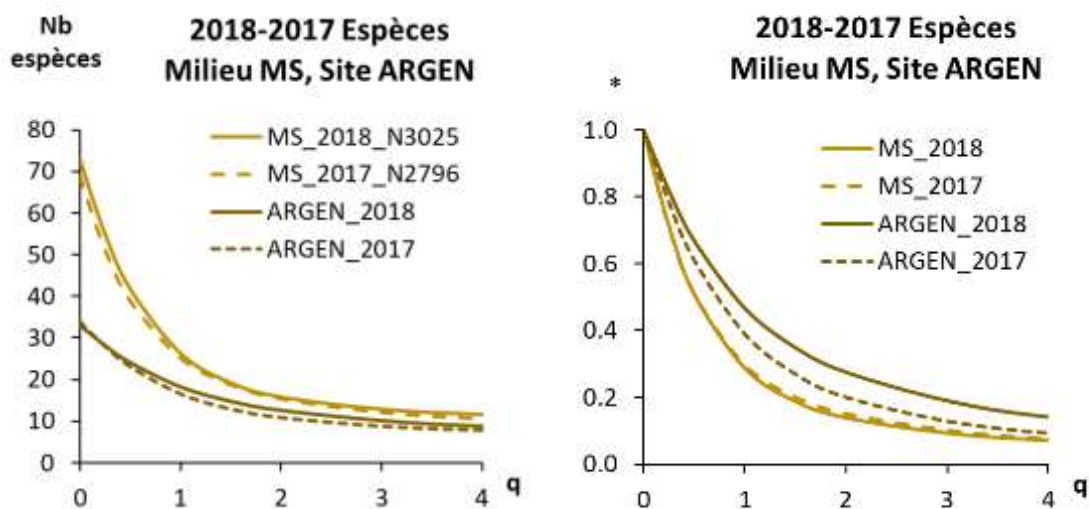


Fig. 63. Profil de diversité du nombre d'espèces D (à gauche) et D^* (à droite) du site ARGEN en 2017 et 2018.

3.3 Discussion

3.3.1 Réseau de stations météorologiques 2018

L'année 2016 a permis la mise en place du réseau de stations météorologiques qui a été complété en 2017 et en 2018. L'année 2019 permettra de compléter les derniers sites à équiper.

Les deux premières années 2017–2018 de contrôle et maintenance des stations météorologiques dans des milieux extrêmes comme en montagne montrent qu'environ une dizaine de stations sont dégradées par an par les conditions environnementales, l'écobuage et par les animaux sauvages ou de pâturage (fils rongés).

Les stations météorologiques sont situées à 1 m 10–30 du sol, au-dessus du couvert végétal du sol. L'étude de Graae *et al.* (2012) montre qu'il est important de tenir compte de la différence de température qu'il peut y avoir entre la température mesurée à partir d'une station météorologique et celle mesurée directement à la surface du sol. En effet, beaucoup de processus écologiques s'y produisent ou juste au-dessus du sol. La radiation absorbée au niveau de la surface du sol est souvent plus importante et en conséquence la température de la surface du sol peut être plus importante que la température de l'air (ARMBRUSTER *et al.*, 2007 ; BENNIE *et al.*, 2008). La végétation peut aussi modifier le microclimat en ombrageant, en modifiant l'effet du vent et/ou en tant qu'isolant (CAVIERES *et al.*, 2007 ; KÖRNER, 2007 ; SUGGITT *et al.*, 2011).

Dans l'étude de Graae *et al.* (2012), les températures des stations météorologiques ont été comparées le long d'un gradient altitudinal et d'un gradient latitudinal avec des données provenant de capteurs de température sur le sol. Les températures moyennes annuelles obtenues par les stations météorologiques sont entre 3,8°C plus basses et 1,6°C plus hautes que celles enregistrées par les capteurs sur le sol. Les températures moyennes mensuelles y sont plus chaudes de 10°C ou plus froides de 5°C que celles de la surface du sol. Les variations au sein des sites sont aussi importantes en ordre de grandeur que celles d'un changement d'altitude de 300m, d'un changement de 4°C en latitude ou encore que celle de l'application d'un des scénarios du changement climatique correspondant à un

réchauffement de 1,6–3,8°C. Par conséquent, ces différences introduites par le découplage sont significatives pour une perspective d'étude sur le changement climatique. Les résultats de ce travail démontrent le besoin d'incorporer en paramètres les variations microclimatiques lors d'études le long d'un gradient altitudinal et/ou latitudinal (GRAAE *et al.*, 2012).

Dans le cadre du programme les sentinelles du climat, le réseau a ainsi été complété cette année de 15 stations météorologiques disposées à 10–50 cm du niveau du sol pour les études en écophysiologie pour le Lézard ocellé en milieu dunaire, les lépidoptères en milieu sec, les lépidoptères, la Rainette ibérique et verte, le Lézard vivipare, la Vipère péliade en milieu humide. À partir de ces mesures complémentaires, l'année prochaine, une évaluation de la représentativité des mesures des stations mesurant la température de l'air sera réalisée comme pour l'étude de Graae *et al.* (2012). À partir de données de température de l'air près du sol, des calculs thermiques en régime transitoire sont également disponibles et permettent également l'accès aux températures du sol, voire dans le sol (ex. ZHENG *et al.*, 1993 ; BROWN *et al.*, 2000). Les calculs de radiation directe sur le sol sont disponibles en complément à partir de données satellitaires (CHIU *et al.*, 2014b). Ces données pourront également compléter les analyses sur la relation espèces sentinelles–climat.

3.3.2 Analyses mécanistiques et statistiques sur la relation climat–lépidoptères

Une démarche mécanistique et statistique a été initiée sur la relation mésoclimat (température)–lépidoptères. Les températures et humidités maximales ou minimales, la courbe du cumul des degrés–jours sur l'année, l'analyse des profils des journées sur un plan thermique sont autant de paramètres à mettre en lien avec les taux d'évolution, les abondances des individus, les taux d'évolution des espèces, etc. En 2017, un premier plan d'analyse mécanistique a été proposé (MALLARD, 2017b). Cette méthodologie d'analyse a été approfondie cette année et appliquée en exercice sur l'étude de la relation entre les suivis lépidoptères et les mesures des stations météorologiques (uniquement température) sur deux sites d'étude en milieu sec et humide.

L'analyse de Météo–France sur l'ensemble de l'année montre qu'en référence aux moyennes 1981–2010, l'année 2018 a été la plus chaude en bilan de fin d'année. L'arrivée des températures chaudes lors de l'année 2017 a de son côté été plus précoce. L'année 2017 a été plus sèche que 2018. Les deux années se classent parmi les plus chaudes de la décennie. « L'année 2017 a été marquée par des températures supérieures aux valeurs saisonnières. Seuls les mois de janvier et septembre ont été plus frais que la normale. Les mois de février, mars et juin ont été particulièrement chauds, bénéficiant de températures en moyenne plus de 2 °C au-dessus des normales. Le printemps et l'été 2017 ont même été les 2^{es} plus chauds jamais observés depuis 1900. La température moyenne annuelle de 13,4 °C a dépassé la normale de 0,8 °C, plaçant l'année 2017 au 5^e rang des années les plus chaudes » (METEO–FRANCE, 2018b). Le cumul des degrés–jours acquis dans les stations locales de BROUS et ARGEN indiquent un retard d'une semaine de l'année 2018 par rapport à l'année 2017 ce, jusqu'à la fin août donc ces résultats sont en lien avec les données des stations de Météo–France. Suite aux analyses des mesures de stations météorologiques, notre hypothèse est la suivante : 2017 est caractérisé par un printemps–été plus chaud représentatif d'un réchauffement, et 2018 un printemps–été moins chaud que l'année 2017.

Le cumul des degrés sur l'année montre une différence de l'ordre de 1 semaine pour atteindre le même niveau entre 2017 et 2018 et la différence est de 100 degrés–jours début juillet, cela correspond à l'ordre de grandeur de l'énergie nécessaire pour passer pour un insecte d'un stade à un autre. Les dénombrements d'individus de lépidoptères dans la période de mai jusqu'à la fin août sont plus

importants en 2017 qu'en 2018 dans le milieu sec du site Plateau d'Argentine. Le réchauffement du climat sur les milieux secs entraînerait une augmentation très nette du nombre de lépidoptères sur site. Sur cette campagne de deux années de surveillance, le retard d'apparition des individus et donc des espèces du site humide est de 1 mois entre le site humide et le site sec. Les lépidoptères de milieu humide seraient plus sensibles à un réchauffement du mésoclimat. La diversité spécifique n'est pas modifiée pour le milieu sec. Au contraire, les espèces de lépidoptères de landes humides sont impactées par un réchauffement du mésoclimat. Globalement, la comparaison entre les résultats milieu sec et humide montre une fragilité des espèces de lépidoptères au réchauffement de température sur la période printemps-été suggérant une sensibilité dans le futur plus importante au changement climatique.

Ces premiers résultats exploratoires sur ces deux sites sont des hypothèses à confirmer sur l'ensemble des sites de suivis, sur plusieurs années et également à compléter avec l'analyse des données d'humidité relative. Des premières analyses statistiques non paramétriques de Wilcoxon ont été utilisées. Elles seront complétées les années suivantes par des méthodes de régression les plus utilisées (GLM, GAM, etc.) (CARVALHO *et al.*, 2010). Le Modèle linéaire généralisé, GLM, permet l'évaluation de la relation entre le changement climatique et la présence/absence ainsi que l'abondance des populations (faune et flore), par exemple, étude de Rafferty (2011) sur la relation entre la floraison-pollinisateurs dans le cadre d'un changement de climat.