

Élaboration d'un observatoire climatique dans la Réserve Naturelle Régionale et Forêts d'Exception du Val Suzon (Bourgogne-Franche-Comté, France)

Guillaume HUTEAU¹, Sarah PRUNOT¹, Thomas MARCHAL², Marlène TRECA², Mario REGA¹, Pascal ROUCOU¹ et Yves RICHARD^{1*}

¹ Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS, Université Bourgogne Europe, France

² Office National des Forêts, Dijon, France

Résumé – Le changement climatique remet en question les stratégies de gestion des milieux naturels. Dans la Réserve Naturelle Régionale et Forêts d'Exception du Val Suzon (RNR-FE), la richesse de la biodiversité tient en partie au climat spécifique de la vallée et aux microclimats variés de ses multiples vallons nommés combes en Bourgogne. On y trouve aussi bien des conditions subméditerranéennes chaudes et sèches que des ambiances montagnardes fraîches et humides. Le changement climatique peut considérablement bouleverser ces conditions. Conscient de ce nouvel enjeu, l'Office National des Forêts (ONF), gestionnaire de la RNR-FE, a intégré dans sa gestion plusieurs actions pour y faire face, dont certaines avec le monde universitaire. En 2022, un partenariat entre l'ONF et le Centre de Recherches de Climatologie (CRC) a donné lieu à l'installation de 4 stations météorologiques pour mieux caractériser le climat de la RNR-FE. En 2023, dans le cadre d'un projet pédagogique du master Changement Climatique Adaptation Territoire (CClimAT), les microclimats sous couvert forestier, au sein des fonds de combes et des versants, sont l'objet d'un travail ayant nécessité l'installation de 41 capteurs thermiques. Le dispositif permet à la fois d'esquisser une caractérisation de la RNR-FE du Val Suzon comme un espace de fraîcheur à proximité de l'agglomération dijonnaise et de caractériser la variabilité de la température au sein des combes. Ce dispositif et cette analyse amorcent un suivi pérenne du climat et des microclimats de la RNF-FE afin de mieux caractériser les effets du changement climatique sur les milieux et les espèces présentes.

Mots-clés : forêt, Vallée du Suzon, réserve naturelle régionale, gestion, observatoire, microclimat.

Abstract – Development of a climate observatory in the Regional Nature Reserve and Exceptional Forests of Val Suzon (Bourgogne-Franche-Comté, France). Climate change is challenging natural environment management strategies. In the Val Suzon Regional Nature Reserve and Exceptional Forests (RNR-FE), the richness of biodiversity is partly due to the specific climate of the valley and the varied microclimates of its many val-leys called “combes” in Burgundy. There are both hot and dry sub-Mediterranean conditions and cool and humid mountain environments. Climate change can significantly disrupt these conditions. Aware of this new challenge, the National Forestry Office (ONF), manager of the RNR-FE, has integrated several actions into its management to address it, some of them in partnership with the academic world. In 2022, a partnership between the ONF and the Climate-tology Research Center (CRC) resulted in the installation of 4 weather stations to better characterize the climate of the RNR-FE within the Dijon area. In 2023, as part of an educa-tional project of the master Climate Change Adaptation Territory (CClimAT), the microcli-mates of forest cover, within valley bottoms and slopes are also taken into account with the installation of 41 thermal probes aimed at temperature variability within the valleys. The whole makes it possible to outline a characterization of the RNR-FE of Val Suzon as a cool space close to the Dijon conurbation, with heterogeneous thermal behaviors depending on the fine-scale topographical characteristics. This system and this analysis initiate a long-term monitoring of the climate and microclimates of the RNF-FE in order to better charac-terize the effects of climate change on species and their naturals habitats.

Keywords: forest, Suzon Valley, regional nature reserve, management, observatory, microclimate.

* Auteur de correspondance : yves.richard@u-bourgogne.fr

Introduction

Dans le Val Suzon, la Réserve Naturelle Régionale, créée en 2011, est la plus vaste de Bourgogne-

Franche-Comté avec 2980 ha parmi les 5000 ha des 19 réserves naturelles régionales (figure 1). L'Office National des Forêts (ONF), gestionnaire de la RNR depuis sa création, est responsable de la

conservation des milieux et des espèces patrimoniales du site. La gestion de qualité et l'implication des acteurs ont valu à la RNR le label

Forêt d'Exception® en 2016 et l'inscription sur la Liste verte de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature en 2024.

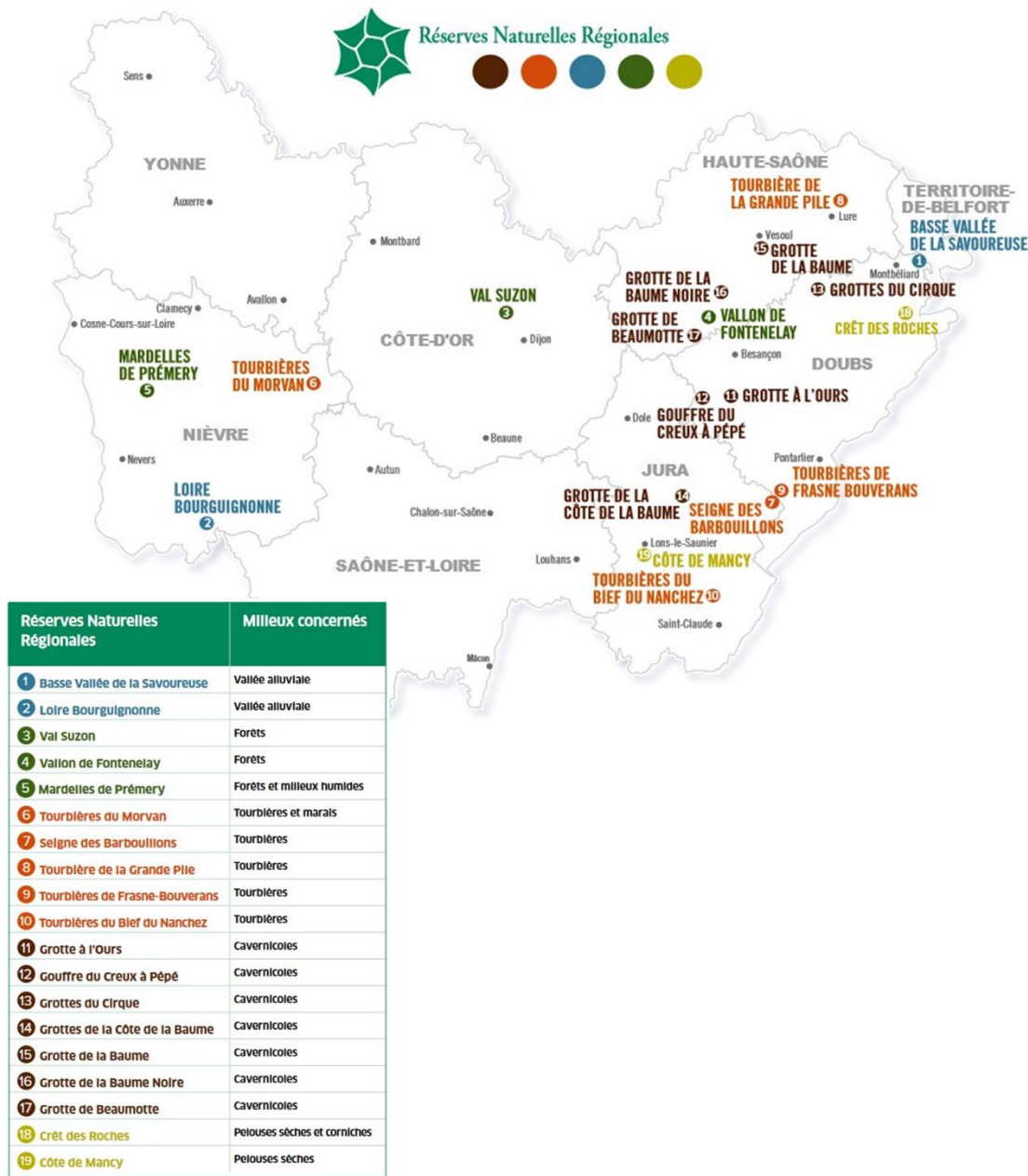


Figure 1. Les 19 Réserves Naturelles Régionales de Bourgogne-Franche-Comté par types de milieux concernés. *The 19 Regional Natural Parks of Burgundy-Franche-Comté by type of environment concerned.*

Les responsabilités identifiées concernent quatre grands types de milieux : les forêts de combes (vallons étroits et escarpés) et de versants, les pelouses sèches calcaires et leurs milieux associés, les sources et milieux humides tufeux, ainsi que les milieux rocheux (photo 1). Jusqu'à récemment, la stratégie de gestion répondait efficacement aux objectifs de conservation à long terme. Cependant,

le changement climatique remet en question cette logique (Coudurier *et al.*, 2023). Le diagnostic de vulnérabilité et d'opportunité du Val Suzon (Marchal *et al.*, 2023) s'inscrit dans la démarche Natur'Adapt (<https://naturadapt.com/>) permettant aux gestionnaires de prendre en compte les impacts du changement climatique sur leurs aires protégées et d'adapter leur gestion en conséquence.



Photo 1. Les quatre grands types de milieux naturels de la RNR-FE du Val Suzon : a) Habitats humides de forêts de versants et de combes ; b) Habitats secs de pelouses-ourlets-fruticées-chênaies pubescentes ; c) Habitats de milieux humides liés au calcaire ; d) Habitats des milieux rocheux (corniches en bordure de plateau, falaises et éboulis). *The four main types of natural environments of the RNR-FE of Val Suzon: a) The humid habitats of the forests of slopes and valleys; b) Hemlock, berry oak, and downy oak dry lawn habitats; c) Environmental habitats humid linked to limestone; d) Dry habitats in rocky environments located at the top of slopes and on plateaus.*

Selon les scénarios de climats futurs de type RCP établis par le GIEC, sur la projection 2071-2100 et selon la médiane de l'ensemble des 17 modèles TRACC-2023, la vallée du Suzon subira de fortes transformations à l'horizon 2071-2100 (Marchal *et al.*, 2023). Les ambiances méditerranéennes vont se multiplier, caractérisées surtout par une augmentation de la température moyenne (environ +1,75°C selon le scénario RCP4.5 et +4°C pour le RCP8.5) et des sécheresses estivales de plus en plus fréquentes et intenses (avec un déficit hydrique de -123 mm en RCP4.5 et -195 mm en RCP8.5). On note également une hausse significative des épisodes de vague de chaleur (+30 jours/an en RCP4.5 et +77 jours/an en RCP8.5). Cela va encore accentuer des effets écologiques et bioclimatiques déjà visibles aujourd'hui : dépérissements massifs des hêtraies, chablis fréquents et risques d'incendies estivaux récurrents.

Ces phénomènes soulèvent des interrogations quant aux objectifs de conservation du site. Le gestionnaire doit désormais comprendre et caractériser les effets du changement climatique. La connaissance des méso- et microclimats devient cruciale. Pour cela, il convient de mettre en place (i) une phase de test du matériel de mesure en milieu

forestier, (ii) un positionnement des stations permettant de rendre compte des spécificités de la RNR-FE par rapport au milieu environnant de la plaine dijonnaise et (iii) la capacité d'effectuer des mesures d'échelle fine dans un milieu à la topographie accidentée. Le partenariat mis en place en 2021 entre l'ONF et le Centre de Recherches de Climatologie (CRC) a commencé par l'implantation de quatre stations météorologiques fixes puis s'est poursuivi avec un projet pédagogique qui pose les premières bases d'un dispositif de mesures à long terme adapté au contexte forestier (Lenoir *et al.*, 2017) pour comprendre l'impact du changement climatique sur les microclimats des combes et des versants, essentiels pour la biodiversité (Bernard et Tréca, 2019a et 2019b).

1. Matériel

Afin d'étudier le climat de la RNR-FE Val Suzon, les préconisations principales sont d'établir un dispositif méso-échelle, en milieu ouvert, pouvant donner lieu à des comparaisons avec d'autres données météorologiques, comme celles de Météo France, et d'obtenir des mesures micro-échelles, sous couvert forestier, afin de caractériser

la diversité d'ambiances thermiques au sein de la RNR-FE Val Suzon.

Pour le dispositif méso-échelle, le choix est fait de la cohérence avec le réseau MUSTARDijon (Richard *et al.*, 2018a et 2018b) déployé sur le

territoire de Dijon Métropole jouxtant la RNF-FE (figure 2). Les instruments et abris sélectionnés, ainsi que les procédures de transmission des données, sont identiques, facilitant ainsi leur gestion et permettant l'extension du réseau MUSTARDijon (Jégou *et al.*, 2024).

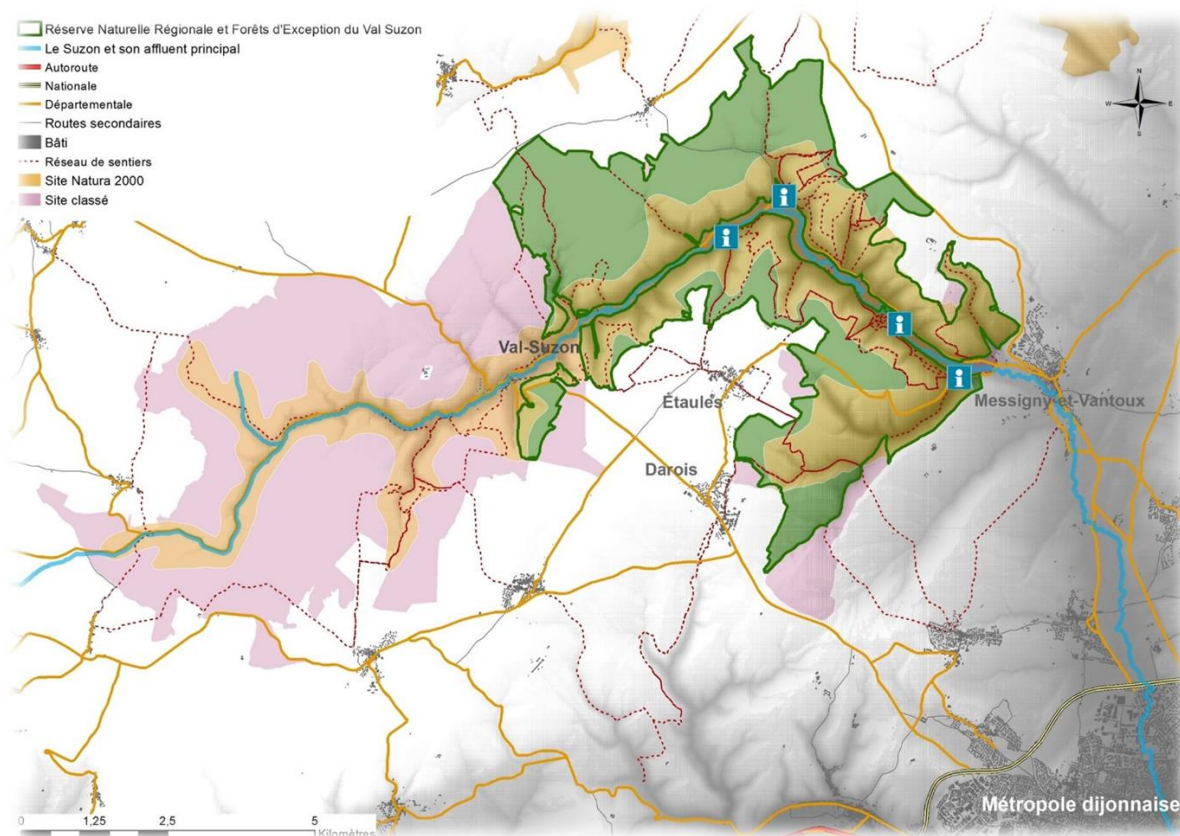


Figure 2. Vallée du Suzon et périmètres réglementaires de la RNR-FE. *Suzon Valley and regulatory perimeters of the RNR-FE.*

Dans la RNR-FE, les espaces ouverts sont rares. Les terrains de service situés à proximité immédiate des maisons forestières répondent au critère météorologique d'absence d'ombre portée et de relative distance à tout objet venant perturber très fortement le vent. Trois stations météorologiques sont installées au printemps 2022 auprès des trois maisons forestières : Goa (536 m), Magister (312 m) et Roy-Jeannot (491 m) (figure 3). Une quatrième station est implantée sur un terrain de captage des eaux (Sainte-Foy, 323 m). Ces quatre stations (Hobo RX2100) mesurent toutes la température de l'air et l'humidité relative à 2 m, au pas de temps horaire. Roy-Jeannot et Sainte-Foy mesurent également la vitesse et la direction du vent (en instantané horaire) ainsi que le rayonnement global. Pour l'année 2023, seules les mesures de

températures de trois stations sont analysées, la station de Roy-Jeannot ayant connu trop de dysfonctionnements. Elles permettent la comparaison avec la station synoptique de Météo France de Dijon-Longvic située dans la plaine dijonnaise, à 17 km au sud-est de la station Magister, elle-même localisée au débouché de la vallée du Suzon sur la plaine dijonnaise, ainsi qu'avec la station MUSTARDijon Place de la Libération située en plein cœur de Dijon (figure 3). Le dénivelé entre la plaine dijonnaise et la RNR-FE varie d'une centaine de mètres (219 m à Dijon-Longvic versus 312 m à Magister) à 300 m (536 m à Goa).

En 2023, dans le cadre d'un projet tuteuré du master Changement Climatique Adaptation Territoire (CClimAT) de l'Université de Bourgogne, 41 capteurs

déportés de températures (Tinytag Talk 2 - TK-4023) ont été installés du 14 septembre au 22 octobre au sein de quatre combes (figure 4),

constituant la première étape d'un dispositif d'observation des microclimats de la RNR-FE.

Figure 3. Situation géographique et topographie de la RNR-FE du Val Suzon et emplacement des stations météorologiques méso-échelle. *Geographical location and topography of the Val Suzon RNR-FE and location of weather stations mesoscale.*

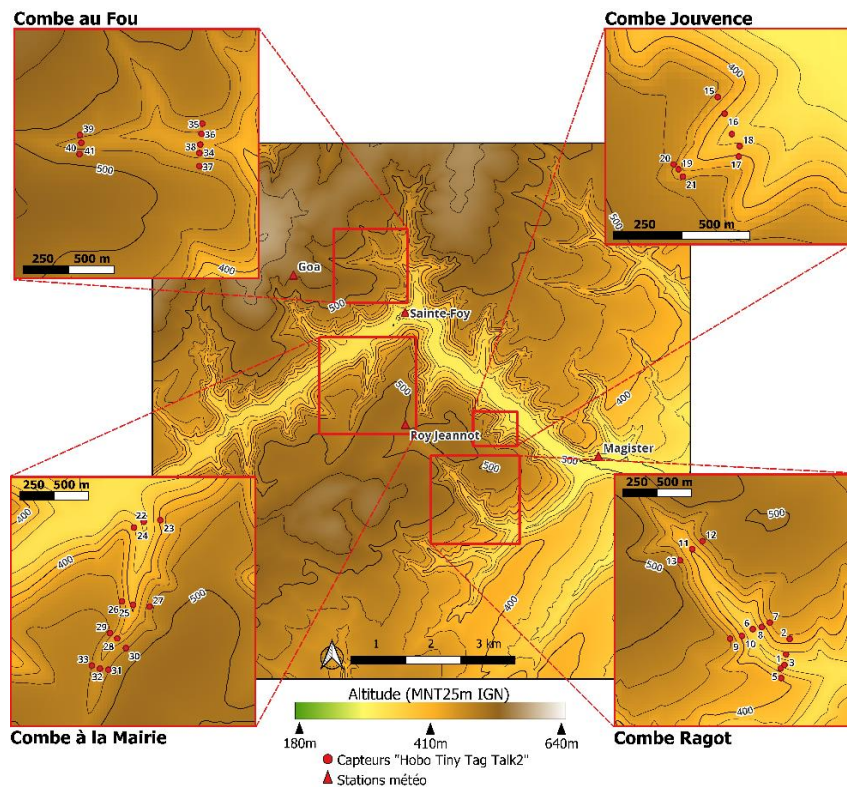
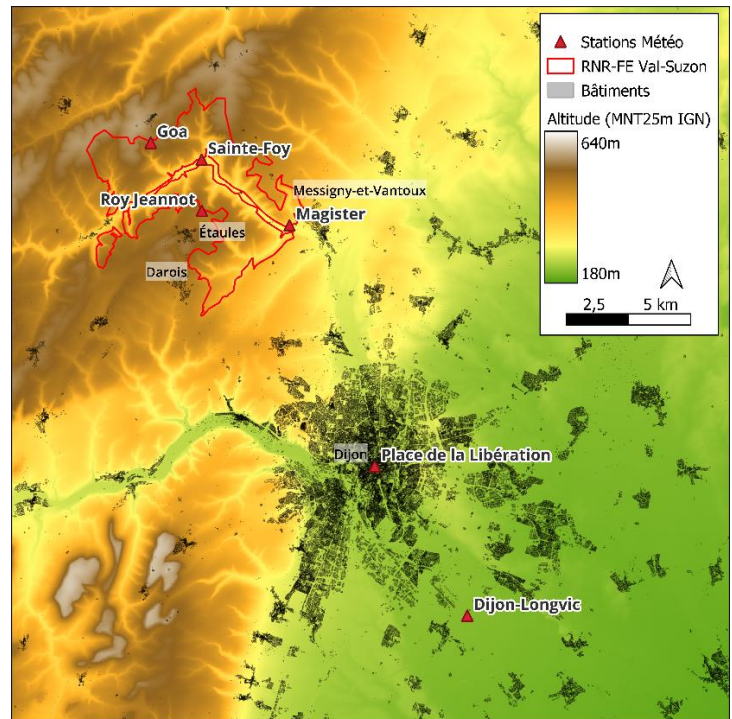


Figure 4. Répartition des capteurs thermiques (Tinytag Talk 2 - TK-4023) installés au sein des quatre combes équipées de la RNR-FE du Val Suzon lors de la campagne de mesures du 14 septembre au 22 octobre 2023. *Distribution of thermal sensors (Tinytag Talk 2 - TK-4023) within the four equipped valleys of the RNR-FE of Val Suzon during the measurement campaign from September 14 to October 22, 2023.*

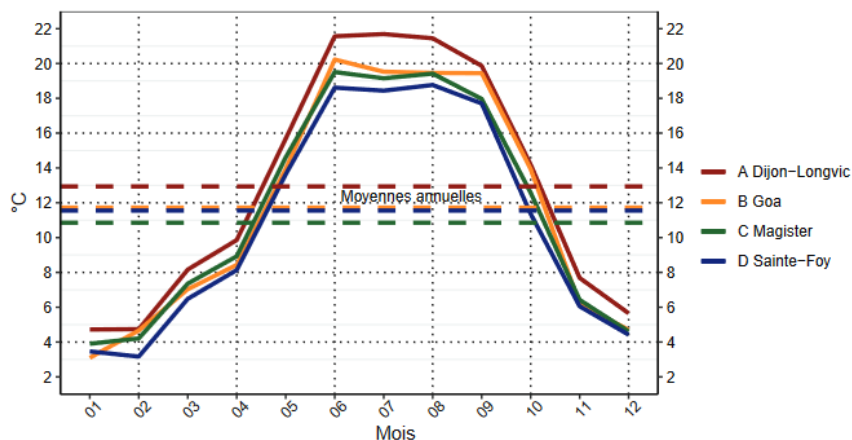
En tant que gestionnaire du territoire, l'ONF a proposé une installation de plusieurs transects au sein de combes d'orientations, de longueurs et d'altitudes variées pour mettre en évidence, si possible, les contrastes thermiques selon différentes caractéristiques topographiques. Les combes Fou et Jouvence, d'orientation principale Est-Ouest, et la combe Ragot orientée Nord-Ouest et Sud-Est, ont des versants en adret et en ubac. La Combe à la Mairie orientée Nord-Sud présente la particularité d'avoir des versants exposés Est-Ouest. Le dispositif est inspiré d'une méthodologie adaptée aux mesures en milieux forestiers (Lenoir *et al.*, 2017 ; Brusse *et al.*, 2024). Les capteurs sont positionnés en transects perpendiculaires à l'orientation principale de la combe, du fond jusqu'en haut des versants (figure 4). Tous les capteurs ont été installés sous couvert arboré, à 1,20 m du sol, fixés sur les troncs des arbres à l'aide d'un ressort, avec une exposition nord afin de garantir l'homogénéité des mesures. Une attention particulière a été portée afin d'éviter les espaces présentant des arbres dépérissants pour rester dans des conditions de couvert forestier homogène et réduire les risques de dégradation des

instruments de mesures. L'installation des 41 capteurs répartis au sein des combes au Fou (8), à la Mairie (12), Jouvence (8) et Ragot (13) sous forme de transects (de 3 à 5 capteurs) donne l'opportunité d'étudier à fine échelle les variations spatiales des températures intra et inter-combes dans un milieu hétérogène (dénivelé, multiples expositions, etc.).

2. La RNR-FE du Val Suzon, un espace de fraîcheur au sein du dijonnais

En 2023, la température moyenne annuelle est de 10,8°C à Sainte-Foy (323 m), 11,5°C à Magister (312 m), 11,7°C à Goa (536 m) et 12,9°C à Dijon-Longvic (219 m) (figure 5). La RNR-FE, d'altitude plus élevée, est globalement plus fraîche que la plaine dijonnaise. Cet écart est maximal en été (figure 5). Toutefois, les différences thermiques observées au sein de la RNR-FE ne sont pas conditionnées uniquement par l'altitude puisque c'est Sainte-Foy (323 m) qui est la plus fraîche et non Goa (536 m).

Figure 5. Température moyenne mensuelle et annuelle au sein de la RNR-FE et en plaine dijonnaise en 2023. *Mean monthly and annual temperature within the RNR-FE and in the Dijon plain in 2023.*

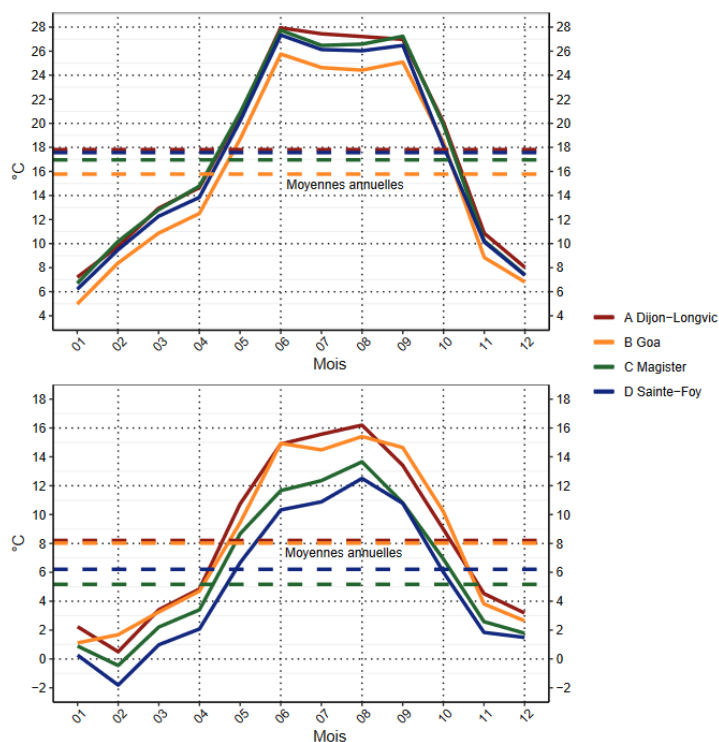


Ces écarts thermiques moyens sont en partie interprétables en distinguant les températures diurnes (Tmax) et nocturnes (Tmin). Les Tmax diffèrent en fonction de l'altitude (figure 6a). En journée, la station Goa dont l'altitude est la plus élevée est, en tout mois de l'année, la plus fraîche. Les stations de plus basses altitudes, entre 200 et 300 m, qu'elles soient en plaine (Dijon-Longvic) ou en fond de vallée du Suzon (Magister à 312 m et Sainte-Foy à 323 m), ont des températures plus chaudes. Les Tmin montrent des différences thermiques non liées à l'altitude (figure 6b). En

effet, les deux stations de fond de vallée sont en moyenne plus fraîches que la station de plateau (Goa), ce quel que soit le mois.

Pour illustrer ces particularités, la figure 7 détaille les écarts thermiques horaires entre la station de fond de vallée (Sainte-Foy) et celle du plateau (Goa), entre le 1^{er} avril et le 31 août. Durant la journée, entre 07:00 et 19:00 UTC, les températures relevées à Sainte-Foy sont plus chaudes que celles de Goa : la vallée est plus chaude que le plateau. Les écarts peuvent atteindre +5°C.

Figure 6. Moyennes mensuelles des températures au sein de la RNR-FE et en plaine dijonnaise en 2023. a) maximales quotidiennes. b) minimales quotidiennes. *Mean monthly temperature within the RNR-FE and in the Dijon plain in 2023. a) daily maximum. b) daily minimum.*



Durant la nuit, entre 19:00 et 07:00 UTC, une inversion thermique se met souvent en place (figure 7, bleu), indiquant des températures plus froides en

fond de vallée. Les écarts thermiques nocturnes vont jusqu'à -10°C.

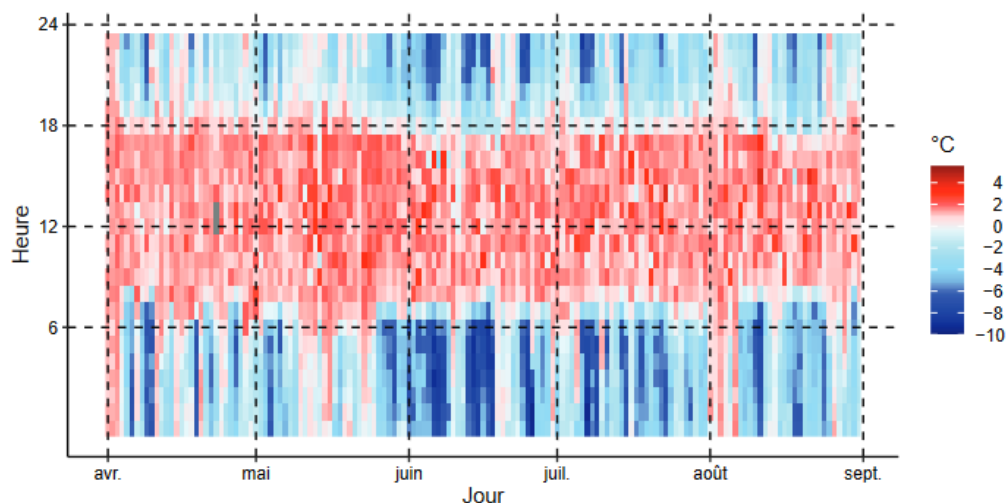


Figure 7. Inversions thermiques au sein de la RNR-FE du Val Suzon. Différence de températures horaires entre Sainte-Foy (323 m) et Goa (536 m) du 1^{er} avril 2023 au 30 septembre 2023. En bleu les inversions thermiques. *Thermal inversions within the Val-Suzon's RNR-FE. Hourly temperature measured at Sainte-Foy (323 m) minus hourly temperature measured at Goa (536 m). April 1, 2023 – September 30, 2023. Thermal inversions in blue.*

Certaines nuits de juin par exemple, ces écarts sont plus élevés (en valeur absolue) que les écarts diurnes. Lorsque le ciel nocturne est dégagé, comme c'est souvent le cas en été, le refroidissement de la surface est plus intense et l'inversion s'amplifie. Elle disparaît rapidement après le lever du soleil

lorsque le rayonnement solaire réchauffe de nouveau la surface et homogénéise le champ de température. De tels écarts nocturnes montrent que le fond de vallée de la RNR-FE est un espace de fraîcheur, en particulier pendant la saison chaude. Cela n'est pas propre à la RNR-FE. Le phénomène

est par exemple observé à l'échelle du Dijonnais (Crétat *et al.*, 2023). Les inversions thermiques sont fondamentales pour comprendre la géographie fine des températures dans de très nombreuses régions de France (Joly et Richard, 2019, 2022a, 2022b).

La fraîcheur de la RNR-FE Val Suzon est remarquable lors d'une vague de chaleur. Du 17 au 24 août 2023 la France a connu une vague de chaleur (Météo-France 2023). Les seuils de vigilance orange de la Côte-d'Or sont 19°C en T_{min} et 34°C en T_{max} pendant trois jours consécutifs (Laaidi *et al.*, 2012). Au cœur de Dijon, Place de la Libération, ces seuils ont été dépassés du 20 au 24

août (figure 8). Le seuil nocturne de 20°C caractérisant les nuits tropicales (Peterson, 2015), a été dépassé lors de ces 4 nuits (figure 8). Les relevés des stations RNR-FE Val Suzon sont très différents :

- aucun dépassement de seuil n'est enregistré à Sainte-Foy, ni nuit tropicale ni jour de canicule ;
- deux dépassements seulement du seuil 34°C en T_{max} à Magister le 22 et 24 août ;
- des dépassements de seuil à Goa la nuit (du 19 au 24 août), mais pas le jour.

La fréquence accrue des vagues de chaleurs font de la RNR-FE Val Suzon un « îlot de fraîcheur ».

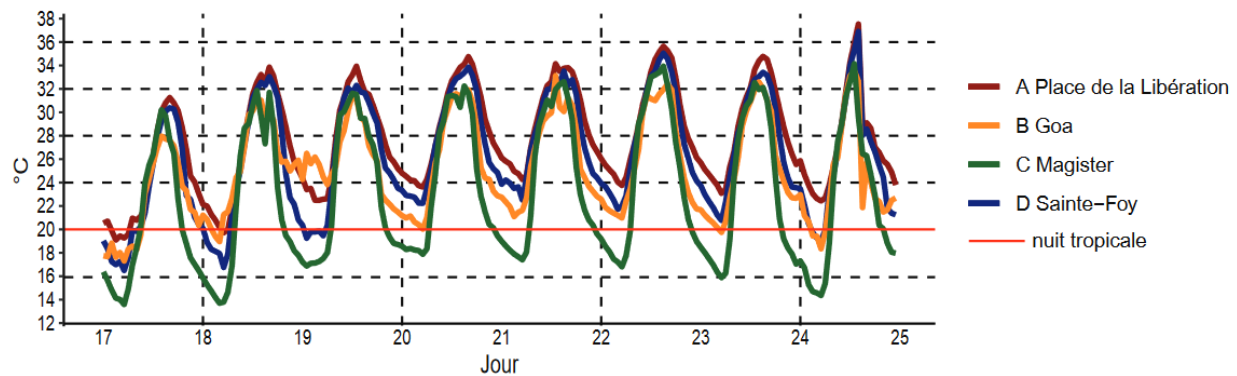


Figure 8. Températures horaires au sein de la RNR-FE et en centre-ville de Dijon lors de la vague de chaleur du 17-25 août 2023. La ligne horizontale indique le seuil définissant les nuits tropicales, soit 20°C pour les températures minimales. *Hourly temperature within the RNR-FE and in downtown Dijon during the heat wave of August 17-25, 2023. The horizontal line indicates the threshold defining tropical nights, i.e. 20°C for minimum temperature.*

3. Un réseau provisoire de mesures à micro-échelle pour étudier les variations thermiques au sein des combes

3.1. Focus sur un début d'automne chaud : contexte météorologique du 14-22 octobre 2023

La durée de la première campagne de mesures étant relativement restreinte, il semblait pertinent de caractériser le contexte météorologique de la période de mesures par rapport à une période de référence. Afin d'approcher autant que possible la dernière normale de températures (1991-2020), et en fonction de la disponibilité des données pour un ensemble de variables météorologiques, entre autres pour la pression de surface, avec l'installation d'un baromètre en 1996, la période 1996-2023 a été retenue à la station de Météo-France de Dijon-Longvic. Située à 6 km de Dijon,

elle se positionne comme une station de plaine, sans influence du tissu urbain. Cette station fournit l'ensemble des variables nécessaires à l'application de la méthode des Local Weather Types (LWT) développée par (Hidalgo et Jouglu, 2018). À l'aide d'une approche de classification sur des moyennes journalières (selon une analyse de type k-means), elle permet de classer les jours ayant des conditions météorologiques homogènes. Ces classes sont calculées à partir des données horaires des précipitations (RR), des températures (T), de la vitesse (FF) et direction (DD) du vent et de l'humidité spécifique (q). L'analyse à partir de cette approche met en évidence 5 LWT (tableau 1). Appliquée sur une plage temporelle plus longue (un an ou plus), les LWT, pourraient permettre de sélectionner de façon objective des journées d'intérêts. Cette approche constitue également un essai méthodologique répliquable aux futures analyses réalisées par le gestionnaire.

	LWT 1	LWT 2	LWT 3	LWT 4	LWT 5
Amplitude thermique diurne (°C)	5,6	10,4	7,8	8,7	12,7
Vitesse du vent (m/s)	3,3	2	3,6	3	3,4
Direction du vent (centroïde)	N-NE	E-SE	S-SO	O-NO	N-NE
Précipitations (mm/jour)	1,44	3,5	1,2	0	0
Occurrence du 14/09 au 22/10 2023 (%)	0	25,6	33,3	20,5	20,5
Occurrence septembre/octobre 1996-2023 (%)	14,7	10,8	36,9	18,2	19,2

Tableau 1. Conditions météorologiques moyennes des LWT 1 à 5 (obtenues à partir des données horaires sur la période 1996-2023 à la station Météo France de Dijon-Longvic). Comparaison des occurrences de la période 14/09/2023-22/10/2023 aux occurrences de septembre et octobre 1996-2023. *Mean weather conditions for LWTs 1 to 5 (calculated from hourly data over the period 1996-2023 at the Météo France station in Dijon-Longvic). Comparison of occurrences from the period 09/14/2023-10/22/2023 to occurrences from September and October 1996-2023.*

Le type de temps local caractérisé par une très faible amplitude thermique diurne (LWT 1) est complètement absent au cours de la période étudiée. Le type à amplitude thermique diurne modéré (LWT3) est un peu moins fréquent que la moyenne 1996-2023 (33 % contre 37 %). A l'inverse, les trois types de temps avec une amplitude thermique diurne élevée sont surreprésentés. Le LWT 2 (forte amplitude thermique diurne, vent faible) présente une occurrence particulièrement élevée (25 % contre 11 %). Les temps secs avec une amplitude thermique diurne moyenne (LWT 4) ou élevée (LWT 5) sont légèrement plus fréquents (LWT 4 : 21 % contre 18 % ; LWT 5 : 21 % contre 19 %). Les mois de septembre et d'octobre 2023 présentent donc un profil météorologique globalement favorable au développement de fortes amplitudes thermiques diurnes. On peut supposer que ces conditions sont associées à un temps radiatif, ensoleillé et peu venté, qui favorise le développement

de gradients thermiques d'échelle locale, par exemple les contrastes thermiques entre fond et haut de combe.

3.2. La topographie structurant la variabilité spatiale des températures intra-combes

Les températures moyennes journalières de l'échantillon étudié (14 septembre au 22 octobre 2023) inter-combes et intra-combes sont décrites selon la localisation des capteurs en adret, ubac, fond de combe, haut et milieu de versant (figure 9). Parmi les 41 capteurs installés, seuls 34 ont été retenus dans l'analyse en raison d'un trop grand nombre de valeurs manquantes sur les 7 autres (plus de 10 %). Un trait commun aux trois combes disposant d'un adret et d'un ubac (*i.e.* Fou, Ragot et Jouvence) est la fraîcheur en fond de combe (température médiane pour chaque station comprise entre 14 et 15°C).

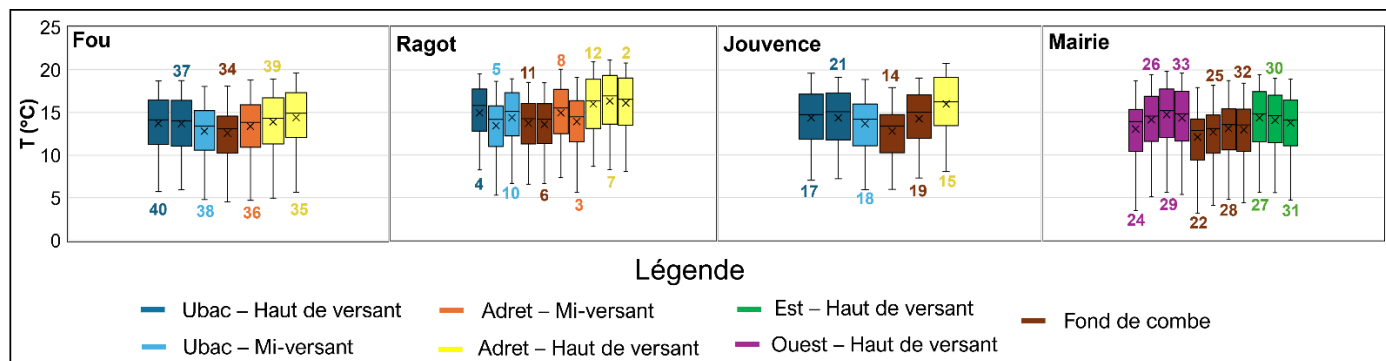


Figure 9. Boîtes à moustaches des variations moyennes journalières de températures enregistrées du 14/09/2023 au 22/10/2023 par les 34 capteurs conservés pour l'analyse et répartis au sein des 4 combes (Fou, Ragot, Jouvence et Mairie). Les numéros attribués aux capteurs sont attachés à chaque boîte à moustaches. *Box plots of average daily temperature variations recorded from 09/14/2023 to 10/22/2023 by the 34 sensors selected for the analysis and located in the 4 valleys (Fou, Ragot, Jouvence and Mairie). The numbers correspond to the station code.*

Les adrets sont en moyenne les plus chauds, particulièrement en haut de versant, marquant ainsi la mise en place d'inversions thermiques dans ces trois combes. Au sein de Ragot, on observe une grande hétérogénéité spatiale de la température, enregistrant les plus forts écarts moyens entre adret et ubac (~ 3 à 4°C). La combe Ragot se démarque par son profil thermique chaud : en moyenne 15°C sur l'ensemble de la période d'étude, contre $14,4^{\circ}\text{C}$ pour Jouvence, $13,7^{\circ}\text{C}$ pour Fou et $13,8^{\circ}\text{C}$ pour Mairie. La variabilité spatiale de la température est également plus élevée au sein de Ragot, avec des températures médianes variant de 14°C en ubac à 17°C en adret.

La combe Mairie se démarque par son orientation Nord-Sud, la privant d'adret et d'ubac. Cela se traduit par une plus grande homogénéité de température entre les hauts des versants Est et Ouest (température médiane comprise entre 17 et 20°C). Le gradient altitudinal est en revanche marqué par un écart de 3 à 4°C entre fond et haut de combe, révélant ainsi la mise en place d'inversions thermiques similaires à celles des combes présentant un adret et un ubac.

Les conditions thermiques observées par temps radiatif dans les combes sont les plus représentatives de la structuration spatiale moyenne des températures (Joly et Richard, 2022a, 2022b). Au sein de la combe Ragot, le contraste thermique est prononcé entre l'ubac et le bas de la combe. Le bas de la combe peut se révéler plus frais de 3°C en moyenne que le sommet du versant adret, avec un gradient de $1,5^{\circ}\text{C}$ avec le capteur du milieu de versant. Cela s'explique par un refroidissement de la surface avec a priori une accumulation d'air froid dans les fonds de combes. A noter que du 14 septembre au 22 octobre 2023, le contexte météorologique dominant marqué par de fortes amplitudes thermiques diurnes et des situations peu ventées a pu renforcer les contrastes thermiques par rapport à une fin d'été et un début d'automne moyen (1996-2023). Ces phénomènes d'inversions thermiques ont déjà été observés à l'échelle du topo-climat par temps anticycloniques (Joly et Richard, 2022b). La convexité qui caractérise les vallées étroites que forment les combes amplifie le phénomène d'écoulement d'air froid (Avila, 2003). Toutefois, en comparaison aux zones ouvertes (e.g. prairies),

dans des conditions topographiques comparables, les amplitudes thermiques peuvent être modérées par le couvert forestier qui agit donc à l'échelle microclimatique (Avila, 2003 ; Joly, 2014). Cette inertie thermique est induite par les arbres qui créent de l'ombrage, une atténuation du vent et de l'évapotranspiration. En d'autres termes, les extrêmes de températures sont moindres en forêt (De Frenne *et al.*, 2021). L'action du couvert forestier est cependant combinée et secondaire à celle de la topographie, et non linéaire par ailleurs (Zellweger *et al.*, 2019). En forêt tempérée, selon Zellweger *et al.* (2019), les T_x peuvent être plus chaudes de 2°C , et les T_n plus fraîches de $0,4$ à $0,9^{\circ}\text{C}$ en moyenne. En revanche, certaines études déployant un réseau de capteurs plus dense ont montré l'augmentation de la part explicative de la structure forestière sur les variations des températures (91 % à 10 mètres de résolution), avec un effet souvent « tamponné » du microclimat forestier (Gril *et al.*, 2023). Sur la RNR-FE, outre le type de sol, des indicateurs tels que la densité de peuplement ou encore le « *Leaf Area Index* » (LAI), qui semblent varier entre adret et ubac selon les observations sur le terrain, pourraient également expliquer une part des variations de températures à l'échelle intra-combe.

Conclusion et perspectives

Dans un contexte de changement climatique, les hêtraies sont particulièrement affectées par une réduction de leur croissance radiale, y compris au nord de leur aire de répartition (Leuschner, 2020). A l'échelle de la RNR-FE du Val Suzon, les hêtraies occupent environ un tiers de la surface forestière mais s'établissent presque exclusivement dans les combes. Le diagnostic de vulnérabilité au changement climatique (Marchal *et al.*, 2023) a mis plusieurs éléments en exergue. De façon générale, la RNR-FE est exposée à une transformation de ses écosystèmes, la plus visible étant le dépérissement des hêtraies. Ce phénomène s'intensifie depuis les sécheresses et canicules de 2018 (Marchal *et al.*, 2023). Dans la RNR-FE, le gestionnaire observe que, selon la nature des hêtraies (froides, sèches, etc.), le niveau de dépérissement est différent.

Outre cela, les dépérissements et *in fine* les nombreuses chutes d'arbres, engendrent une

véritable problématique de sécurité sur la route principale de la vallée et sur certains sentiers de randonnée (Tréca, 2024).

Dès lors, répondre aux enjeux d'étude, de suivi et d'observation du climat local et des microclimats est essentiel afin d'apporter les outils nécessaires au gestionnaire pour bâtir des stratégies d'adaptation à long terme. Les trois stations météorologiques et les 41 capteurs installés dans les combes ont permis de produire un premier diagnostic climatique de la RNR-FE Val Suzon. Cette étude exploratoire indique que la RNR-FE constitue un espace de fraîcheur par rapport au cœur de l'agglomération Dijonnaise, la différence étant maximale en été, environ 2,5°C. Toutefois, la zone étudiée montre des comportements thermiques très hétérogènes, conditionnés d'abord par des variables topographiques, comme l'exposition et l'altitude. Ces différences sont amplifiées par temps radiatif. À l'échelle de la réserve, cette hétérogénéité se caractérise par exemple par des températures nocturnes plus élevées en plateau qu'en fond de combe. À plus fine échelle, l'orientation contribue à l'hétérogénéité spatiale des températures. Les combes disposant d'un adret et d'un ubac se révèlent en moyenne plus chaudes, de 1 à 2°C, que la combe orientée Nord-Sud caractérisée par une plus forte homogénéité spatiale de la température.

Ce premier diagnostic climatique n'est pas encore suffisant pour caractériser les microclimats de la RNR-FE du Val Suzon et définir des stratégies d'adaptation à long terme. Le prochain objectif de la collaboration entre l'ONF et le CRC consiste donc à pérenniser un réseau de mesures adapté aux combes en fonction des enjeux de biodiversité, avec comme étape, l'installation de cet observatoire en 2025. Densifier l'équipement en capteurs sur un nombre réduit de combes est une piste envisagée. Des précisions à l'échelle intra-combe pourraient être apportées ainsi sans démultiplier le nombre de capteurs et le temps de maintenance. Cela permettrait de répondre aux questions sur le rôle de la densité du couvert forestier que se pose le gestionnaire. La prochaine analyse qui sera réalisée avec les données d'observation sur la période allant de septembre 2023 à septembre 2024, aura vocation à donner des préconisations plus abouties avant la pérennisation du réseau de mesures.

Remerciements : Les auteurs remercient Météo-France pour la mise à disposition des données de la station de Dijon-Longvic (convention avec l'Université de Bourgogne), ainsi que les membres de l'Office National des Forêts et du Centre de Recherches de Climatologie ayant pris part au projet pédagogique. Nous remercions les six étudiants de la promotion de M2 CClimAT 2023-2024 ayant participé à ce projet : Bio Orou-N'Gobi, Céline Lordey, Gabriel Mvoutou-Moulié, Guillaume Huteau, Sarah Prunot et Yukari Itagaki.

Références bibliographiques

- Avila F., 2003. Influence de la topographie et du substrat sur les écarts thermiques nocturnes : région limoneuse du Moyen-Adour et clairières sableuses de la forêt des landes (France). *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, 15, 135-142.
- Bernard C.E. et Tréca M., 2019a. *Plan de gestion 2020 – 2029, Réserve Naturelle Régionale et Forêt d'Exception® du Val Suzon – Tome 1 - Etat des lieux*. Office National des Forêts.
- Bernard C.E. et Tréca M., 2019b. *Plan de gestion 2020 – 2029, Réserve Naturelle Régionale et Forêt d'Exception® du Val Suzon – Tome 2 – Stratégie et plan de gestion*. Office National des Forêts.
- Brusse T., Lenoir J., Boisset N., Spicher F., Dubois F., Caro G., Marrec R., 2024. Mechanistically mapping near-surface temperature in the understory of temperate forests: A validation of the microclima R package against empirical observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 346, 109894. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.109894>.
- Coudurier C., Petit L., Tissota A. C., Lochon I., Dane J., Champion ., 2023. *Démarche d'adaptation au changement climatique Natur'Adapt – Guide méthodologique d'élaboration d'un diagnostic de vulnérabilité et d'opportunité et d'un plan d'adaptation à l'échelle d'une aire protégée*. LIFE Natur'Adapt – Réserves Naturelles de France, 70pages. <https://naturadapt.com/groups/communaute/documents/556/get>.
- Crétat J., Richard Y., Pohl B., Emery J., Dudek J., Roy D., Pergaud J. *et al.*, 2023. Impact of topography and land cover on air temperature space-time variability in an urban environment with contrasted topography (Dijon, France, 2014–2021). *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 1941-1958 . <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04742-4>.
- De Frenne P., Lenoir J., Luoto M., Scheffers B., Zellweger F., Aalto J., Ashcroft M., Christiansen D., Decocq G., De Pauw K., Govaert S., Greiser C., Gril E., Hampe A., Jucker T., Klimes D., Koelemeijer I., Lembrechts J., Marrec R., Meeussen C., Ogee J., Tyystjärvi V., Vangansbeke P., Hylander K., 2021. Forest microclimates and climate change: Importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, 27(11), 2279-2297. <https://doi.org/10.1111/gcb.15569>.

- Hidalgo J. et Jougl R., 2018. On the use of Local Weather Types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse. *PLOS ONE*, 13 (12), e0208138. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208138>.
- Gril E., Laslier M., Gallet-Moron E., Durrieu S., Spicher F., Le Roux V., Brasseur B., Haesen S., Van Meerbeek K., Decocq G., Marrec R., Lenoir J., 2023. Using airborne LiDAR to map forest microclimate temperature buffering or amplification. *Remote Sensing of Environ.*, 298, 113820. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113820>.
- Jégou A., Martiny N., Richard Y., Thevenin T., 2024. La métropole sous observation environnementale. Autrement, ebook (ePub), Dalloz Librairie, Paris. <https://www.librairiedalloz.fr/ebook/9782080438737-la-metropole-sous-observation-environnementale-anne-jegou-nadege-martiny-yves-richard-thomas-thevenin/>.
- Joly D., 2014. Étude comparative de la température en forêt et en espace ouvert dans le parc naturel régional du Haut-Jura. *Climatologie*, 11, 19-33. <https://doi.org/10.4267/climatologie.562>.
- Joly D. et Richard Y., 2019. Frequency, intensity, and duration of thermal inversions in the Jura Mountains of France. *Theoretical and Applied Climatology*, 138 (1), 639-55. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02855-3>.
- Joly D. et Richard Y., 2022a. Temperature inversions in France – Part A: Time variations. *Climatologie*, 19, 4. <https://doi.org/10.1051/climat/202219004>.
- Joly D. et Richard Y., 2022b. Temperature inversions in France – Part B: Spatial variations. *Climatologie*, 19, 5. <https://doi.org/10.1051/climat/202219005>.
- Laaidi K., Ung A., Wagner V., Beaudeau P., Pascal M., 2012. *Système d'alerte canicule et santé : principes, fondements et évaluation*. Institut de Veille Sanitaire, Départ. santé environnement, <https://www.santepubliquefrance.fr/content/download/558002/4005231?version=1>.
- Lenoir J., Hattab T., Pierre G., 2017. Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: Implications for species redistribution. *Ecography*, 40(2), 253-66. <https://doi.org/10.1111/ecog.02788>.
- Marchal T., Ginda A., Tréca M., 2023. *Diagnostic de vulnérabilité et d'opportunité Natur'Adapt, démarche d'adaptation au changement climatique du Val Suzon*. Office National des Forêts.
- Météo-France, 2023. *Août 2023 : une canicule tardive exceptionnelle sur une grande partie du pays*. <https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/actualites/fortes-chaleurs-aout-2023>.
- Peterson T. C., 2015. Climate change indices. *World Meteorological Organization Bulletin*, 54 (2), 83-86.
- Richard Y., Emery J., Dudek J., Pergaud J., Chateau-Smith C., Zito S., Rega M. *et al.*, 2018. How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate*, 26, 258-74. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.002>.
- Richard Y., Rega M., Pohl B., Pergaud J., Emery J., Vairret T., Diallo-Dudek J., Zito S., Thevenin D., Thévenin T., 2018. Îlot de Chaleur Urbain et canicules : quelles relations ? Publications de l'Association Internationale de Climatologie, 31, 213-218. <https://hal.science/hal-01859192>.
- Zellweger F., Coomes D., Lenoir J., Depauw L., Maes S., Wulf M., Kirby K., Brunet J., Kopecký M., Malis F., Schmidt W., Heinrichs S., Den Ouden J., Jaroszewicz B., Buyse G., Spicher F., Verheyen K., De Frenne P., 2019. Seasonal drivers of understorey temperature buffering in temperate deciduous forests across Europe. *Global Ecology and Biogeography*, 28(12): 1774-1786. <https://doi.org/10.1111/geb.12991>.

Citation de l'article : Huteau G., Prunot S., Marchal T., Tréca M., Rega M., Roucou P., Richard Y., 2024. Élaboration d'un observatoire climatique dans la Réserve Naturelle Régionale et Forêts d'Exception du Val Suzon (Bourgogne-Franche-Comté, France). *Climatologie*, 22, 4.