

Mémoire

Auteur : Jacqué Decors, Arnaud

Promoteur(s) : Schmitz, Serge

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23932>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège
Faculté des Sciences
Département de Géographie

Analyse de l'impact des conditions météorologiques sur la fréquentation des attractions touristiques au Grand-Duché de Luxembourg dans un contexte de changement climatique

Mémoire présenté par Arnaud Jacqué

En vue de l'obtention du grade de Master en Sciences Géographiques,
Orientation Global Change à finalité approfondie

Promoteur : Pr. Serge Schmitz

Président de Jury : Pr. Xavier Fettweis

Jury de Lecture : Pr. Xavier Fettweis

Dr. Nicolas Ghilain

Année académique 2024 – 2025

Défense : septembre 2025



Université de Liège
Faculté des Sciences
Département de Géographie

Analyse de l'impact des conditions météorologiques sur la fréquentation des attractions touristiques au Grand-Duché de Luxembourg dans un contexte de changement climatique

Mémoire présenté par Arnaud Jacqué

En vue de l'obtention du grade de Master en Sciences Géographiques,
Orientation Global Change à finalité approfondie

Promoteur : Pr. Serge Schmitz

Président de Jury : Pr. Xavier Fettweis

Jury de Lecture : Pr. Xavier Fettweis

Dr. Nicolas Ghilain

Année académique 2024 – 2025

Défense : septembre 2025

Déclaration sur l'honneur

Je soussigné, Arnaud Jacqué, déclare par la présente que le mémoire intitulé :

Analyse de l'impact des conditions météorologiques sur la fréquentation des attractions touristiques au Grand-Duché de Luxembourg dans un contexte de changement climatique

a été rédigé par mes soins, sans avoir eu recours à des sources ou à des aides non autorisées. Toutes les sources utilisées, y compris les citations directes ou indirectes, ont dûment été mentionnées et référencées.

J'atteste également avoir utilisé des outils d'intelligence artificielle générative de manière responsable, uniquement pour des tâches de reformulation, de clarification linguistique et d'aide à la structuration. L'ensemble du contenu a été vérifié, validé et rédigé sous ma propre responsabilité.

Conformément à la *Charte ULiège d'utilisation des intelligences artificielles génératives dans les travaux universitaires* (mise à jour du 22/12/2023), ces outils ont été employés exclusivement dans le cadre des usages permis, à savoir en tant qu'assistant linguistique et assistant à la recherche d'information, sans aucune production de contenu autonome.

Remerciements

Ce mémoire est l'aboutissement d'un travail qui n'aurait jamais pu voir le jour sans le soutien, la disponibilité et la bienveillance de nombreuses personnes, auxquelles j'aimerais adresser ici toute ma reconnaissance.

Je souhaite avant tout exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, Monsieur le professeur Serge Schmitz, pour son encadrement attentif, sa disponibilité constante et la pertinence de ses conseils tout au long de cette recherche.

Je remercie également Géant Chuma Basimine pour son aide précieuse dans la compréhension et l'organisation de certains aspects de mes analyses statistiques.

Ce travail n'aurait pas été possible sans la collaboration des responsables de nombreux sites touristiques, qui m'ont accordé leur confiance et transmis des données parfois confidentielles. Je tiens à remercier particulièrement Raffaella Campobasso (Musée National des Mines), Ramon Hemmer (« Erlebnis Baggerweier »), Quentin Lebecque (commune de Troisvierges), Frank Richarz et Tom Schmit (Naturpark Öewersauer) pour leur accueil chaleureux, le temps qu'ils m'ont consacré et les informations complémentaires partagées lors de nos échanges.

Je remercie également Alain Krier (Luxembourg for Tourism) pour les éclairages pertinents apportés sur la situation touristique nationale.

À tous les autres acteurs qui ont pris le temps de partager leurs données de fréquentation, je souhaite adresser ma sincère reconnaissance : Eric Hahn (ORT Éislek – Visit Éislek), Pitt Kirtz (ORT Müllerthal), Frank Leonardy (Les Amis du Château de Vianden), Marc Gierenz et Bastien Dubuisson (Centre des Monuments du Grand-Duché de Luxembourg), Maud Hansen (Yolande Coop), Vera Thill (Aqua Nat'Our), Jean-Claude Kemmer (Réidener Schwämm), Marc Bosoni (commune de Pétange), Isabelle Richter (Centre Aquatique Krounebiérg), Susana Moutinho et Jutta Kleiber (Les Thermes), Christiane Strasser-Kremer (An der Schwemm), Alexis Cardoso (ville de Dudelange) et Hanna Weires (Syndicat d'Initiative de Stolzembourg).

Je souhaite également remercier Monsieur le Ministre Lex Delles ainsi que Madame la Directrice Jeanne Tonnar pour m'avoir accueilli en stage au sein de son équipe de la Direction générale du Tourisme et qui m'a permis de découvrir, de l'intérieur, la gestion du tourisme au Grand-Duché de Luxembourg. Ma gratitude s'adresse également à Laura Schömer et Gina Reuland, pour leur aide précieuse au démarrage de mon mémoire, ainsi qu'à Edwige Fogel, dont le soutien a été exceptionnel.

Mes remerciements vont aussi à mes amis et camarades, pour leur soutien constant, leur bonne humeur et ces cinq années d'études partagées à Liège. Leur amitié, leur intégration bienveillante dans la vie liégeoise et les souvenirs que nous avons construits ensemble resteront inoubliables.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma famille pour son soutien indéfectible tout au long de mon parcours universitaire. Florence, merci pour tes conseils avisés, ta présence rassurante et ton accueil durant mes stages. Maman et Papa, merci de m'avoir toujours encouragé, de m'avoir offert les meilleures conditions pour mes études, et aussi d'avoir consciencieusement relu ce travail.

Résumé

Ce mémoire examine l'impact des conditions météorologiques sur la fréquentation des attractions touristiques au Grand-Duché de Luxembourg, dans un contexte de changement climatique. L'analyse repose sur des données journalières de fréquentation et de variables climatiques couvrant les saisons touristiques 2023 et 2024. Elle explore les relations entre météo et fréquentation selon trois grands types d'activités : visites culturelles, loisirs aquatiques et randonnée.

Afin de dépasser la simple observation des températures et d'intégrer la dimension du ressenti, l'étude mobilise l'Holiday Climate Index (HCI). Cet indice, conçu spécifiquement pour appréhender la perception du climat par les touristes, permet de classer les conditions météorologiques en différentes catégories allant de « *Dangereux* » à « *Idéal* ». L'approche adoptée croise donc l'analyse directe des températures avec une perspective biométéorologique, offrant une lecture plus complète de l'influence du climat sur les comportements touristiques.

Les résultats mettent en évidence des sensibilités météorologiques contrastées selon les activités. Les conditions optimales, associées aux catégories « *Idéal* » et « *Excellent* » du HCI, s'accompagnent généralement d'une hausse significative de la fréquentation, tandis que les conditions défavorables entraînent des baisses notables. Toutefois, certaines attractions se distinguent par une affluence élevée même lors de conditions météorologiques moins favorables, traduisant des facteurs d'attractivité indépendants de la météo ou une adaptation spécifique de la clientèle.

En définitive, ce travail contribue à une meilleure compréhension des interactions entre climat et tourisme au Grand-Duché de Luxembourg et met en lumière la nécessité d'une planification touristique résiliente. Dans un contexte où le réchauffement climatique modifie déjà les comportements et les flux touristiques, disposer d'analyses quantitatives fines et contextualisées constitue un atout majeur pour orienter les choix stratégiques, garantir la durabilité du secteur et exploiter pleinement les opportunités émergentes. Parmi celles-ci, le développement du « tourisme de fraîcheur » ou *coolcation* pourrait renforcer l'attractivité du Grand-Duché de Luxembourg dans les années à venir.

Abstract

This thesis examines the impact of weather conditions on the attendance of tourist attractions in the Grand Duchy of Luxembourg within the context of climate change. The analysis is based on daily attendance data and climatic variables covering the 2023 and 2024 tourist seasons. It explores the relationship between weather and visitation across three main types of activities: cultural visits, aquatic leisure, and hiking.

To go beyond the simple observation of temperatures and to integrate the dimension of perceived weather, the study employs the Holiday Climate Index (HCI). This index, specifically designed to capture tourists' perception of climate, classifies weather conditions into various categories ranging from "Dangerous" to "Ideal." The adopted approach therefore combines direct temperature analysis with a biometeorological perspective, offering a more comprehensive understanding of the influence of climate on tourist behavior.

The results highlight contrasting weather sensitivities depending on the type of activity. Optimal conditions, associated with the "Ideal" and "Excellent" categories of the HCI, generally correspond to a significant increase in visitation, while unfavorable conditions lead to notable declines. However, certain attractions stand out by maintaining high visitor numbers even during less favorable weather conditions, reflecting factors of attractiveness independent of climate or specific adaptations of their clientele.

Ultimately, this work contributes to a better understanding of the interactions between climate and tourism in the Grand Duchy of Luxembourg and underscores the need for resilient tourism planning. In a context where climate change is already reshaping tourist behaviors and flows, the availability of precise and contextualized quantitative analyses constitutes a key asset for guiding strategic decisions, ensuring the sector's sustainability, and fully seizing emerging opportunities. Among these, the development of "coolcation" tourism could strengthen the attractiveness of the Grand Duchy of Luxembourg in the years to come.

Table des matières

1. Introduction.....	5
2. Le tourisme : Dynamiques, échelles et pratiques.....	7
2.1. Le tourisme à l'échelle mondiale	7
2.2. Compétitivité touristique et position stratégique du G-D de Luxembourg	7
2.3. Les pratiques touristiques des résidents luxembourgeois.....	8
2.4. Le G-D de Luxembourg comme destination touristique.....	9
2.5. Le tourisme face aux enjeux climatiques	11
2.5.1. Climat et tourisme : une relation étroite mais complexe	11
2.5.2. Indicateurs climatiques et perceptions thermiques	13
2.5.3. Vulnérabilité du tourisme européen aux vagues de chaleur	13
2.5.4. L'utilité stratégique des données climatiques pour le tourisme.....	14
3. Le Climat : Dynamiques présentes et futures	15
3.1. Le climat actuel du G-D de Luxembourg	15
3.1.1. Températures moyennes et évolution.....	15
3.1.2. Précipitations et humidité	16
3.1.3. Insolation et vent	18
3.1.4. Événements extrêmes.....	19
3.1.5. Carte climatique de Köppen-Geiger	19
3.2. Modéliser le changement climatique	21
3.2.1 Projections du changement climatique au G-D de Luxembourg.....	22
3.3. Les vagues de chaleur	27
3.3.1. Introduction aux vagues de chaleur	27
3.3.2. Définition : débats scientifiques et limites actuelles	27
3.3.3. Tendances observées à l'échelle globale.....	29
3.3.4. Les vagues de chaleur au G-D de Luxembourg	30
3.4. Ressenti climatique et indices thermiques	33
3.4.1. Classification et principes des indices thermiques	33
3.4.2. Indices fondés sur le bilan énergétique humain	34
3.4.3. Le Tourism Climate Index (TCI).....	36
3.4.4. Le Holiday Climate Index (HCI)	38
4. Méthodologie.....	40
4.1. Collecte des données de fréquentation touristique	40
4.2. Données météorologiques	41
4.3. Période d'étude	43
4.4. Catégorisation des attractions touristiques	44
4.5. Les attractions touristiques analysées.....	45
4.6. Définitions et indices climatiques utilisés	47
4.6.1. La définition de vagues de chaleur	47
4.6.2 Les indices climatiques touristiques	50
5. Analyse de la fréquentation touristique.....	57
5.1 Fréquentation touristique par type d'activité.....	57
5.1.1. Fréquentation de l'activité « Visites Culturelles »	58
5.1.2. Fréquentation de l'activité « Loisir aquatique ».....	59

5.1.3. Fréquentation de l'activité « Randonnée »	60
5.2. Fréquentation touristique selon le type de jour	61
5.2.1. Répartition de la fréquentation	61
5.2.2. Variation relative entre jours de semaine et week-ends/fériés	64
5.3. Jours à fréquentation anormale	67
5.3.1. Proportion de jours à fréquentation anormale	68
5.3.2. Fréquentation anormalement basse	69
5.3.3. Fréquentation anormalement haute	71
6. Analyse météorologique.....	73
6.1. Analyse des vagues de chaleur	73
6.1.1. Résultats des vagues de chaleur	74
6.2. Analyse des indices thermiques	75
6.2.1. Résultats du HCI.....	75
7. Analyse des relations fréquentation – météorologie	78
7.1. Impact des jours de chaleur sur la fréquentation.....	78
7.1.1. Analyse générale	78
7.1.2. Analyse par activité.....	79
7.1.3. Analyse par site	79
7.1.4. Conclusion.....	81
7.2. Lien entre HCI et fréquentation touristique	81
7.2.1. Résultats globaux	82
7.2.2. Résultats par activité	84
7.3. Analyse RADAR.....	94
7.3.1. Normalisation commune des indices	94
7.3.2. Indice Variabilité & Extrêmes	95
7.3.3. Indice Week-end / Férié	95
7.3.4. Indice Effet Chaleur	96
7.3.5. Indice Résilience à la pluie	96
7.3.6. Indice Beau Temps HCI	97
7.3.7. Indice Mauvais temps HCI.....	97
7.3.8. Grille de lecture du graphique RADAR	97
7.3.9. Résultats RADAR	98
8. Discussion.....	105
8.1. Limites de l'étude	108
8.2. Ouvertures et perspectives	109
9. Conclusion	110
10. Annexes.....	112
10.1. Liste des Attractions	112
10.2. Catalogue des Attractions « Visite Culturelle ».....	113
10.3. Catalogue des Attractions « Loisir Aquatique »	116
10.4. Catalogue des Attractions « Randonnée ».....	121
10.4. Annexes – Autres.....	131
11. Bibliographie.....	134

1. Introduction

Le tourisme occupe aujourd'hui une place majeure dans l'économie mondiale. En prenant en compte ses effets directs, indirects et induits, les voyages et le tourisme représentent environ 10 % du produit intérieur brut mondial et soutiennent des centaines de millions d'emplois à travers le monde (WTTC, 2024). En Europe, comme au Grand-Duché (G-D) de Luxembourg, ce secteur constitue un levier essentiel de développement local, de diversification économique et de valorisation culturelle.

Au G-D de Luxembourg, l'activité touristique repose sur un éventail d'atouts complémentaires, comprenant un patrimoine historique et architectural riche, des paysages naturels diversifiés et une offre culturelle et événementielle particulièrement dynamique. La fréquentation se répartit donc entre plusieurs formes de pratiques, parmi lesquelles les visites culturelles, les loisirs de plein air et les randonnées, qui attirent à la fois un public étranger et les résidents du pays.

Cependant, ces activités touristiques reposent en grande partie sur des conditions environnementales et climatiques favorables. Les conditions météorologiques influencent directement les comportements des visiteurs, notamment dans le choix des activités, la durée du séjour ou encore la décision de sortie à la journée. Par conséquent, le changement climatique en cours représente un enjeu majeur pour le secteur touristique, avec des effets potentiellement négatifs, tels que les canicules, les événements météorologiques extrêmes ou la dégradation des paysages, mais également des effets positifs, comme l'allongement des saisons et le développement de nouvelles formes de tourisme. L'ampleur et la nature de ces impacts peuvent varier selon les territoires et les types d'activités (IPCC, 2022 ; Scott *et al.*, 2019).

Le réchauffement climatique se traduit déjà en Europe par une augmentation des températures moyennes, une intensification des vagues de chaleur et une modification des régimes de précipitations (Matzarakis *et al.*, 2013). Ces évolutions sont appelées à se poursuivre, influençant non seulement le confort thermique des visiteurs mais aussi la faisabilité et l'attrait de certaines pratiques touristiques. Dans ce contexte, comprendre comment les conditions météorologiques affectent la fréquentation touristique permet d'anticiper les adaptations nécessaires.

L'hypothèse de base de cette recherche est qu'en étudiant les variations de fréquentation liées aux conditions météorologiques, il est possible d'appréhender les impacts du changement climatique sur les tendances de fréquentation touristique des

différentes attractions et activités. Autrement dit, les comportements observés aujourd'hui face à des conditions météorologiques contrastées peuvent fournir des indications précieuses sur la manière dont la demande touristique pourrait évoluer dans un climat futur.

Pour analyser ce lien, l'étude commence par identifier les journées de chaleur à partir des données de température, puis croise ces journées avec les niveaux de fréquentation touristique. Dans un second temps, l'analyse est approfondie à l'aide de l'indice Holiday Climate Index (HCI), conçu pour évaluer la qualité et le confort climatique perçus par les touristes à partir de plusieurs variables météorologiques telles que la température, l'humidité, les précipitations, le vent, etc. Le HCI est appliqué à des données journalières couvrant la fréquentation de différents sites et activités au G-D de Luxembourg pour deux saisons estivales. Les variations de fréquentation sont ensuite examinées en fonction des catégories de HCI, en tenant compte des différences selon les types d'activités, qu'il s'agisse de visites culturelles, de loisirs aquatiques ou de randonnées, ainsi que selon les jours de semaine et les périodes de vacances ou de jours fériés.

La méthodologie repose ainsi sur un croisement entre données de fréquentation touristique et données météorologiques issues de stations locales, avec un traitement statistique visant à identifier les corrélations, tendances et différences significatives. Cette approche permet non seulement de décrire l'influence immédiate des conditions climatiques, mais aussi d'ouvrir une réflexion sur les impacts potentiels du changement climatique à plus long terme, en s'appuyant sur les projections climatiques disponibles pour le G-D de Luxembourg.

Ce mémoire se structure de la manière suivante. Une revue de la littérature scientifique présente d'abord le contexte général du tourisme, puis le contexte général du climat, avant d'aborder les interactions entre ces deux dimensions. La méthodologie, consacrée à l'acquisition et au traitement des données, est ensuite détaillée. Viennent ensuite l'analyse des résultats et leur discussion à la lumière de l'hypothèse formulée. Enfin, la conclusion propose une synthèse des principaux enseignements ainsi que des perspectives d'adaptation pour le secteur touristique luxembourgeois dans un contexte de réchauffement climatique.

2. Le tourisme : Dynamiques, échelles et pratiques

2.1. Le tourisme à l'échelle mondiale

L'année 2023 marque une étape importante dans la trajectoire de reprise du tourisme international après la pandémie de COVID-19. Avec 1,3 milliard d'arrivées internationales enregistrées, le secteur a retrouvé environ 89 % de son niveau prépandémique, affichant une résilience notable face à trois années de restrictions sanitaires mondiales. Les recettes touristiques internationales ont presque retrouvé leur niveau de 2019, atteignant 1 500 milliards de dollars (-2 % par rapport à 2019), et les revenus totaux issus du tourisme, incluant le transport, se sont élevés à 1 800 milliards de dollars, soit 99 % du niveau d'avant crise en termes réels (WTO, 2024).

L'Europe reste la première région touristique mondiale, avec 707 millions d'arrivées en 2023, soit 95 % du niveau de 2019. Cette performance s'explique notamment par la forte demande intra-régionale et la reprise des flux transatlantiques, notamment en provenance des États-Unis (WTO, 2024). Le retour des touristes asiatiques est en revanche plus lent (Statec, 2024). De manière globale, la croissance du tourisme est portée par une demande de loisirs soutenue et une ouverture croissante des destinations (WTO, 2024 ; Statec, 2024).

À ce stade, on observe que deux pays voisins du G-D de Luxembourg, la France (1ère destination mondiale) et l'Allemagne (8ème en 2023) (WTO, 2024), se situent parmi les principales destinations internationales. Cela confirme la position stratégique du G-D de Luxembourg au cœur de flux touristiques majeurs, notamment en tant que territoire de transit ou de séjour complémentaire.

2.2. Compétitivité touristique et position stratégique du G-D de Luxembourg

L'attractivité touristique d'un pays ne peut se mesurer uniquement par le nombre d'arrivées ou les recettes enregistrées. Le G-D de Luxembourg se distingue à cet égard par une compétitivité exceptionnelle lorsqu'on considère les indicateurs qualitatifs et financiers. Selon Dogru *et al.* (2021), le Grand-Duché se place en tête du classement mondial en termes de performance touristique, mesurée par dollar dépensé par visiteur, grâce à une analyse par « shift-share » (SSA) qui distingue les effets de la croissance globale (GGE), de la spécialisation sectorielle (GIME) et de

l'avantage compétitif propre (GCSE). Ce dernier indique une très forte capacité du G-D de Luxembourg à convertir les flux touristiques en retombées économiques significatives, traduisant une excellente efficacité touristique (Dogru *et al.*, 2021).

Cette compétitivité s'explique en partie par une infrastructure moderne, une offre culturelle dense (musées, châteaux, sites UNESCO), une qualité d'accueil reconnue (LFT, 2020), et par la situation géographique du pays au cœur de la Grande Région transfrontalière. Celle-ci inclut la Wallonie, la Lorraine, la Rhénanie-Palatinat, la Sarre et le G-D de Luxembourg, et constitue l'un des espaces de mobilités quotidiennes les plus intenses de l'Union européenne (Järv *et al.*, 2022). En 2023, on estime qu'environ 170 000 travailleurs frontaliers résidaient dans les régions voisines du Grand-Duché et s'y rendaient quotidiennement pour travailler. Parmi eux, environ 60 % provenaient de France, 20 % d'Allemagne et 15 % de Belgique (SIG-GR, 2024). Ceci favorise également les pratiques touristiques de proximité, comme les escapades urbaines, les séjours en nature et les visites culturelles transfrontalières. Cette densité de flux renforce l'interconnexion touristique du G-D de Luxembourg avec ses voisins et contribue à expliquer la solidité de sa performance dans les classements de compétitivité.

2.3. Les pratiques touristiques des résidents luxembourgeois

Les résidents luxembourgeois sont parmi les plus grands voyageurs d'Europe. En 2022, chaque résident a effectué en moyenne 5,5 séjours touristiques, plaçant le pays en 3ème position après la Suède et la Finlande. En nombre de nuitées, le G-D de Luxembourg est premier avec une moyenne de 35 nuitées par an et par résident (Statec, 2024).

Parmi les séjours effectués, 86 % sont des voyages de loisirs, dont (Statec, 2024) :

- 51 % sont des vacances,
- 31 % sont des visites familiales et amicales,
- 4 % concernent la santé, la religion, l'éducation, etc.

Les séjours professionnels représentent 14 % du total, mais ce segment reste marqué par une reprise lente depuis la pandémie (-12 % par rapport à 2019), probablement en raison de la digitalisation des échanges professionnels (Statec, 2024). Les séjours estivaux sont deux fois plus nombreux que pendant le reste de l'année, et leur durée

est également plus longue. La grande majorité des voyages s'effectue en Europe (87 %), avec une prédominance des pays frontaliers : France, Allemagne et Belgique (Statec, 2024).

2.4. Le G-D de Luxembourg comme destination touristique

Longtemps considéré comme une destination secondaire dans le paysage touristique européen, le G-D de Luxembourg affirme progressivement son positionnement grâce à une stratégie ambitieuse et une offre diversifiée, comme en témoignent des résultats en constante amélioration. En 2023, le Grand-Duché a accueilli 1,4 million d'arrivées dans ses hébergements touristiques, dépassant pour la première fois le niveau de fréquentation enregistré avant la pandémie de COVID-19, avec une hausse de 9 % (Statec, 2024). Cette progression confirme la bonne dynamique enclenchée au sortir de la crise sanitaire et témoigne d'une résilience remarquable du secteur touristique national.

Ce rebond est tiré en grande majorité par le tourisme international, qui représente 87 % des arrivées. Les Pays-Bas, l'Allemagne et la Belgique constituent les principaux marchés émetteurs, totalisant à eux seuls une arrivée sur deux dans les établissements touristiques du G-D de Luxembourg (Statec, 2024). Ce constat traduit à la fois une proximité géographique stratégique et une accessibilité renforcée grâce à un service de transport gratuit et des infrastructures bien développées. Le tourisme domestique, bien que minoritaire, reste stable à 13 %, avec environ 180 000 arrivées en 2023 (Statec, 2024). Il joue un rôle complémentaire et a notamment gagné en importance durant la période post-COVID, dans un contexte de reterritorialisation des pratiques touristiques

Le G-D de Luxembourg se caractérise par une capacité d'accueil variée et équilibrée entre hébergements fixes et de plein air apte à répondre aux attentes d'un large éventail de clientèles (Statec, 2024) :

- 7 742 chambres réparties dans hôtels, auberges et pensions,
- 38 177 places disponibles sur les terrains de camping,
- 1 043 places-lits en auberges de jeunesse,
- 1 398 places-lits en gîtes d'étape.

La répartition géographique de cette capacité d'hébergement reflète les disparités régionales en matière d'attractivité et de spécialisation touristique. Ainsi, la région

Centre, incluant la capitale, concentre plus de 61,5 % de l'offre hôtelière du pays, avec 94 établissements recensés, confirmant son rôle moteur dans le tourisme urbain et culturel. À l'inverse, l'Ardenne luxembourgeoise, appelée Oesling s'impose comme la première destination de tourisme de plein air, avec plus de la moitié des campings du pays (soit 39 sur 69), et une capacité d'accueil importante pour les campeurs. Le Müllerthal, quant à lui, se distingue par la plus forte croissance des nuitées de touristes non-résidents, illustrant un regain d'intérêt pour cette région surnommée la « Petite Suisse luxembourgeoise », prisée pour ses paysages naturels, ses sentiers de randonnée et son cadre apaisant (Statec, 2024).

L'attractivité du G-D de Luxembourg repose également sur une offre patrimoniale et culturelle particulièrement riche. En 2022, le pays comptait 51 musées, 15 châteaux ouverts à la visite et 27 scènes de spectacle, confirmant la vitalité de la scène culturelle luxembourgeoise (Statec, 2024). Cinq sites bénéficient d'une reconnaissance UNESCO, ce qui renforce la visibilité internationale du pays :

- La ville de Luxembourg et ses fortifications (patrimoine mondial),
- Le Mullerthal (Géoparc mondial UNESCO),
- Le Minett (Réserve de biosphère UNESCO),
- La procession dansante d'Echternach (patrimoine culturel immatériel),
- L'exposition photographique « The Family of Man » de Edward Steichen (Mémoire du Monde).

Ce maillage patrimonial, associé à une densité élevée d'événements culturels et de festivals, participe à la construction d'une image distinctive du G-D de Luxembourg comme destination culturelle accessible, qualitative et plurielle.

Depuis plusieurs années, le G-D de Luxembourg a intégré le tourisme comme un levier stratégique de sa marque nationale, dans une logique de cohérence avec ses valeurs fondamentales : fiabilité, ouverture et dynamisme (LFT, 2020). Cette approche vise à associer la perception d'un pays rassurant, bien organisé, multiculturel et accueillant, à des expériences touristiques enrichissantes, stimulantes et parfois inattendues.

La stratégie touristique luxembourgeoise a notamment identifié plusieurs segments cibles prioritaires, afin de mieux structurer son offre et d'adapter sa communication (MECO, 2022) :

- Les « Explorers », visiteurs en quête d'authenticité, d'aventures individuelles et de rencontres locales. Ils représentent déjà un quart des visiteurs et constituent le segment à plus fort potentiel de croissance.
- Les « Nature-loving Actives », adeptes de nature, de proximité et d'activités de plein air.
- Les « Perfection Seekers », sensibles au confort, à l'esthétique et aux expériences haut de gamme.
- Les « Short Breakers », recherchant des escapades courtes et proches.

Ce positionnement repose sur l'idée que le tourisme ne doit pas seulement répondre à un besoin de déconnexion, mais offrir des expériences transformatrices, capables d'élargir les horizons des visiteurs. Il s'agit ainsi de valoriser les initiatives locales, les savoir-faire créatifs, les offres alternatives et hors des sentiers battus, notamment à travers des circuits immersifs, des hébergements atypiques ou des expériences culturelles participatives (LFT, 2020 ; MECO, 2022).

L'un des atouts du G-D de Luxembourg dans le contexte touristique contemporain réside dans sa capacité à conjuguer nature, proximité, sécurité et qualité. Ces caractéristiques sont de plus en plus recherchées, notamment dans un monde post-COVID et dans un contexte de changement climatique. Le développement du « tourisme de fraîcheur », ou « coolcation » est une piste prometteuse pour les prochaines années, en particulier pour un pays situé à l'intérieur des terres, peu soumis à des extrêmes thermiques et offrant un environnement boisé et vallonné. La présence importante de campings, de sentiers de randonnée, et de forêts pourrait positionner le Grand-Duché comme un refuge temporaire lors des périodes de forte chaleur dans les métropoles voisines.

2.5. Le tourisme face aux enjeux climatiques

2.5.1. Climat et tourisme : une relation étroite mais complexe

Le climat joue un rôle déterminant dans la dynamique touristique. Comme le rappellent Matzarakis (2006) et de Freitas (2003), le climat n'est pas simplement un contexte passif dans lequel s'inscrivent les activités de loisirs : il en constitue à la fois une ressource, un facteur d'attractivité, mais aussi une contrainte. Le tourisme s'organise autour de conditions météorologiques jugées favorables ou acceptables, et tout

changement de ces conditions est susceptible d'engendrer des pertes économiques ou des modifications des pratiques (de Freitas, 2003).

Ainsi, le climat est une ressource économique exploitable : certaines régions, en raison de leur ensoleillement ou de leur fraîcheur estivale, disposent d'un potentiel touristique élevé. Mais à l'inverse, des événements météorologiques extrêmes (canicules, pluies continues, absence de neige) peuvent compromettre des séjours, engendrer des déceptions ou des coûts supplémentaires. Le climat influence donc à la fois l'offre (conditions sur place) et la demande touristique (motivations, destinations choisies), avec des effets avant, pendant et après le voyage (Matzarakis, 2006).

L'approche proposée par de Freitas (2003), désignée sous le terme de « tourism climatology », repose sur une conceptualisation large et systémique des liens entre climat et tourisme. Elle établit une analogie structurelle entre les couples climat / météo et tourisme / récréation, en soulignant que le tourisme, compris comme une forme de déplacement à des fins de plaisir, dépend profondément de conditions atmosphériques vécues à une échelle quotidienne. Le climat devient alors une composante essentielle du capital touristique d'un lieu, au même titre que le paysage, la biodiversité ou la culture.

Dans cette perspective, le climat peut être compris comme un actif économique mesurable, influant à la fois sur l'attractivité d'une destination et sur la rentabilité des opérateurs. Néanmoins, cette valorisation du climat comme ressource touristique s'accompagne de nombreuses incertitudes liées à la sélection des critères météorologiques : à partir de quand une journée est-elle considérée comme « idéale », « acceptable » ou au contraire « dissuasive » ? Ces questions sont cruciales pour les touristes, qui doivent adapter leurs comportements, comme pour les gestionnaires de sites ou les pouvoirs publics, confrontés à la variabilité des conditions et aux risques associés (de Freitas, 2003).

Chaque lieu possède ainsi un potentiel touristique climatique, défini par l'agrégation des conditions favorables mais aussi par les limites climatiques au-delà desquelles des risques apparaissent : inconfort thermique, stress, baisse d'attractivité ou pertes économiques. Ce potentiel est variable selon les types d'activités, les clientèles, les saisons, et peut être affecté par des aléas comme des étés anormalement humides ou des hivers sans neige, qui compromettent la régularité et la prévisibilité du modèle touristique (de Freitas, 2003).

2.5.2. Indicateurs climatiques et perceptions thermiques

Dans le domaine du tourisme, les données climatiques doivent être interprétées à travers le prisme des perceptions humaines et des limites physiologiques. Les simples moyennes mensuelles sont insuffisantes : ce sont les conditions concrètes vécues comme la chaleur extrême, le rayonnement solaire, ou l'humidité, qui déterminent l'expérience touristique (de Freitas, 2003). La bioclimatologie touristique souligne l'importance d'indicateurs tels que (Matzarakis, 2006) :

- La température de l'air,
- L'humidité relative,
- Le vent,
- La couverture nuageuse,
- Les précipitations,
- La charge thermique ressentie.

Ces paramètres sont essentiels pour évaluer les zones de confort thermique, de stress, ou au contraire d'agrément. Le rôle de l'information climatique, sous forme d'alertes, de conseils ou de prévisions, devient alors central pour les touristes, les opérateurs et les planificateurs (Matzarakis, 2006). En effet, l'impact du climat sur la santé touristique est souvent sous-estimé. Or, les séjours dans des zones à climat stressant peuvent exposer les individus à des coups de chaleur, des effets liés aux UV, une pollution de l'air aggravée ou des déséquilibres physiologiques, notamment chez les personnes âgées ou vulnérables (Matzarakis, 2006).

2.5.3. Vulnérabilité du tourisme européen aux vagues de chaleur

Selon le 5e rapport du GIEC, les événements climatiques extrêmes affectent déjà plusieurs secteurs économiques en Europe, notamment le tourisme, la santé et l'agriculture. Les vagues de chaleur, en particulier, sont appelées à devenir plus fréquentes et plus intenses, avec des conséquences négatives sur les activités estivales dans les régions méridionales (Kovats *et al.*, 2014). Cette évolution se traduit par :

- des risques accrus pour la santé des voyageurs (insolation, stress thermique, baisse de productivité physique),

- une baisse potentielle de l'attractivité de destinations estivales traditionnelles (sud de l'Europe),
- et une perturbation des flux touristiques vers d'autres régions plus tempérées.

Après 2050, le tourisme estival devrait diminuer en Europe du Sud (confiance faible à moyenne), au profit d'un développement accru en Europe du Nord et continentale (confiance moyenne) (Kovats *et al.*, 2014).

Ces projections sont au cœur du sujet de ce travail. Elles suggèrent que le G-D de Luxembourg, situé en Europe continentale, pourrait connaître une attractivité croissante pour les touristes en quête de fraîcheur. Ce phénomène de tourisme de fraîcheur est à étudier précisément dans ses dimensions climatiques, sociales et économiques. En effet, le climat, en devenant plus chaud, transforme certains territoires du nord ou de l'intérieur en destinations alternatives recherchées durant les vagues de chaleur. Le G-D de Luxembourg, avec ses régions boisées et vallonnées, ainsi que son réseau hydrologique accessible pourrait s'inscrire dans cette dynamique.

2.5.4. L'utilité stratégique des données climatiques pour le tourisme

L'approche proposée par de Freitas (2003) montre que les données climatiques peuvent être utilisées à différents niveaux :

- Planification opérationnelle (ex. : entretien des terrains de golf, production de neige artificielle) ;
- Gestion des risques (événements extrêmes, assurances) ;
- Marketing climatique (valorisation des périodes agréables) ;
- Décisions d'investissement (choix d'emplacements, architecture bioclimatique) ;
- Conception d'équipements (centres d'hébergement adaptés au stress thermique).

L'exploitation intelligente de ces données peut améliorer la résilience des destinations, adapter l'offre à des conditions changeantes et orienter les flux vers des périodes ou lieux moins sensibles. Dans le cadre du G-D de Luxembourg, cela pourrait signifier la valorisation d'un « microclimat agréable », la promotion des séjours en altitude relative (comme dans l'Ardenne), et l'identification de périodes où le confort thermique est optimal. Cela implique également de croiser ces données avec les fréquentations touristiques, ce qui est fait dans cette étude à travers l'analyse des données de sites croisée aux conditions météorologiques.

3. Le Climat : Dynamiques présentes et futures

3.1. Le climat actuel du G-D de Luxembourg

Le Grand-Duché de Luxembourg, situé en Europe occidentale, bénéficie d'un climat tempéré de type océanique. Ce climat se caractérise par des précipitations réparties tout au long de l'année, des hivers modérément froids et des étés doux, dans un contexte de circulation atmosphérique dominée par les influences atlantiques (Goergen *et al.*, 2013).

3.1.1. Températures moyennes et évolution

Les données climatiques de référence pour le G-D de Luxembourg sont issues de la station météorologique SYNOP située à l'aéroport de Luxembourg-Findel (station WMO ID=06590), qui constitue la seule station officielle du pays reconnue par l'Organisation météorologique mondiale (Junk *et al.*, 2024). Le tableau 1 présente les températures mensuelles moyennes de l'air calculées sur une période de 30 ans, de 1971 à 2000. Selon ces mesures, la température annuelle moyenne s'élevait à 8,7 °C, avec des maxima en juillet (17,5 °C) et août (17,3 °C) (Goergen *et al.*, 2013).

L'évolution récente du climat révèle un réchauffement significatif sur le territoire luxembourgeois. Goergen *et al.* (2013) identifient une augmentation des températures de l'ordre de 0,5 °C par décennie entre 1971 et 2000. Cette tendance se manifeste particulièrement durant les mois de mars à mai. Drogue *et al.* (2005) confirment également une hausse notable des températures maximales et minimales au cours de la seconde moitié du XXe siècle.

Température [°C]	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Moyenne	0,6	1,4	4,7	7,7	12,4	15,1	17,5	17,3	13,5	8,9	4,0	1,8	8,7
Déviation Standard	2,5	2,3	1,9	1,4	1,8	1,5	2,0	1,6	1,6	1,5	1,6	1,6	6,3

Tableau 1. Températures moyennes mensuelles de l'air sur 30 ans (de 1971 à 2000), calculés à partir des observations journalières de la station SYNOP de l'aéroport de Findel (Luxembourg). La dernière colonne présente les valeurs annuelles moyennes sur le long terme (Goergen *et al.*, 2013).

Pour une période plus récente, les données de MeteoLux (2025) pour 1991–2020 indiquent une température moyenne annuelle de 9,8 °C, avec janvier comme mois le plus froid (1,4 °C) et juillet comme mois le plus chaud (18,7 °C).

La figure 1 montre un diagramme de fréquence relative de la température de l'air pour le G-D de Luxembourg sur la période 1986–2010. Les valeurs de température maximale journalière > 30 °C se concentrent sur les 20 premiers jours d'août, tandis qu'en janvier, plus de 30 % des journées présentent des températures comprises entre –10 °C et 0 °C. Les journées en dessous de –10 °C restent rares, avec une fréquence maximale observée au milieu du mois de janvier (Matzarakis *et al.*, 2013).

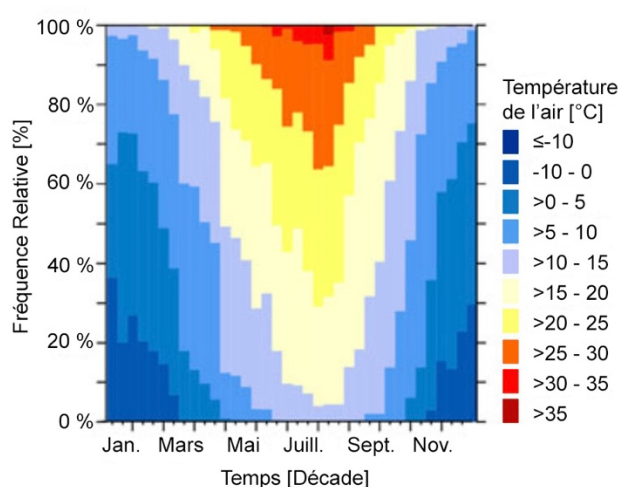


Figure 1. Diagramme de fréquence relative de la température de l'air mesurée répartie par périodes de 10 jours (« décades »), pour le Luxembourg sur la période 1986–2010 (Matzarakis *et al.*, 2013).

3.1.2. Précipitations et humidité

Les précipitations relevées à la station météorologique de Luxembourg-Findel pour la période de référence 1971–2000 (tableau 2) indiquent une moyenne annuelle de 864 mm. La répartition saisonnière se caractérise par des cumuls plus importants à l'automne, avec des maxima en décembre (85 mm) et en octobre (82 mm), ainsi qu'au printemps, notamment en mai et juin (79 mm chacun). Les mois les plus secs sont février (57 mm) et avril (57 mm). L'écart-type mensuel varie de 31 mm en août à 51 mm en octobre, témoignant d'une variabilité interannuelle plus marquée durant les saisons hivernale et automnale. Ce régime pluviométrique relativement homogène sur l'ensemble de l'année reflète les caractéristiques d'un climat océanique tempéré.

Précipitation [mm/mois]	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Moyenne	72	57	67	57	79	79	72	64	72	82	78	85	864
Déviati on Standard	48	40	35	39	43	49	39	31	35	51	34	49	9,3

Tableau 2. Cumuls mensuels de précipitations sur 30 ans (de 1971 à 2000), calculés à partir des observations journalières de la station SYNOP de l’aéroport de Findel (Luxembourg). La dernière colonne présente les valeurs annuelles moyennes sur le long terme (Goergen *et al.*, 2013).

Pour la période plus récente 1991–2020, les données de MeteoLux (2025) mettent en évidence une légère diminution de la moyenne annuelle des précipitations, qui atteint 831,3 mm. Le profil saisonnier demeure comparable, avec un maximum en décembre (89,5 mm) et un minimum en avril (49,4 mm).

Sur la période 1986–2010, les jours sans précipitations (moins de 1 mm) sont fréquents (236 jours par an en moyenne), tandis que des précipitations supérieures à 5 mm ne sont observées qu’environ 58 jours par an (Matzarakis *et al.*, 2013). Ces résultats sont illustrés sur la figure 2 (gauche).

Concernant l’humidité relative (Figure 2, droite), une forte variabilité saisonnière est observée. Durant les mois d’hiver (décembre à février), plus de 50 % des observations se situent dans l’intervalle 85–95 % d’humidité relative, voire davantage. En revanche, en été, les valeurs d’humidité >65 % ne sont présentes que dans environ 20 % des cas (Matzarakis *et al.*, 2013).

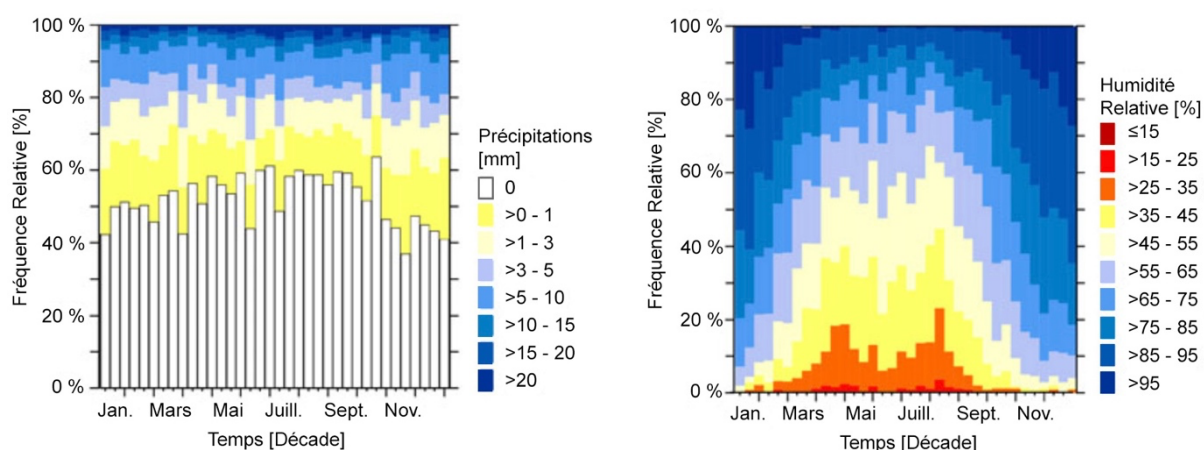


Figure 2. Diagramme de fréquence relative des précipitations (gauche) et de l’humidité relative (droite) répartie par périodes de 10 jours (« décades »), pour le G-D de Luxembourg sur la période 1986–2010 (Matzarakis *et al.*, 2013).

En complément, la pression de vapeur (Figure 3) a été utilisée pour identifier les épisodes de chaleur humide et lourde (« sultriness »), définis comme des cas où la pression de vapeur dépasse 18 hPa. Ces épisodes se produisent en moyenne entre mai et octobre, avec un pic en juillet et août, où ils concernent environ 10 % des cas. Ils restent néanmoins rares sur l'ensemble de la période 1986–2010 (Matzarakis *et al.*, 2013).

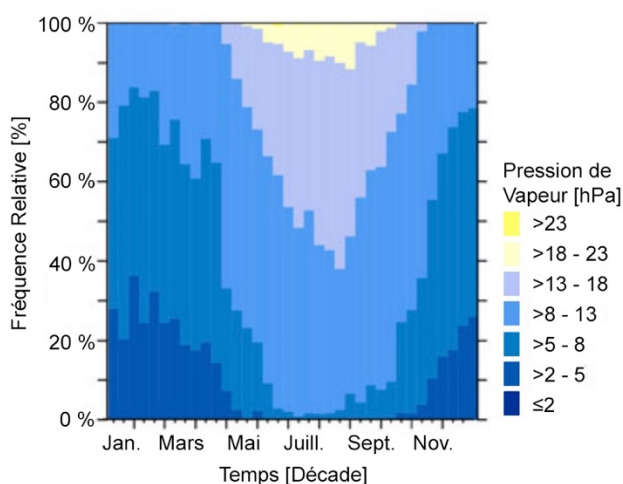


Figure 3. Diagramme de fréquence relative de la pression de vapeur mesurée répartie par périodes de 10 jours (« décades »), pour le G-D de Luxembourg sur la période 1986–2010 (Matzarakis *et al.*, 2013).

3.1.3. Insolation et vent

La durée moyenne d'ensoleillement annuelle s'élève à 1802,9 heures pour la période 1991–2020, avec un maximum en juillet (257,6 heures) (MeteoLux, 2025).

Les données du vent (Figure 4) sont issues de la station de Findel sur la période 1986–2010 montrent que les directions dominantes sont le sud-ouest et le nord-est. Les vitesses les plus élevées sont observées dans le secteur sud-ouest, avec une vitesse moyenne globale de 7,0 m/s. Les vitesses inférieures à 0,5 m/s restent très rares (2,1 % des heures observées). La vitesse du vent est généralement plus élevée en journée qu'au cours de la nuit, où le secteur nord-est devient plus prépondérant (Matzarakis *et al.*, 2013).

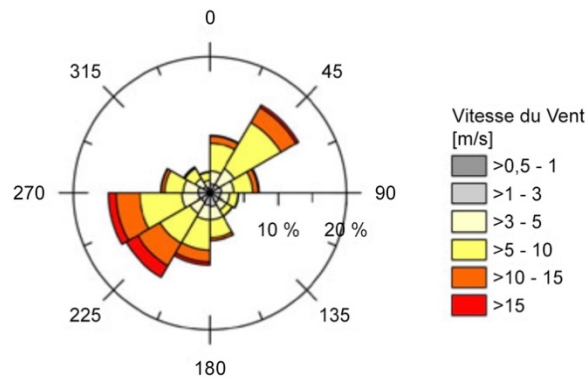


Figure 4. Rose des vents pour la station de l'aéroport de Luxembourg-Findel, établie à partir des valeurs horaires sur la période 1986–2010 (Matzarakis *et al.*, 2013).

3.1.4. Événements extrêmes

Le climat luxembourgeois est également marqué par l'occurrence croissante d'événements extrêmes liés à la chaleur. Ces phénomènes se traduisent notamment par l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des journées très chaudes, comme l'ont montré les analyses de température et de pression de vapeur sur la période 1986–2010 (Matzarakis *et al.*, 2013). Ces constats rejoignent également les observations de Perkins *et al.* (2012), qui mettent en évidence une augmentation mondiale de la fréquence, de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur. Bien que les définitions varient, une vague de chaleur peut être comprise comme une série de jours consécutifs anormalement chauds selon les normes locales (Junk *et al.*, 2019 ; Perkins et Alexander, 2013).

3.1.5. Carte climatique de Köppen-Geiger

Le climat du G-D de Luxembourg peut être caractérisé selon la classification de Köppen-Geiger, l'un des systèmes de classification les plus largement utilisés pour décrire les zones climatiques mondiales à partir de seuils mensuels de température et de précipitations (Beck *et al.*, 2023). Développée à la fin du XIX^e siècle par Wladimir Köppen et affinée par Rudolf Geiger, cette classification repose sur cinq grandes classes climatiques (A à E) et 30 sous-classes, définies par des critères thermiques et pluviométriques détaillés (Beck *et al.*, 2023). Les critères précis utilisés pour l'attribution des classes climatiques (seuils de températures, précipitations et saisonnalité) sont présentés en Annexe 10.4.1. Cette classification a pour avantage de synthétiser la complexité climatique d'un territoire en une typologie facilement interprétable, notamment du point de vue écologique et territorial.

Les cartes utilisées proviennent de la version 2 à haute résolution (1 km) développée par Beck *et al.* (2023), qui couvre à la fois les conditions historiques (jusqu'à 2020) et les projections futures (jusqu'à 2099) selon les scénarios socio-économiques (SSP) du CMIP6. Le CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) constitue le cadre international de comparaison des modèles climatiques, largement mobilisé par le GIEC dans son sixième rapport, tandis que les SSP (Shared Socioeconomic Pathways) représentent différentes trajectoires possibles de développement socio-économique et d'émissions de gaz à effet de serre, permettant ainsi d'explorer une gamme de futurs climatiques plausibles.

Selon la carte actuelle (1991–2020) (Figure 5, droite), l'ensemble du territoire luxembourgeois est classé dans la catégorie Cfb (tempéré, sans saison sèche, été chaud). Cette classe se définit notamment par une température du mois le plus froid comprise entre 0 et 18 °C, par au moins quatre mois présentant une température moyenne supérieure à 10 °C, et par une température du mois le plus chaud supérieure à 10 °C mais inférieure ou égale à 22 °C. Alors que la carte de la période 1961–1990 (Figure 5, gauche) distinguait encore une zone de climat Dfb (froid, sans saison sèche, été chaud) au nord, la classification s'est depuis homogénéisée, traduisant un réchauffement du territoire, en particulier dans les régions septentrionales où les hivers étaient auparavant plus rigoureux. En effet, le Dfb est caractérisé par les mêmes critères que le Cfb, à l'exception de la température du mois le plus froid, qui est ici inférieure ou égale à 0 °C, traduisant des conditions hivernales nettement plus froides.

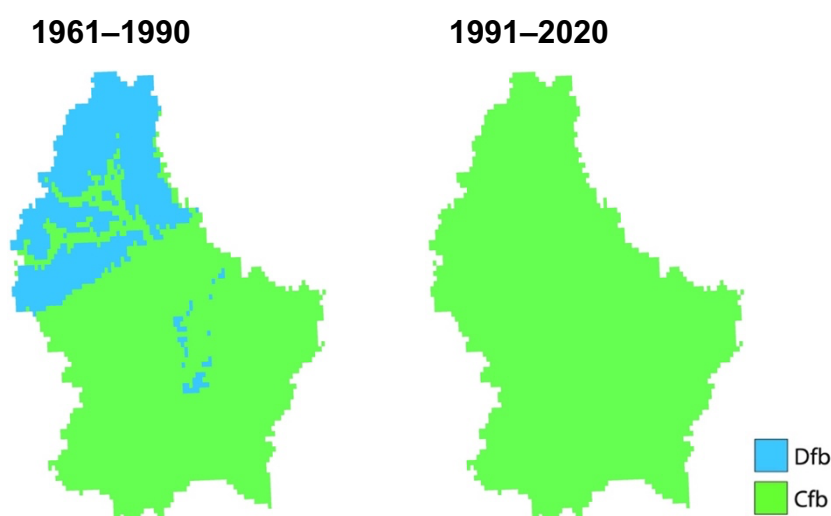


Figure 5. Classification de Köppen-Geiger du climat luxembourgeois passé (gauche) et présent (droite) selon les cartes de Beck *et al.* (2023).

3.2. Modéliser le changement climatique

Pour anticiper les effets du changement climatique au G-D de Luxembourg comme ailleurs, les chercheurs s'appuient sur des modèles climatiques alimentés par des scénarios prospectifs. Ces scénarios permettent de simuler l'évolution future du climat en fonction de différents choix socio-économiques, politiques ou technologiques. Comme le souligne Moss *et al.* (2010), les premières générations de scénarios climatiques reposaient sur une démarche séquentielle, allant d'hypothèses socio-économiques vers des projections climatiques, puis vers l'analyse des impacts. Ce processus, bien que structuré, était jugé trop rigide, long, et sujet à des incohérences entre les étapes.

Une évolution majeure a été décidée en 2007 lors d'une réunion d'experts organisée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) à Noordwijkerhout, aux Pays-Bas. Le rapport IPCC 2008 (Moss *et al.*, 2008) pose alors les bases d'un nouveau cadre de scénarisation, plus souple et mieux adapté aux besoins croissants des chercheurs et décideurs politiques. Ce cadre repose sur une approche parallèle, dissociant les trajectoires de forçage radiatif des scénarios socio-économiques. Le rapport introduit ainsi les Representative Concentration Pathways (RCP), c'est-à-dire des trajectoires types de forçage radiatif exprimées en watts par mètre carré (W/m^2) à l'horizon 2100.

À la suite de cette décision stratégique, des groupes de modélisation spécialisés se sont attelés au développement technique des RCP, chacun correspondant à un niveau distinct de forçage radiatif à l'horizon 2100. Ces trajectoires sont nommées selon leur niveau cible de forçage exprimé en watts par mètre carré (W/m^2) relatif à l'ère préindustrielle, sans inclure les forçages dus à l'albédo des terres, aux poussières ou aux aérosols nitrates (Van Vuuren *et al.*, 2011). Les quatre trajectoires sélectionnées sont considérées comme représentatives de la littérature existante, et couvrent un large éventail de possibilités, allant d'un scénario de forte atténuation (RCP2.6) à un scénario de croissance continue des émissions sans politique climatique (RCP8.5).

Le RCP2.6 est une trajectoire dite de « peak-and-decline » : le forçage radiatif atteint environ $3,1 W/m^2$ vers le milieu du siècle, puis redescend à $2,6 W/m^2$ d'ici 2100. Il nécessite des réductions très importantes des émissions de gaz à effet de serre ainsi que des émissions négatives à long terme (Van Vuuren *et al.*, 2007). Selon le GIEC (Lee *et al.*, 2021), le réchauffement global associé pour la période 2081–2100 par

rapport à 1986–2005 se situe dans une fourchette de 0,3°C à 1,7°C, ce qui en fait le seul scénario pour lequel un dépassement de +2°C est jugé improbable (moyenne confiance).

Le RCP4.5 est un scénario de stabilisation modérée dans lequel le forçage est plafonné à 4,5 W/m² après 2100, sans dépassement du seuil. Il repose sur des politiques climatiques actives appliquées dès le milieu du siècle, combinant efficacité énergétique et développement de technologies bas carbone (Clarke *et al.*, 2007 ; Wise *et al.*, 2009). L'élévation moyenne des températures à l'horizon 2100 par rapport à 1986–2005 est estimée entre 1,1°C et 2,6°C (Lee *et al.*, 2021).

Le RCP6.0, également un scénario de stabilisation sans dépassement, mène à un forçage de 6,0 W/m² vers 2100. Il suppose l'adoption plus tardive de technologies de réduction des émissions, sans politique climatique agressive, et des réductions progressives basées sur des stratégies de marché (Fujino *et al.*, 2006 ; Hijioka *et al.*, 2008). Les températures moyennes globales pour 2081–2100 sont projetées dans une plage de 1,4°C à 3,1°C au-dessus de 1986–2005 (Lee *et al.*, 2021), ce qui implique, avec forte confiance, un dépassement du seuil de +2°C par rapport à 1850–1900.

Enfin, le RCP8.5 représente un scénario de référence sans politique climatique, avec une croissance continue des émissions durant tout le XXI^e siècle, basé sur une forte dépendance aux énergies fossiles, une croissance démographique élevée et une faible coopération internationale (Riahi *et al.*, 2007). Le forçage radiatif dépasse les 8,5 W/m² en 2100, et la hausse des températures globales se situe entre 2,6°C et 4,8°C (Lee *et al.*, 2021), rendant extrêmement probable un dépassement des seuils de +2°C et +3°C.

3.2.1 Projections du changement climatique au G-D de Luxembourg

Les projections climatiques futures pour le G-D de Luxembourg révèlent des modifications substantielles des températures moyennes, de l'intensité des vagues de chaleur et des indicateurs bioclimatiques, sous l'effet du changement climatique global. Ces projections, basées sur divers scénarios d'émissions et modèles climatiques régionaux, permettent d'appréhender les impacts potentiels à différentes échéances temporelles.

3.2.1.1. Évolution attendue de la température moyenne

Les simulations climatiques réalisées à l'échelle régionale indiquent une augmentation progressive et marquée de la température moyenne annuelle au G-D de Luxembourg. Selon les projections issues d'un ensemble multi-modèles régional (multi-physics and multi-model ensemble), la température annuelle moyenne, estimée à 8,1 °C pour l'année 1970, augmenterait selon le scénario RCP4.5 à 9,7 °C à la fin du siècle (2060–2090), et jusqu'à 10,9 °C selon le scénario RCP8.5 (Junk *et al.*, 2019). Le tableau 3 synthétise les projections pour différentes périodes :

Période	RCP 4.5	RCP 8.5
2000 – 2023	8,7 °C	8,7 °C
2030 – 2060	9,3 °C	9,5 °C
2060 – 2090	9,7 °C	10,9 °C

Tableau 3. Projections des températures moyennes au G-D de Luxembourg selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 (Junk *et al.*, 2019).

Ces estimations rejoignent les résultats de Junk *et al.* (2024), qui indiquent un réchauffement moyen compris entre +1,3 °C (RCP2.6) et +3,8 °C (RCP8.5) d'ici la fin du siècle, en cohérence avec les tendances observées dans d'autres études européennes.

Par ailleurs, des études antérieures ont déjà évalué les conditions climatiques futures du G-D de Luxembourg à l'aide de modèles climatiques régionaux REMO (résolution spatiale de 10 km) et COSMO-CLM (18 km), associés aux anciens scénarios d'émissions SRES A1B et B1 (Nakićenović, 2000). Deux horizons temporels ont été définis pour l'analyse : le futur proche (2021–2050) et le futur lointain (2071–2100), en comparaison avec la période de référence 1971–2000 (Matzarakis *et al.*, 2013). Les simulations ont été spatialement moyennées sur neuf points de grille centrés sur les coordonnées géographiques de la station de Findel, principal point de mesure du pays. Les projections basées sur REMO et CLM indiquent que les tendances au réchauffement sont robustes, avec une fiabilité plus élevée pour les variables de température que pour celles relatives aux précipitations, en raison des incertitudes accrues associées à ces dernières (Tebaldi et Sanso, 2009).

3.2.1.2. Intensification du stress thermique et des vagues de chaleur

L'augmentation des températures aura des conséquences directes sur le confort thermique humain. Les vagues de chaleur, déjà identifiées comme événements météorologiques extrêmes à risque, pourraient devenir plus fréquentes et plus longues, amplifiant leurs effets sur la santé humaine et les écosystèmes (Perkins *et al.*, 2012 ; Junk *et al.*, 2019). Une seule vague de chaleur prolongée aura un effet plus délétère que plusieurs épisodes courts (Junk *et al.*, 2024). Selon le GIEC (2013), même des variations modérées de la température moyenne annuelle peuvent entraîner des changements importants dans l'occurrence d'événements extrêmes (IPCC, 2013).

Les résultats issus de REMO et CLM (scénarios A1B et B1) montrent que la fréquence des jours avec stress thermique élevé augmente de manière significative dans la majorité des cas, surtout à l'horizon 2071–2100. En revanche, les jours avec stress thermique froid (par exemple, en hiver) diminuent de façon significative dans l'ensemble des projections. Ces tendances confirment une bascule du climat luxembourgeois vers des conditions plus chaudes, avec des hivers plus doux et des étés plus chauds (Matzarakis *et al.*, 2013).

3.2.1.3. Modifications bioclimatiques projetées

Les projections révèlent également des évolutions dans la fréquence de certains événements bioclimatiques. Par exemple, les jours secs (précipitations < 1 mm) tendent à diminuer dans le scénario B1 à court terme (2021–2050), mais augmentent nettement à l'horizon 2100 dans le scénario A1B (REMO), suggérant un risque accru de sécheresses estivales à long terme. De même, les jours caractérisés par une forte pression de vapeur (>18 hPa), indicateurs de conditions « lourdes » ou « suffocantes » en été, sont projetés en forte hausse dans presque tous les cas étudiés (à l'exception du scénario REMO A1B à court terme, où l'augmentation n'est pas significative), ce qui pourrait affecter significativement le confort humain et l'attractivité touristique estivale (Matzarakis *et al.*, 2013).

3.2.1.4. Changements projetés selon la classification de Köppen-Geiger

L'évolution climatique projetée pour le G-D de Luxembourg se traduit également par des modifications progressives de la classification de Köppen-Geiger. Les projections de Beck *et al.* (2023) reposent sur des simulations du CMIP6 corrigées par biais, en utilisant uniquement un sous-ensemble de 42 modèles climatiques sélectionnés pour la plausibilité de leurs réponses au CO₂ (via les indices TCR et ECS). Ces modèles ont servi à générer les cartes pour deux périodes futures (2041–2070 et 2071–2099), selon plusieurs scénarios socio-économiques (SSP).

Pour la période 2041–2070 (Figure 6), le scénario SSP2-4.5 montre une stabilité remarquable, avec un maintien intégral du climat Cfb sur tout le territoire luxembourgeois. Cependant, sous le scénario plus pessimiste SSP5-8.5, on observe déjà l'apparition d'une transition vers un climat de type Cfa dans le sud-est du pays, notamment le long de la Moselle et de la frontière allemande. Le climat Cfa désigne un climat tempéré, sans saison sèche, à été chaud à très chaud, ce qui implique des étés significativement plus chauds que dans un climat Cfb (Thot ≥ 22 °C, contre Thot < 22 °C pour Cfb). Ce basculement progressif traduit l'impact du réchauffement climatique sur les caractéristiques saisonnières du territoire, avec des étés devenant plus longs et plus chauds, tout en conservant une pluviométrie régulière sur l'année (absence de saison sèche).

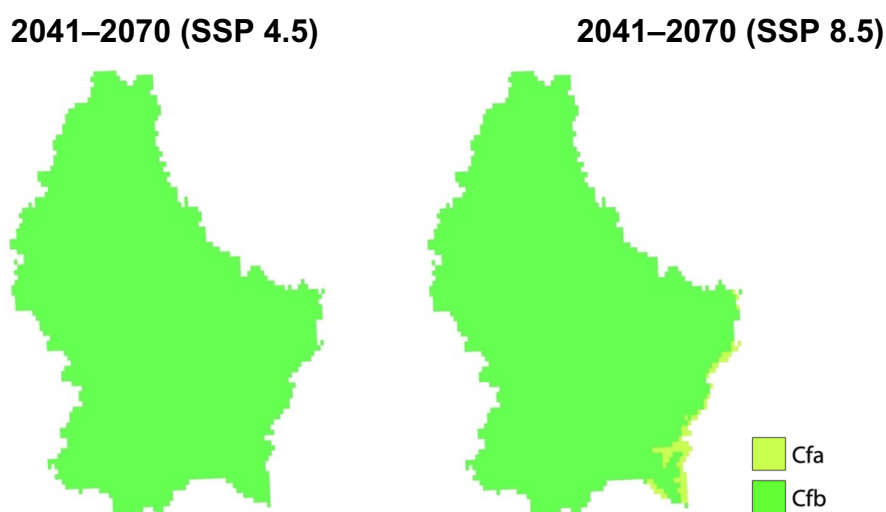


Figure 6. Classification de Köppen-Geiger des projections climatiques luxembourgeoises pour le futur proche selon les scénarios SSP 4.5 (gauche) et SSP 8.5 (droite) selon les cartes de Beck *et al.* (2023).

Dans le scénario SSP2-4.5, pour la période plus lointaine de 2071–2099 (Figure 7), la situation projetée correspond à celle du SSP5-8.5 du futur proche, avec une extension de la zone Cfa au sud-est, sans changement majeur ailleurs. En revanche, sous SSP5-8.5 à cette échéance, une modification climatique bien plus profonde est attendue : la quasi-totalité du territoire passerait en climat Cfa, à l'exception de quelques zones septentrionales dans l'Ardenne luxembourgeoise qui resterait classée Cfb. Cette évolution illustre la sensibilité du territoire luxembourgeois aux scénarios d'émissions élevés. Le basculement de Cfb vers Cfa témoigne d'un réchauffement estival plus marqué que l'évolution hivernale, avec des conséquences attendues sur les ressources en eau, les écosystèmes, mais aussi les pratiques agricoles et touristiques.

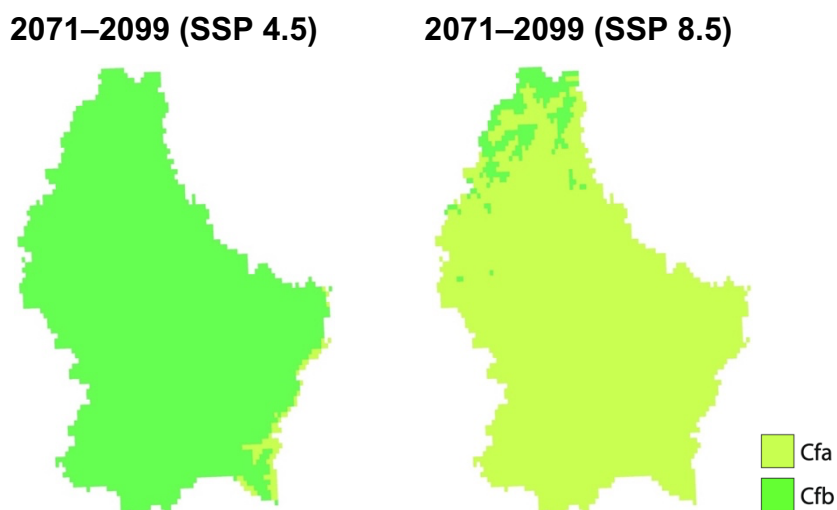


Figure 7. Classification de Köppen-Geiger des projections climatiques luxembourgeoises pour le futur lointain selon les scénarios SSP 4.5 (gauche) et SSP 8.5 (droite) selon les cartes de Beck *et al.* (2023).

3.3. Les vagues de chaleur

3.3.1. Introduction aux vagues de chaleur

Les vagues de chaleur sont des événements météorologiques extrêmes caractérisés par des périodes prolongées de températures anormalement élevées, souvent associées à des impacts importants sur la santé humaine, l'environnement, l'agriculture, les infrastructures et aussi le tourisme. Leur intensification est désormais un marqueur clé du changement climatique global. L'augmentation récente de leur fréquence, de leur intensité et de leur durée est attestée à l'échelle mondiale (Perkins *et al.*, 2012), notamment en lien avec l'élévation des températures moyennes annuelles (Hartmann *et al.*, 2013 ; Seneviratne *et al.*, 2021).

Ces dernières années, les records de chaleur se sont multipliés à l'échelle planétaire. Selon le rapport du Lancet Countdown, l'année 2023 a été la plus chaude depuis 100 000 ans (Romanello *et al.*, 2023), avec une accélération des événements extrêmes depuis 2015. Ce constat s'est confirmé en 2024 : la moyenne annuelle mondiale avait déjà atteint +1,45 °C au-dessus de la moyenne préindustrielle en 2023, un record historique, et de nouveaux records journaliers et saisonniers ont été enregistrés tout au long de l'année 2024, montrant une intensification continue des extrêmes de chaleur (Romanello *et al.*, 2024). Cette évolution climatique affecte la fréquence et l'intensité des vagues de chaleur, y compris dans des régions historiquement tempérées comme le G-D de Luxembourg (Junk *et al.*, 2024). Même de faibles hausses de la température moyenne peuvent entraîner une forte augmentation de la sévérité de ces événements extrêmes (IPCC, 2007).

3.3.2. Définition : débats scientifiques et limites actuelles

La définition d'une vague de chaleur reste sujette à débat, malgré de nombreuses tentatives visant à proposer des standards robustes. De nombreux travaux ont été consacrés à cette question, parmi lesquels ceux de Karl *et al.* (1999), Peterson *et al.* (2001), Alexander *et al.* (2006), Perkins *et al.* (2012) ou encore Russo *et al.* (2014). Une synthèse d'autres contributions est également proposée par Smid *et al.* (2019). Toutefois, une définition universelle fait toujours défaut. L'indicateur actuellement utilisé par le groupe d'experts ETCCDI, le WSDI (Warm Spell Duration Index), présente encore certaines limites (IPCC, 2012 ; Orłowsky et Seneviratne, 2012 ; Russo

et al., 2014). Cette absence de consensus complique les comparaisons spatiales et temporelles.

La notion de vague de chaleur est généralement définie comme une période de plusieurs jours consécutifs présentant des températures exceptionnellement élevées par rapport à une norme locale (Perkins et Alexander, 2013). Cette définition relativement large a conduit à la prolifération d'indices climatiques conçus pour des contextes géographiques variés et des secteurs d'impact spécifiques (santé, agriculture, énergie, etc.). Toutefois, ces indices présentent souvent une portée limitée en dehors de leur cadre de développement initial, ce qui rend leur transfert difficile vers d'autres régions ou disciplines (Perkins et Alexander, 2013). Le choix de l'indice doit donc tenir compte du site d'étude, du type de climat, de la disponibilité des données et des objectifs de recherche. Par exemple, les indices fondés sur la température apparente (T_a), qui nécessitent des données précises sur l'humidité, peuvent s'avérer inadaptés dans certaines régions où ces données sont absentes ou peu fiables (Perkins et Alexander, 2013). Dans le cas du G-D de Luxembourg, l'utilisation d'indices fondés sur la température apparente est justifiée, dans la mesure où les stations météorologiques principales, comme celle de Luxembourg-Findel, fournissent des données fiables sur l'humidité relative. Plus largement, les stations officielles du pays mesurent également d'autres variables climatiques nécessaires au calcul d'indices plus complexes, telles que la vitesse du vent, le rayonnement solaire ou encore la pression atmosphérique en plus des températures moyennes, maximales et minimales. Ces conditions permettent donc l'utilisation d'une gamme étendue d'indices thermo-physiologiques adaptés à l'analyse du stress thermique dans ce contexte climatique.

Ces conditions favorables à l'application d'indices complexes invitent à s'interroger sur les méthodes concrètes de détection des vagues de chaleur utilisées dans la littérature. Parmi ces méthodes, on distingue principalement deux grandes approches fondées sur des seuils. Certains indicateurs reposent sur des seuils absolus (par exemple, $T_{\max} > 35\text{ °C}$), tandis que d'autres utilisent des seuils relatifs, tels que le dépassement du 90e percentile d'une période de référence. Les seuils absolus ont l'avantage d'une lecture simple, mais ils s'avèrent peu pertinents pour les comparaisons spatiales (Seneviratne *et al.*, 2021 ; Perkins, 2011), car un seuil de 35 °C peut être considéré comme extrême au G-D de Luxembourg, alors qu'il est fréquent dans le sud de l'Europe.

À l'inverse, les seuils relatifs (basés sur des percentiles locaux) permettent une meilleure représentativité de l'intensité thermique par rapport au climat local, en assurant une distribution homogène des événements sur le territoire (Zhang *et al.*, 2011 ; Perkins et Alexander, 2013). L'ETCCDI a ainsi défini plusieurs indices basés sur ces seuils (Annexe 10.4.2) : WSDI, TX90p, TN90p, etc. Le WSDI, par exemple, définit une vague de chaleur comme une période de six jours consécutifs durant laquelle la température maximale quotidienne dépasse le 90e percentile d'un climat de référence (Zhang *et al.*, 2011 ; Frich *et al.*, 2002).

Les indices à seuils relatifs sont particulièrement adaptés au G-D de Luxembourg, dont le climat tempéré rend peu pertinents les seuils fixes élevés. Toutefois, le choix de la période de référence doit être considéré avec attention, car il peut influencer significativement les résultats. Comme illustré dans le chapitre sur le climat au G-D de Luxembourg, les températures maximales varient notablement selon la période retenue. À la station de Findel, elles atteignaient 17,5 °C en juillet et 17,3 °C en août sur la période 1971–2000 (Goergen *et al.*, 2013), contre 18,7 °C en juillet et 18,4 °C en août sur la période plus récente 1991–2020 (MeteoLux, 2025). Un écart de plus d'un degré peut ainsi être observé d'une période à l'autre, ce qui souligne l'importance du choix de la période de référence dans le calcul et l'interprétation des indices climatiques.

3.3.3. Tendances observées à l'échelle globale

L'augmentation des vagues de chaleur est désormais une tendance documentée au niveau mondial. Des études montrent une hausse significative de leur fréquence, de leur intensité et de leur durée depuis la seconde moitié du XXe siècle (Perkins *et al.*, 2012 ; Hartmann *et al.*, 2013). Le GIEC indique dans son AR5 que cette évolution est principalement due aux émissions de gaz à effet de serre (IPCC, 2012 ; IPCC, 2014). Même des changements modestes de température moyenne ont des effets importants sur la probabilité et l'intensité des extrêmes thermiques (IPCC, 2012 ; Junk *et al.*, 2019).

La coordination internationale autour de la définition d'indices standardisés (notamment dans le cadre de l'ETCCDI) permet aujourd'hui de comparer les tendances observées entre régions et d'alimenter les projections climatiques (Zhang *et al.*, 2011). Cependant, les incertitudes persistent dans certaines régions à cause du

manque de données homogènes, particulièrement dans les pays en développement (Peterson *et al.*, 2001 ; Karl *et al.*, 1999).

3.3.4. Les vagues de chaleur au G-D de Luxembourg

3.3.4.1. Méthodologie et définition retenue

Dans les études récentes menées au G-D de Luxembourg, notamment par Junk *et al.* (2024), la définition opérationnelle des vagues de chaleur repose sur une combinaison d'indicateurs fondés sur des seuils relatifs adaptés au climat local. Selon Perkins et Alexander (2013), un événement est qualifié de vague de chaleur si au moins l'un des trois critères suivants est rempli pendant une période d'au moins trois jours consécutifs :

- La température minimale journalière dépasse le 90e percentile de la période de référence (1971–2000) ;
- La température maximale journalière dépasse le 90e percentile de cette même période de référence ;
- L'Excess Heat Factor (EHF), tel que défini par Nairn *et al.* (2009) et approfondi par Perkins et Alexander (2013), est un indicateur composite qui mesure la sévérité d'un épisode de chaleur en évaluant non seulement l'intensité actuelle de la chaleur, mais aussi son caractère inhabituel par rapport aux conditions des semaines précédentes.

En parallèle, le Warm Spell Duration Index (WSDI), défini par l'ETCCDI, est également introduit dans l'étude de Junk *et al.* (2024) sur le G-D de Luxembourg. Il comptabilise le nombre total de jours appartenant à une séquence d'au moins six jours durant laquelle la température maximale journalière est supérieure au 90e percentile. Ce critère permet d'identifier les épisodes de chaleur prolongés au-delà des variations climatiques normales.

À ces définitions s'ajoutent quatre indicateurs climatiques spécifiques, développés dans le cadre de ClimPACT2 et également mobilisés dans l'étude de Junk *et al.* (2024) :

- HW-N (Heatwave Number) : Nombre de vagues de chaleur par an ;
- HW-F (Heatwave Frequency) : Nombre total de jours contribuant aux vagues de chaleur ;

- HW-D (Heatwave Duration) : Durée de la plus longue vague de chaleur de l'année ;
- HW-M (Heatwave Mean) : Température moyenne de l'air pendant les vagues de chaleur.

Ces définitions et indicateurs présentent plusieurs avantages. Ils permettent une caractérisation multidimensionnelle des vagues de chaleur, en intégrant à la fois leur fréquence, leur durée, leur intensité et leur persistance. Ils sont notamment établis avec des bases de données climatiques courantes, fondées sur les températures maximales et minimales journalières, ce qui facilite leur mise en œuvre à partir de séries existantes. Enfin, ces indicateurs ont été validés pour le contexte luxembourgeois, puisqu'ils ont été mobilisés dans des travaux antérieurs portant spécifiquement sur le Grand-Duché (Junk *et al.*, 2019 ; Junk *et al.*, 2024), ce qui garantit leur pertinence tant sur le plan méthodologique que climatique.

Dans le cadre de ce mémoire, la définition de vague de chaleur proposée par Junk *et al.* (2024) sera utilisée pour identifier les épisodes de chaleur extrême. Cette approche à seuil relatif saisonnier est particulièrement bien adaptée au climat du G-D de Luxembourg, car elle permet de détecter des événements extrêmes sans recourir à un seuil absolu potentiellement inadapté à un climat tempéré. De plus, sa reconnaissance scientifique et son utilisation dans des études de référence menées spécifiquement sur le territoire luxembourgeois en font une base méthodologique solide pour l'analyse des tendances et des impacts touristiques liés aux vagues de chaleur.

Il convient toutefois de souligner que cette définition repose sur une période de référence ancienne (1971–2000), couramment utilisée en climatologie pour assurer la comparabilité historique et la stabilité statistique. Ce choix permet notamment de mettre en évidence l'aggravation récente des vagues de chaleur, dans un contexte de réchauffement accéléré. Néanmoins, dans le cadre de ce mémoire, une actualisation de la période de référence est envisagée afin de mieux refléter les conditions climatiques actuelles et d'éviter une sur-détection d'événements aujourd'hui devenus plus fréquents. Une telle adaptation permettrait également de rester en cohérence avec la perception contemporaine de ce qui constitue un événement extrême au G-D de Luxembourg.

3.3.4.2. Tendances actuelles

L'analyse des données de la station Findel, unique station WMO du pays, a montré une fréquence accrue de stress thermique pendant les mois d'été, avec jusqu'à 55 heures d'exposition à un stress thermique extrême pour les hommes et 48 heures pour les femmes (Junk *et al.*, 2024). Le PET (Physiological Equivalent Temperature) a été utilisé pour quantifier ces stress, en tenant compte de paramètres comme l'humidité, le vent et le rayonnement solaire (Matzarakis *et al.*, 2013 ; 2023).

3.3.4.3. Projections futures

Les projections climatiques pour le G-D de Luxembourg, basées sur des ensembles de modèles régionaux (RCP4.5 et RCP8.5), montrent une aggravation significative des vagues de chaleur selon plusieurs dimensions (Junk *et al.*, 2024) :

- Nombre de jours de chaleur extrême (WSDI) : augmentation progressive jusqu'à une médiane de 20 jours/an en 2061–2090 (RCP4.5) et 40 jours/an (RCP8.5), avec des années extrêmes allant jusqu'à 90 jours.
- Nombre de vagues de chaleur par an (HW-N) : en hausse de +3 à +4 vagues/an d'ici la fin du siècle sous RCP8.5 (Junk *et al.*, 2019).
- Nombre total de jours dans les vagues de chaleur (HW-F) : augmentation médiane de +25 jours/an sous RCP4.5 et +40 jours/an sous RCP8.5 à l'horizon 2100.
- Durée de la plus longue vague de chaleur (HW-D) : allongement médian de +8 jours (RCP4.5) à +10 jours (RCP8.5), avec des extrêmes jusqu'à +30 jours.
- Température moyenne pendant les vagues de chaleur (HW-M) : hausse de +4 °C à +5 °C à la fin du siècle, plus marquée sous RCP8.5.

Ces évolutions suggèrent que le G-D de Luxembourg, malgré sa situation nord-européenne, sera fortement impacté par les vagues de chaleur prolongées et intenses, en particulier après 2060 si les émissions ne sont pas réduites (Junk *et al.*, 2024 ; Junk *et al.*, 2019).

3.3.4.4. Dispositif de réponse : le Plan Canicule

Le G-D de Luxembourg a mis en place l'édition 2023 de son plan national canicule (Ministère de la Santé, s.d.), structuré en quatre niveaux d'alerte :

- Niveau 1 : surveillance météorologique anticipée en collaboration avec le service météo de l'aéroport de Luxembourg

- Niveau 2 : avis de grande chaleur si la température maximale est comprise entre 33 et 35 °C, avec une température moyenne journalière supérieure à 23 °C
- Niveau 3 : alerte rouge si la température maximale dépasse 35 °C et si des indicateurs sanitaires anormaux sont détectés
- Niveau 4 : activation d'un centre de crise et mobilisation renforcée des services de santé et des autorités locales

Ce plan illustre une prise de conscience croissante des autorités face aux risques sanitaires liés à la chaleur, mais il devra probablement être renforcé au cours des prochaines décennies, en lien avec l'intensification des vagues de chaleur. Contrairement aux approches scientifiques fondées sur des seuils relatifs, ce plan repose sur des seuils absolus de température, plus simples à communiquer au grand public et à intégrer dans des dispositifs de gestion de crise, mais moins adaptés aux spécificités climatiques locales. C'est notamment pour cela qu'à partir du niveau 3, les autorités ne se basent pas uniquement sur les données météorologiques, mais intègrent également des indicateurs sanitaires anormaux, afin de mieux évaluer l'impact réel de la chaleur sur la population.

3.4. Ressenti climatique et indices thermiques

La température mesurée par une station météorologique ne reflète pas toujours le ressenti d'une personne exposée à l'environnement. Ce ressenti dépend aussi de plusieurs autres paramètres : l'humidité, le vent, le rayonnement solaire, l'activité physique, l'habillement, etc. Ainsi, deux jours ayant la même température peuvent être perçus très différemment selon l'humidité ou la présence de vent (Missenard, 1933). Pour évaluer le confort thermique ou le stress ressenti, il est donc nécessaire d'utiliser des indices qui intègrent plusieurs variables climatiques et physiologiques (Matzarakis *et al.*, 2007 ; Höppe, 1999 ; de Freitas, 2003).

3.4.1. Classification et principes des indices thermiques

On distingue généralement trois grandes catégories d'indices climatiques permettant de quantifier le ressenti thermique humain, en fonction de leur complexité et de leur fondement physiologique (Matzarakis, 2007 ; de Freitas, 2003 ; Blazejczyk *et al.* 2012). Les indices dits « élémentaires » reposent sur un nombre très limité de variables, souvent la température de l'air et l'humidité relative, sans modélisation du

comportement physiologique humain. Parmi eux, le Humidex, le Heat Index ou encore la température effective sont largement utilisés, mais leur valeur scientifique pour les analyses biométéorologiques reste limitée.

Les indices bioclimatiques, à l'inverse, s'appuient sur des modèles thermo-physiologiques du corps humain et prennent en compte les flux de chaleur entre le corps et son environnement. On y retrouve notamment l'UTCI (Universal Thermal Climate Index), le PET (Physiologically Equivalent Temperature), le SET (Standard Effective Temperature), le PMV (Predicted Mean Vote) ou le PT (Perceived Temperature). Ces indices modélisent de manière précise les échanges de chaleur par conduction, convection, rayonnement et évaporation.

Enfin, une troisième catégorie regroupe les indices combinés utilisés pour l'évaluation du climat dans des perspectives précises, tel que dans notre cas le tourisme. Ceux-ci n'intègrent pas nécessairement de modèles physiologiques, mais combinent plusieurs variables météorologiques sous forme d'un score synthétique destiné à apprécier l'attrait climatique d'une destination. Les plus connus sont le Tourism Climate Index (TCI) et le Holiday Climate Index (HCI). Ils sont conçus pour être facilement interprétables et adaptés à des comparaisons entre lieux ou périodes.

3.4.2. Indices fondés sur le bilan énergétique humain

Parmi les nombreux indices développés pour quantifier le stress thermique humain, trois se distinguent par leur large diffusion dans la littérature scientifique et leur robustesse méthodologique : l'UTCI, l'ET et le PET. Ces indices reposent tous sur des fondements thermo-physiologiques rigoureux et simulent de manière avancée les échanges énergétiques entre le corps humain et son environnement.

L'Universal Thermal Climate Index (UTCI), élaboré dans le cadre d'une collaboration internationale pilotée par la Société Internationale de Biométéorologie et la COST Action 730, vise à fournir un indice standard applicable dans tous les contextes climatiques (Blazejczyk *et al.*, 2010). Il modélise la température ressentie par un individu marchant à 4 km/h, habillé d'un vêtement standard (0,9 clo), en intégrant les effets combinés de la température de l'air, du vent, de l'humidité et du rayonnement solaire. Son calcul nécessite une estimation précise de la température radiante moyenne (MRT), qui dépend à la fois du rayonnement direct et diffus, ce qui en limite l'application en l'absence de données très détaillées. Dans la littérature, l'UTCI est

souvent considéré comme l'indice de référence en biométéorologie grâce à son haut niveau de précision et sa sensibilité fine aux variations climatiques.

L'Effective Temperature (ET), développée dès 1933 par Missenard, constitue un indice plus ancien mais encore largement utilisé, notamment en Europe centrale (Missenard, 1933 ; Blazejczyk *et al.*, 2012). L'ET évalue le confort thermique en combinant la température sèche, l'humidité relative et la vitesse du vent, sans intégrer le rayonnement. Son approche repose sur l'équivalence de perception thermique dans différentes atmosphères, en estimant la perte totale de chaleur du corps humain. Malgré sa simplicité relative, l'ET obtient des résultats remarquablement proches de l'UTCI, avec une pente de régression de 0,947 et un coefficient de détermination (R^2) de 96,97 % selon l'étude comparative menée par Blazejczyk *et al.* (2012).

L'indice PET (Physiologically Equivalent Temperature), développé par Höppe (1999), repose sur le modèle Munich Energy Balance Model for Individuals (MEMI). Il évalue la température équivalente à laquelle un individu ressentirait le même confort thermique dans un environnement intérieur de référence. Le PET prend en compte la température de l'air, l'humidité, le vent, le rayonnement global, la production interne de chaleur et la résistance thermique des vêtements. Très utilisé dans les études de climat urbain et en géographie du tourisme (voir Matzarakis 2006 ; Matzarakis *et al.*, 2013), le PET se distingue par sa capacité à rendre compte de situations de stress thermique extrême. Dans l'analyse comparative de Blazejczyk *et al.* (2012), le PET montre une corrélation très forte avec l'UTCI, avec une pente de 0,843 et un R^2 de 96,42 %.

Enfin, l'indice Humidex, bien que plus simple, reste couramment employé dans les pays au climat tempéré comme le Canada. Créé par Masterson et Richardson (1979), il combine la température de l'air et la pression de vapeur pour estimer le ressenti de chaleur dans des conditions humides. Son usage est particulièrement adapté aux contextes où l'humidité amplifie l'inconfort thermique. Dans l'étude comparative de Blazejczyk *et al.* (2012), l'Humidex présente une pente de régression plus faible (0,629) et un R^2 de 47,66 %, ce qui traduit une moindre fidélité par rapport à l'UTCI.

Ces résultats suggèrent que l'UTCI et le PET sont actuellement les indices les plus robustes pour simuler le ressenti thermique dans une approche biométéorologique complète. Toutefois, leur mise en œuvre présente des contraintes techniques importantes : l'UTCI exige notamment la connaissance détaillée de la température radiante moyenne (MRT), nécessitant des mesures ou modélisations séparées du

rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi, ce qui n'est pas disponible dans la plupart des bases de données climatiques standard. De même, le PET, calculé par le modèle RayMan de Matzarakis *et al.* (2007) requiert l'utilisation d'un modèle énergétique complexe, difficile à mobiliser avec les données de ce travail.

L'indice Effective Temperature (ET) constitue une alternative fiable et accessible pour évaluer le confort thermique perçu. Son excellente corrélation avec l'UTCI ($R^2 = 96,97 \%$) en fait un outil robuste (Blazejczyk *et al.*, 2012), notamment dans les cas où les composantes radiatives nécessaires à l'UTCI ne sont pas disponibles. Néanmoins, dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur des indices spécifiquement conçus pour le tourisme, tels que le TCI ou le HCI, qui combinent plusieurs paramètres météorologiques pertinents pour estimer l'attractivité climatique d'une journée touristique. Toutefois, au sein de la structure pondérée du HCI, il a été choisi d'intégrer l'ET comme indicateur principal de confort thermique, en remplacement de l'Humidex. L'Humidex n'a donc pas été utilisé pour plusieurs raisons. D'une part, l'Humidex présente une corrélation beaucoup plus faible avec l'UTCI ($R^2 = 47,66 \%$), ce qui limite sa capacité à capturer précisément les effets combinés de la température, de l'humidité et du vent sur le ressenti thermique. D'autre part, des tests empiriques réalisés dans le cadre de ce travail ont montré que l'Humidex tend à surestimer le confort perçu par rapport à l'ET, ce qui conduit à une surévaluation des conditions touristiques. Cela peut fausser l'analyse en classant comme « Idéal » des journées en réalité modérément confortables pour les touristes, un biais qu'il est important d'éviter dans le contexte d'une évaluation de la fréquentation touristique. Le recours à l'ET permet ainsi d'assurer une appréciation plus nuancée et réaliste du confort climatique dans le calcul du HCI.

3.4.3. Le Tourism Climate Index (TCI)

Le Tourism Climate Index (TCI) a été développé par Mieczkowski (1985) afin de proposer une mesure synthétique de l'aptitude d'un climat au tourisme général. Il s'agit de l'un des premiers indices climatiques spécifiquement conçus pour évaluer le confort climatique des visiteurs, en agrégeant cinq variables météorologiques principales : la température moyenne et maximale journalière, l'humidité relative moyenne et minimale, les précipitations, l'ensoleillement et la vitesse du vent. Ces variables sont combinées à travers cinq sous-indices, à savoir : le CID (Daytime Comfort Index), le CIA (Daily Comfort Index), les précipitations, l'ensoleillement et le vent.

Le CID, qui repose sur la température maximale et l'humidité relative minimale, est censé représenter le confort thermique durant la période d'activité touristique la plus intense, à savoir la journée. Le CIA, pour sa part, utilise la température moyenne et l'humidité relative moyenne afin de rendre compte du confort général sur l'ensemble de la journée. À ces composantes s'ajoutent la durée d'ensoleillement en heures, les précipitations totales journalières, et la vitesse moyenne du vent.

La formule complète du TCI est la suivante :

$$\text{TCI} = 2 (4 \text{ CID} + \text{CIA} + 2 \text{ Précipitation} + 2 \text{ Ensoleillement} + \text{Vent})$$

Les sous-indices sont notés sur une échelle allant de 0 à +5, ou de -3 à +5 selon le sous-indice, permettant à l'indice final de varier entre -30 (conditions jugées impossibles pour le tourisme) et 100 (conditions idéales). Cette approche vise à fournir une note globale de confort climatique à partir de pondérations spécifiques. Le CID, considéré comme la composante la plus importante, reçoit un poids de 40 %, suivi de l'ensoleillement et des précipitations (20 % chacun), du CIA (10 %), et enfin du vent (10 %).

Malgré sa large diffusion, le TCI présente plusieurs limites méthodologiques notables. Sa structure repose sur des pondérations subjectives établies par son concepteur, Mieczkowski, sans validation empirique reposant sur les préférences réelles des touristes (Scott *et al.*, 2016 ; Tang, 2013). Par ailleurs, l'importance accordée au confort thermique y est disproportionnée, représentant 50 % du score total en combinant les composantes CID et CIA. Cela tend à reléguer au second plan d'autres facteurs pourtant déterminants pour la qualité perçue d'une journée touristique, tels que les précipitations ou le vent. Ces limites ont conduit à l'élaboration d'indices plus récents et mieux calibrés, à l'image du Holiday Climate Index (HCI), qui s'appuient sur des pondérations dérivées d'analyses empiriques et visent à offrir une représentation plus fidèle de l'expérience climatique vécue par les visiteurs.

3.4.4. Le Holiday Climate Index (HCI)

Le Holiday Climate Index (HCI) a été proposé par Tang (2013) dans le but de surmonter les nombreuses limites identifiées du Tourism Climate Index (TCI). Conçu spécifiquement pour les activités de tourisme de loisirs en extérieur, le HCI se veut plus fidèle aux préférences réelles des touristes, telles qu'exprimées dans des enquêtes empiriques menées au cours des dix dernières années précédant sa création. Contrairement au TCI, qui appliquait une pondération subjective aux variables climatiques, le HCI repose sur une pondération et des échelles de notation construites à partir d'une base empirique solide, ce qui représente une avancée méthodologique majeure (Tang, 2013 ; Scott *et al.*, 2016).

Plusieurs versions du HCI ont été développées par la suite pour s'adapter à différents types de tourisme (par exemple HCI:Urban ou HCI:Beach), mais dans le cadre de cette étude, c'est la version originale proposée par Tang (2013) qui est utilisée. Cette version permet une évaluation généraliste, mais empiriquement fondée, du climat pour le tourisme de plein air à travers trois facettes climatiques essentielles : le confort thermique (TC), l'esthétique (A) et les conditions physiques (P).

Le HCI intègre cinq variables météorologiques réparties dans ces trois dimensions : la température maximale, l'humidité relative moyenne et la vitesse du vent pour le confort thermique ; la nébulosité pour la composante esthétique ; et la pluie ainsi que la vitesse du vent pour la dimension physique. L'indice est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{HCI} = 4 \text{ TC} + 2 \text{ A} + (3 \text{ R} + \text{W})$$

Cette pondération donne un poids équilibré de 40 % aux composantes thermique et physique, et 20 % à l'esthétique (voir tableau 4), ce qui permet d'atténuer l'emphase excessive sur la température constatée dans le TCI. Elle permet également de refléter plus fidèlement l'expérience touristique réelle : des conditions physiques mauvaises (pluie ou vent forts) peuvent facilement ruiner une journée de vacances, même si les températures sont idéales (Tang, 2013 ; Scott *et al.*, 2016). Ainsi, un score élevé ne peut être obtenu si la composante physique obtient une mauvaise note, grâce à un mécanisme dit de surcharge climatique négative.

Facette	Variable climatique	Pondération (%)
Confort Thermique (TC)	Température maximale (°C)	40 %
	Humidité relative moyenne (%)	
	Vitesse du vent (m/s)	
Esthétique (A)	Couverture nuageuse (%)	20 %
Physique (P) (R + W)	Précipitations (mm)	30 %
	Vitesse du vent (km/h)	10 %

Tableau 4. Composantes du Holiday Climate Index (Tang, 2013 ; modifié)

À noter que le vent intervient à deux reprises dans le calcul de l'indice HCI, mais avec des rôles et des intensités d'influence distincts. Il est d'abord mobilisé dans le calcul du confort thermique perçu par les touristes. Dans ce contexte, le vent est exprimé en mètres par seconde (m/s) mesuré à 1,2 mètre du sol, c'est-à-dire à hauteur humaine. Cette valeur est généralement plus faible, reflétant davantage l'effet réel du vent ressenti par une personne et ne joue un vrai rôle que lorsque sa vitesse est plus importante.

En parallèle, le vent est également intégré dans la facette physique du HCI, en complément des précipitations, afin d'évaluer l'intensité des contraintes environnementales. Ici, le vent est exprimé en kilomètres par heure (km/h) à 10 mètres du sol, selon les standards météorologiques. Il s'agit donc de vitesses généralement plus élevées et d'une utilisation moins nuancée mais plutôt comme indicateur physique plus global du temps qu'il fait.

En résumé, le Holiday Climate Index (HCI) constitue un outil robuste et adapté pour évaluer l'adéquation des conditions météorologiques aux activités touristiques de plein air. Construit sur des pondérations issues d'enquêtes empiriques auprès des touristes, il corrige les biais du TCI en équilibrant l'importance accordée aux composantes thermiques, esthétiques et physiques. Sa structure limite le risque de notes artificiellement élevées en présence de conditions défavorables, tout en reflétant plus fidèlement l'expérience réelle des visiteurs.

4. Méthodologie

4.1. Collecte des données de fréquentation touristique

L'analyse de l'impact du climat sur la fréquentation touristique au Grand-Duché de Luxembourg a nécessité, en premier lieu, la constitution d'une base de données rassemblant les chiffres de fréquentation quotidienne de différentes attractions touristiques réparties sur l'ensemble du pays.

L'hypothèse de base de cette recherche est qu'en étudiant les variations de fréquentation liées aux conditions météorologiques, il est possible d'appréhender les impacts du changement climatique sur les tendances de fréquentation touristique des différentes attractions et activités touristiques.

La sélection des attractions s'est appuyée sur plusieurs critères, en combinant notamment l'analyse de différentes plateformes touristiques en ligne (telles que TripAdvisor, Visit Luxembourg ou encore divers guides spécialisés) afin d'identifier les lieux les plus visibles et attractifs pour les visiteurs. Cette approche visait à reproduire la perspective d'un touriste planifiant son séjour.

Dans le cadre de mon stage au ministère du Tourisme du Grand-Duché de Luxembourg, l'accès à une série d'informations internes, dont une liste non publiée des vingt attractions touristiques les plus visitées, a constitué une ressource complémentaire pour le choix des attractions retenues.

Enfin, un critère déterminant était la disponibilité d'un système de comptage des visiteurs. En pratique, cela signifie que seules les attractions équipées d'un système de billetterie électronique ou d'un dispositif de comptage automatique ont pu être intégrées à l'étude.

Cette contrainte exclut de nombreux sites en accès libre. Par exemple :

- Des lieux de loisirs comme le Lac de la Haute-Sûre, très fréquenté en période estivale, ne disposent pas de système de comptage à l'entrée. Une visite de terrain accompagnée d'un ranger a néanmoins permis de recueillir des informations qualitatives utiles à l'analyse.
- Les sites religieux tels que les églises sont souvent librement accessibles. Certaines communes (comme Diekirch) emploient ponctuellement des étudiants pour en compter les visiteurs, mais ces données sont généralement discontinues et peu fiables. Ces sites ont donc été écartés de l'analyse.

Concernant les sites de randonnée, notamment ceux de la région du Müllerthal (« Petite Suisse luxembourgeoise »), les données utilisées proviennent de bornes de comptage Ecocounter, qui détectent automatiquement le passage des randonneurs. Cette méthode comporte certaines limites, dans la mesure où un aller-retour peut être comptabilisé comme deux passages ou encore où des animaux peuvent être enregistrés. Toutefois, ces biais demeurent relativement réduits, en particulier lorsque les capteurs sont positionnés de manière stratégique. L'intégration de ces circuits dans l'étude s'avère indispensable, dans la mesure où ils occupent une place centrale dans le tourisme de plein air au Grand-Duché de Luxembourg.

À la suite de prises de contact avec différentes attractions touristiques, plusieurs ont répondu favorablement et ont accepté de transmettre leurs données. Dans certains cas, un accueil sur place a permis d'échanger directement sur le fonctionnement des attractions et d'obtenir des informations supplémentaires utiles à l'interprétation. Ce fut notamment le cas des Baggerweier, du Musée national des mines ou encore de la piscine de Troisvierges.

L'ensemble des données de fréquentation a été fourni sous condition de confidentialité. Cela implique que dans la suite de ce travail, les résultats sont présentés sous forme agrégée ou anonymisée, sans mention explicite des chiffres bruts ou de l'identité des attractions.

Malgré une volonté générale de collaboration, certaines limites sont apparues dans l'accès aux données. Plusieurs attractions n'ont pas donné suite aux sollicitations, sans qu'il soit possible de déterminer s'il s'agissait d'un refus ou d'un manque de moyens. Dans d'autres cas, l'absence d'un système de comptage automatisé a rendu impossible la transmission de données.

4.2. Données météorologiques

Afin de croiser les données de fréquentation avec les conditions climatiques, les données journalières issues de la plateforme AgriMeteo (ASTA, 2025), gérée par le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Viticulture, ont été mobilisées. Ce portail fournit les mesures de plus de soixante stations météorologiques réparties sur l'ensemble du territoire.

Parmi les variables disponibles, les paramètres suivants ont été retenus :

- Température moyenne (°C)
- Température maximale (°C)
- Température minimale (°C)
- Précipitations (mm)
- Humidité relative (%)
- Rayonnement solaire (Wh/m²)
- Ensoleillement (h)
- Vitesse du vent (m/s), mesurée soit à 2 m soit à 10 m de hauteur selon les stations

Des données étaient manquantes pour certaines dates, notamment :

- 28.05.2023 – 31.05.2023
- 08.04.2024
- 08.09.2024
- 21.09.2024 – 22.09.2024

Pour chaque site touristique, la station météorologique la plus proche a été sélectionnée. Toutefois, une seule station ne permettait que rarement de couvrir l'ensemble des paramètres. Certaines stations ne mesurent en effet que les précipitations, tandis que les données relatives à la radiation ou au vent sont plus rarement disponibles. Une stratégie de complémentation par proximité a donc été mise en place :

- Catégorie 1 : station la plus proche du site, utilisée en priorité pour tous les paramètres disponibles
- Catégorie 2 : deuxième station la plus proche, utilisée pour compléter les paramètres manquants
- Catégorie 3 : station plus éloignée, utilisée en dernier recours si les deux premières ne suffisent pas

Cette approche permet de minimiser les écarts climatiques potentiels. Il est en effet préférable de puiser les données manquantes autour de la même station de référence, plutôt que d'agréger des mesures provenant de régions éloignées, susceptibles de présenter des microclimats différents.

Au total, 28 stations météorologiques sont utilisées dans cette étude et sont représentées dans la figure 8.

L'annexe 10.1 présente, pour chaque site, les stations utilisées et leur catégorie. À noter : seules 10 situations ont nécessité un recours aux stations de catégorie 3. Pour 8 attractions, la station principale a suffi à fournir l'essentiel des données, complétées ponctuellement. Les annexes 10.2 à 10.4 présentent, pour chaque site, une cartographie indiquant la localisation des stations météorologiques associées.

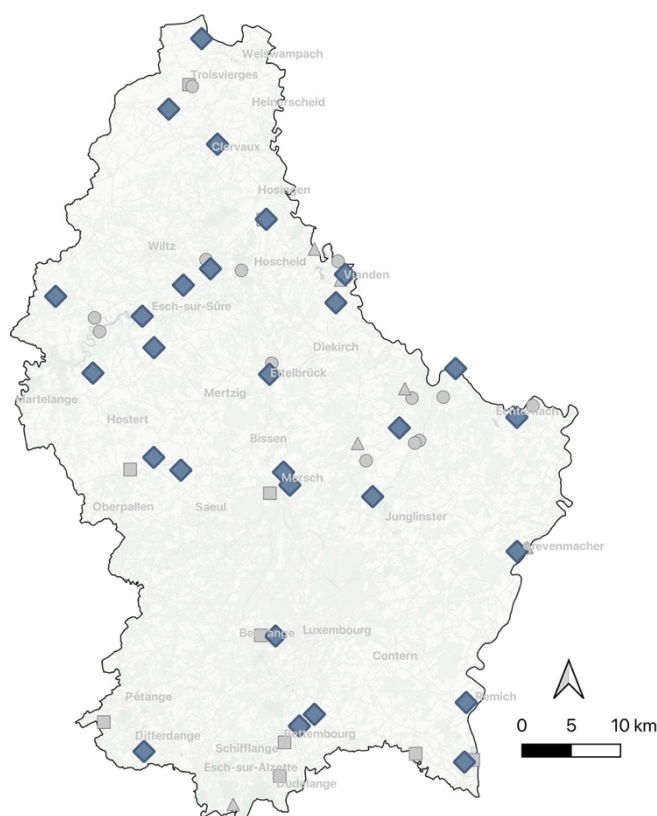


Figure 8. Localisation des stations météorologiques (losange bleu) par rapport aux attractions touristiques (triangle, carré et rond ; cf. Figure 9).

4.3. Période d'étude

La période d'observation retenue s'étend du 1er avril au 30 septembre, pour les années 2023 et 2024. Ce choix s'explique par la saisonnalité du tourisme luxembourgeois : plusieurs attractions ne sont pas ouvertes toute l'année, mais sont généralement actives durant cette période.

Certains jours de fermeture persistent au sein de cette période, mais leur incidence reste limitée dans la mesure où l'analyse porte sur des tendances générales et non sur une couverture exhaustive quotidienne.

Par ailleurs, pour certaines attractions, les données de 2023 sont incomplètes, notamment en raison :

- de fermeture pour cause de travaux ou de rénovations
- d'absences de dispositifs de comptage encore en phase d'installation
- ou d'autres raisons non précisées

Conformément aux engagements de confidentialité, les attractions concernées ne sont pas nommées.

4.4. Catégorisation des attractions touristiques

Afin de faciliter l'analyse statistique des données de fréquentation, les 27 attractions touristiques étudiées ont été regroupées selon leur type d'activité principale. Cette démarche vise à simplifier la lecture des résultats en réduisant la complexité du nombre de données important tout en conservant la diversité des pratiques touristiques observées. Trois grandes catégories ont ainsi été définies : Visite culturelle, Loisir aquatique et Randonnée.

La catégorie « Visite culturelle » regroupe les sites patrimoniaux ou culturels, tels que les châteaux et les musées. Ces lieux partagent des caractéristiques communes : l'accès y est généralement payant, la fréquentation implique une expérience encadrée, et une grande partie de la visite se déroule en intérieur, bien que certaines sections puissent se situer à l'extérieur (jardins, cours, remparts, etc.). Cette catégorie reflète donc des pratiques touristiques centrées sur la découverte du patrimoine et la culture. La catégorie « Loisir aquatique » concerne les attractions touristiques en lien avec la baignade et les activités aquatiques. Elle inclut aussi bien des piscines intérieures ou extérieures que des plans d'eau naturels comme les lacs aménagés. Toutefois, ces lieux offrent souvent plus qu'un simple accès à l'eau : des espaces extérieurs y sont généralement aménagés pour accueillir des activités complémentaires telles que le beach-volley, la pétanque, le multisport ou encore des aires de détente. Donc bien que cette catégorie mette l'accent sur la dimension liée à la baignade, elle n'exclut pas la diversité des usages observés sur certains sites, qui vont souvent bien au-delà des seules activités aquatiques et qui peuvent donc attirer plus de touristes que d'autres sites strictement réservés à la baignade.

Enfin, la catégorie « Randonnée » regroupe l'ensemble des sentiers et circuits de promenade recensés. Ces itinéraires sont en accès libre et sont intégrés dans des

espaces naturels. Ils se distinguent des deux autres catégories par leur dimension extensive, leur localisation en plein air, et leur dépendance directe aux conditions météorologiques.

Cette classification en trois grandes catégories permet de mieux organiser l'analyse et de comparer plus facilement les attractions entre elles. Elle tient compte des différences de fonctionnement, d'environnement et d'usage de chaque type de site. Elle permet aussi d'étudier plus clairement comment les conditions météorologiques peuvent influencer la fréquentation selon l'activité proposée.

4.5. Les attractions touristiques analysées

Au total, 28 attractions touristiques sont analysées dans cette étude, telles qu'énumérées dans le tableau de l'annexe 10.1 et représentées dans la figure 9. Parmi elles, on compte trois châteaux qui disposent de salles intérieures mais dont la visite se déroule principalement en extérieur. Les deux musées sélectionnés présentent un caractère semi-interactif : les visiteurs passent d'espaces bâtis à l'exploration de galeries minières. Ces mines se distinguent par une température intérieure stable tout au long de l'année, offrant une fraîcheur appréciable en été, ce qui en fait une motivation supplémentaire pour les touristes. À l'opposé, le Jardin des Papillons a été retenu comme cas contrasté : il s'agit d'une serre chaude et humide, permettant d'évaluer si l'attractivité demeure lors de journées chaudes, indépendamment de la recherche de fraîcheur.

Concernant les attractions de loisirs aquatiques, les piscines de Bettembourg, Mersch et Strassen sont des infrastructures couvertes, parfois dotées de petits espaces extérieurs de détente, mais sans véritable bassin en plein air. Les piscines de Hosingen, Rédange et Pétange présentent une configuration mixte : Hosingen dispose de plusieurs bassins couverts complétés par un petit bassin naturel extérieur accessible en été ; Rédange combine également un bassin intérieur et extérieur ; et Pétange, qui a la particularité d'un toit amovible permettant de transformer le bassin couvert en bassin de plein air par beau temps. Les piscines de Dudelange et Troisvierges constituent les seules véritables piscines en plein air, exclusivement ouvertes durant la période estivale. Le Baggerweier, également ouvert en été, est quant à lui un plan d'eau aménagé avec plages, espaces de loisirs et zones accessibles aux animaux domestiques.

Les sites de randonnée étudiés reposent sur des données issues de bornes de comptage Ecocounter, gérées par les offices régionaux du tourisme dans deux grandes régions particulièrement réputées pour la randonnée : l'Oesling et le Müllerthal. Les bornes sont implantées à des emplacements stratégiques, là où plusieurs itinéraires partagent un même tronçon, ce qui permet de capter un volume important de randonneurs.

Enfin, les annexes 10.2 à 10.4 présentent un catalogue détaillé de l'ensemble des attractions touristiques incluses dans ce travail. Leur lecture préalable peut être utile pour les lecteurs moins familiers avec ces différentes attractions.

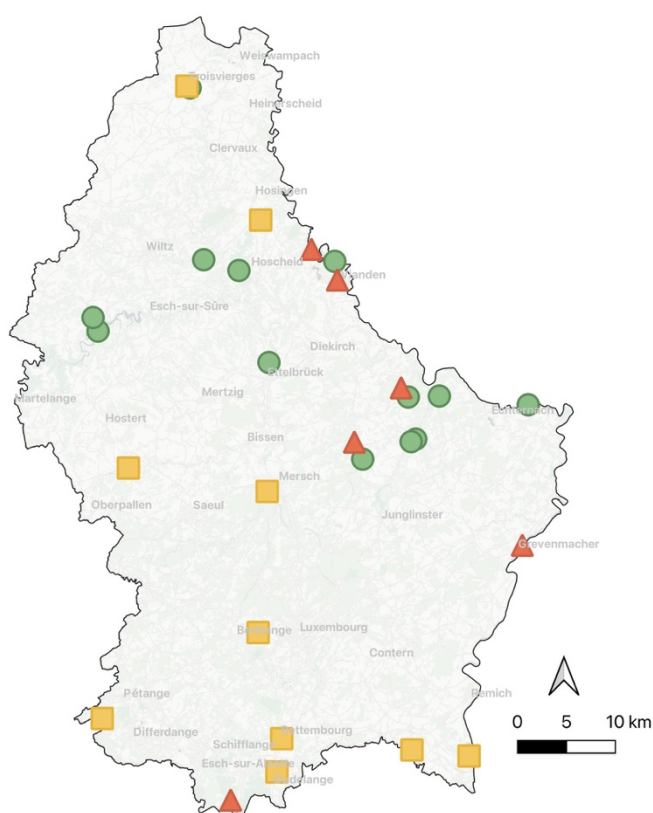


Figure 9. Localisation des attractions touristiques analysées (triangle orange : visites culturelles ; carré jaune : loisirs aquatiques ; rond vert : randonnées).

4.6. Définitions et indices climatiques utilisés

4.6.1. La définition de vagues de chaleur

Comme présenté dans le chapitre 3.4., trois définitions complémentaires ont été mobilisées pour identifier les vagues de chaleur sur les périodes estivales d'avril à septembre des années 2023 et 2024. Ces définitions permettent de croiser plusieurs dimensions du phénomène, en intégrant à la fois les températures minimales et maximales, ainsi que la dynamique d'acclimatation et d'excès thermique sur plusieurs jours. L'utilisation de plusieurs indicateurs permet de mieux capter la diversité des vagues de chaleur, en tenant compte à la fois des nuits chaudes, des journées caniculaires, et du caractère inhabituel et prolongé des épisodes.

4.6.1.1. Données et période de référence

Les données météorologiques utilisées proviennent du portail open source AgriMeteo (ASTA, 2025), qui met à disposition des séries journalières de température issues de stations réparties sur l'ensemble du territoire luxembourgeois.

Afin d'estimer les percentiles climatologiques nécessaires au calcul des vagues de chaleur, une période de référence s'étendant de 2005 à 2025 a été retenue. Cette période a été choisie principalement en raison de la disponibilité des données sur la plateforme AgriMeteo. Mais au-delà de cet aspect pratique, l'utilisation d'une période plus récente que la référence WMO classique (1971–2000) présente plusieurs avantages. En effet, elle reflète mieux les conditions climatiques actuelles et permet de détecter les vagues de chaleur dans un climat déjà réchauffé. De plus, elle est en adéquation avec d'autres études récentes qui privilégient des références mobiles pour mieux caractériser les extrêmes récents tel que les études de Smid *et al.* (2019) et de Junk *et al.* (2024). Il y a pourtant certaines limitations à cette période de référence. En effet, comme le soulignent Perkins et Alexander (2013), une période plus longue permettrait d'augmenter la probabilité de détecter des épisodes de vagues de chaleur constitués de jours consécutifs dépassant les seuils définis.

4.6.1.2. Choix de la station météorologique

Pour la détection de vagues de chaleur, les calculs ont été réalisés à partir des données de la station météorologique d'Ettelbruck, qui a une situation assez centrale dans le pays.

Ce choix se justifie pour les raisons suivantes :

- La centralité géographique d'Ettelbruck permet une représentativité spatiale optimale pour l'ensemble du territoire luxembourgeois.
- La station se situe à proximité directe de la majorité des attractions touristiques étudiées dans ce travail : 15 des 25 attractions retenues se trouvent dans un rayon de 20 km autour de cette station (Figure 10).
- Ettelbruck bénéficie d'une série temporelle complète et de bonne qualité, avec peu de valeurs manquantes sur la période étudiée, ce qui est crucial pour les calculs de percentiles et d'indices glissants.

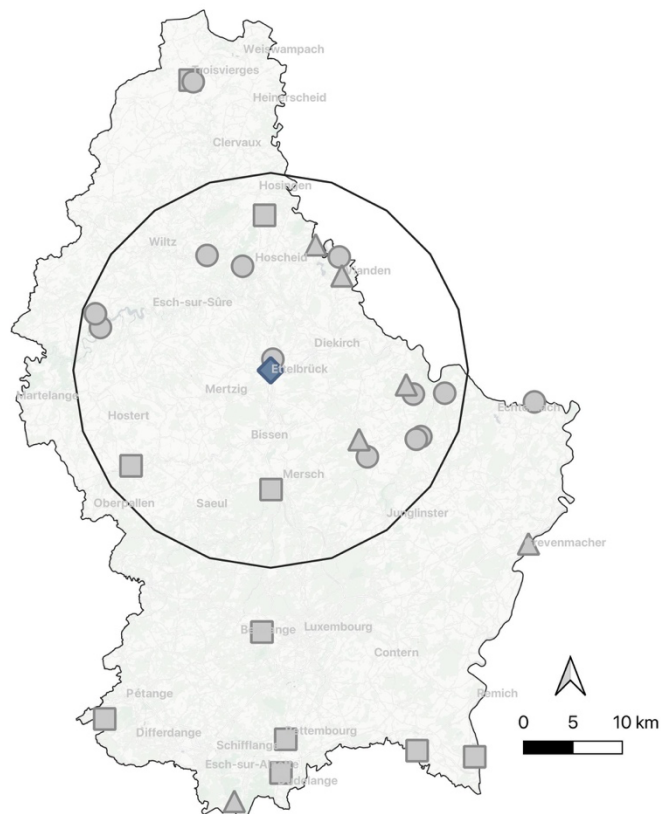


Figure 10. Localisation des attractions touristiques étudiées (triangles, carrés et ronds) et de la station météorologique d'Ettelbruck (losange bleu), utilisée pour la détection de vagues de chaleur. Le cercle représente un tampon de 20 kilomètres autour de la station d'Ettelbruck.

4.6.1.3. Définitions utilisées

Selon Perkins et Alexander (2013), un événement est qualifié de vague de chaleur si au moins l'un des trois critères suivants est rempli pendant une période d'au moins trois jours consécutifs :

1. TX90pct : Températures maximales extrêmes

Cette définition repose sur le dépassement du 90e percentile mobile de la température maximale journalière (T_{\max}), calculé pour chaque jour de l'année sur la période de 2005 à 2025 à l'aide d'une fenêtre glissante de ± 7 jours (soit un total de 15 jours). Ce calcul permet de tenir compte de la variabilité saisonnière et d'obtenir un seuil adapté à chaque date (Zhang *et al.*, 2011 ; Perkins *et al.*, 2012).

En théorie, un épisode est considéré comme une vague de chaleur (type CTX90pct) si la T_{\max} dépasse ce seuil pendant au moins trois jours consécutifs (Perkins et Alexander, 2013).

2. TN90pct : Températures minimales extrêmes

Cette définition reprend le même principe que la précédente, mais pour la température minimale journalière (T_{\min}). Elle permet d'identifier les vagues de chaleur caractérisées par des nuits chaudes, car les températures nocturnes élevées peuvent aggraver les conditions de canicule (Pattenden *et al.* 2003 ; Trigo *et al.* 2005 ; Nicholls *et al.* 2008 ; Nairn *et al.* 2009 ; Perkins et Alexander, 2013).

3. EHF : Excess Heat Factor

L'EHF est un indicateur composite défini par Nairn *et al.* (2009) et approfondi par Perkins et Alexander (2013) qui intègre à la fois :

- Une composante d'acclimatation EHI(accl.) qui compare la moyenne des 3 derniers jours à celle des 30 jours précédents.
- Une composante d'excès thermique significatif EHI(sig,) qui compare la même moyenne des 3 jours à un seuil climatologique fixe (En théorie le 95e percentile de la température moyenne journalière sur la période de référence).

L'indice EHF est basé sur deux indices de chaleur excédentaire EHI :

$$(1) \quad EHI(accl.) = [(T_i, T_{i-1}, T_{i-2})/3] - [(T_{i-3} + \dots + T_{i-32})/30]$$

$$(2) \quad EHI(sig.) = [(T_i, T_{i-1}, T_{i-2})/3] - T_{95}$$

Où T_i est la température quotidienne moyenne du jour i , et T_{95} est le 95e percentile climatologique (c'est-à-dire non variable dans le temps) pour la période considérée.

$EHI(accl.)$ décrit l'anomalie sur une fenêtre de 3 jours par rapport aux 30 jours précédents, et $EHI(sig.)$ décrit l'anomalie de la même fenêtre par rapport à un seuil extrême.

Les équations (1) et (2) sont ensuite combinées pour obtenir l'EHF :

$$(3) \quad EHF = \max[1, EHI(accl.)] \times EHI(sig.)$$

Des valeurs positives de l'EHF indiquent la présence de conditions de type canicule pour le jour i . D'après Perkins et Alexander (2013), un épisode de vague de chaleur est caractérisé par une EHF strictement positive pendant au moins trois jours consécutifs ($i, i+1, i+2$). L'EHF étant défini comme le produit de deux anomalies, son unité est exprimée en degrés Celsius au carré ($^{\circ}C^2$), ce qui reflète l'intensité thermique cumulée au cours de l'épisode.

4.6.2 Les indices climatiques touristiques

4.6.2.1 Le TCI et ses limites

Malgré sa large diffusion, le TCI présente plusieurs limites méthodologiques majeures. Tout d'abord, sa structure repose sur des pondérations subjectives fixées par son auteur, Mieczkowski, sans validation empirique fondée sur les préférences effectives des touristes (Scott *et al.*, 2016 ; Tang, 2013). Plusieurs auteurs ont souligné que ces pondérations, bien que cohérentes dans leur logique initiale, ne reflètent pas nécessairement les sensibilités actuelles des visiteurs. Des études fondées sur des enquêtes de préférences climatiques montrent par exemple que les touristes urbains, culturels ou encore certains types de vacanciers affichent une tolérance plus large aux variations climatiques que ne le suppose le TCI (Rutty *et al.*, 2020 ; Scott *et al.*, 2016). De plus, l'indice accorde une pondération très importante au confort thermique (50 % en combinant CID et CIA), ce qui tend à minimiser l'impact d'autres facteurs comme la pluie ou le vent, pourtant déterminants pour la qualité perçue d'une journée touristique. Tang (2013) montre que cette surpondération du confort thermique peut

conduire à des surévaluations du confort global, même lorsque les conditions physiques sont défavorables. L'indice attribue par ailleurs 10 % de la note au confort thermique en soirée (le CIA), une composante non pertinente pour ce travail car les fréquentations analysées concernent les heures d'ouverture en journée. De plus, les activités telles que la randonnée se déroulent rarement en soirée, surtout en période de faible luminosité.

Enfin, le TCI est construit à partir de moyennes climatiques mensuelles, ce qui en limite considérablement la sensibilité aux événements extrêmes. Cette agrégation temporelle masque les épisodes ponctuels de conditions défavorables (pluie, canicule, orage, etc.) qui peuvent avoir un impact significatif sur les décisions des touristes. Scott *et al.* (2016) soulignent que cette faible résolution temporelle est l'une des critiques majeures adressées au TCI depuis plusieurs années. Dans une étude comme celle-ci, fondée sur des données journalières de fréquentation touristique, un indice basé sur des agrégats mensuels est structurellement inadapté.

Pour toutes ces raisons, le TCI n'a pas été retenu comme outil principal d'évaluation du climat touristique dans ce mémoire. Le choix s'est porté sur le Holiday Climate Index (HCI), proposé par Tang (2013), qui surmonte les limites du TCI grâce à des pondérations issues d'enquêtes empiriques, une structure fondée sur les trois dimensions clés du tourisme (thermique, physique, esthétique), et un calcul à l'échelle quotidienne permettant de mieux capturer la variabilité climatique réellement ressentie par les visiteurs (Scott *et al.*, 2016 ; Tang, 2013 ; Rutty *et al.*, 2020).

4.6.2.2. Le HCI comme outil d'évaluation climatique

Le HCI présente l'avantage d'être calculé à l'échelle journalière, ce qui est crucial pour l'analyse de la fréquentation touristique. En effet, l'utilisation de données mensuelles, comme dans le TCI, masque les épisodes de conditions extrêmes (pluies intenses, vague de chaleur, orage localisé). Le recours aux mesures quotidiennes permet de mieux identifier les journées réellement favorables ou défavorables au tourisme, et d'évaluer la fréquence d'apparition de conditions « idéales » ou au contraire « dangereuses » (Tang, 2013). Ce niveau de précision temporelle est tout à fait adapté à la présente étude, qui repose elle-même sur des données journalières de fréquentation des attractions touristiques.

4.6.2.2.1. Méthodologie de calcul du HCI

Le calcul du HCI s'appuie ici sur des données météorologiques journalières observées. Pour chacune des quatre composantes du HCI prises en compte, une méthode de traitement spécifique a été appliquée.

4.6.2.2.2. Confort thermique (TC)

Pour évaluer la composante thermique du Holiday Climate Index (HCI), cette étude mobilise l'indice de température effective (ET) développé par Missenard (1933), également désigné sous le terme de « température ressentie » dans de nombreux travaux européens. L'ET permet de représenter le ressenti thermique à partir d'une combinaison de trois paramètres essentiels : la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent. Il repose sur un fondement physiologique solide, considérant les pertes de chaleur du corps humain par convection, évaporation superficielle et rayonnement.

La formule utilisée est celle adaptée à un air en mouvement, telle que proposée dans les travaux de Missenard (1933) :

$$ET = 37 - \frac{(37 - T)}{0,68 - 0,0014 RH + \left(\frac{1}{1,76 + 1,4 V^{0,75}} \right)} - 0,29 T (1 - 0,01 RH)$$

Où :

- ET est la température effective (°C),
- T est la température sèche de l'air (°C),
- RH est l'humidité relative (%),
- V est la vitesse du vent (en m/s) à 1,2 m de hauteur.

Cette formule intègre les trois principaux déterminants du confort thermique : la température perçue est diminuée par la présence de vent (effet refroidissant), mais augmentée par une humidité élevée, qui limite l'évaporation de la sueur. L'indice ET reste aujourd'hui largement utilisé dans les pays d'Europe centrale et orientale (Blazejczyk *et al.*, 2012).

Cependant, pour pouvoir appliquer la formule de l'ET, la vitesse du vent devait être connue à 1,2 mètre du sol, hauteur de référence pour l'évaluation du ressenti humain. Or, les données disponibles sont les vitesses moyennes journalières mesurées à 10 mètres de hauteur, selon le standard des stations météorologiques. Afin d'estimer la vitesse à hauteur corporelle, une correction verticale a été appliquée en mobilisant la formule logarithmique de Davenport (1960), conçue pour exprimer la variation verticale de la vitesse du vent en fonction des caractéristiques de rugosité du terrain :

$$V(z) = V_{\text{ref}} \left(\frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^{\alpha}$$

Où :

- $V(z)$ est la vitesse du vent à hauteur z (ici 1,2 m),
- V_{ref} est la vitesse mesurée à la hauteur de référence z_{ref} (ici 10 m),
- α est l'exposant de puissance dépendant de la rugosité du site.

Dans cette étude, un exposant $\alpha = 0.3$ a été utilisé, ce qui correspond à une classe de rugosité associée à un environnement de campagne boisée, parc et petites villes, selon la classification de Davenport (1960). Ce choix est justifié par les caractéristiques du territoire luxembourgeois, majoritairement couvert de forêts, de parcs ou de zones bâties de faible densité, ce qui rend cette valeur d' α la plus adaptée au contexte local.

4.6.2.2.3. Esthétique (A)

Les données de couverture nuageuse ne sont pas directement disponibles, et la nébulosité journalière (%) a donc été estimée via le rapport entre la durée d'ensoleillement mesurée (en heures) et la durée d'ensoleillement théorique. Celle-ci a été calculée en additionnant les heures où l'irradiance solaire globale dépasse 120 W/m^2 , conformément à la définition adoptée par l'Organisation météorologique mondiale (WMO, 1990). Cette méthode permet de restituer un pourcentage journalier de nébulosité reflétant l'obstruction du rayonnement solaire par les nuages. La formule utilisée est la suivante :

$$\text{Nébulosité} = 100 \left(\frac{1 - \text{durée d'ensoleillement mesurée}}{\text{durée d'ensoleillement théorique}} \right)$$

Cette approche offre une approximation robuste de la couverture nuageuse effective, en s'appuyant sur des données mesurées disponibles de manière cohérente sur l'ensemble du territoire.

4.6.2.2.4. Physique (P)

Précipitations (R)

Les données de précipitations journalières cumulées n'ont pas besoin de traitement et sont directement intégrées au HCI.

Vent (W)

La vitesse moyenne du vent a été intégrée en km/h à partir des mesures standardisées à 10 mètres de hauteur, conformément aux recommandations du WMO.

4.6.2.2.5. Échelle d'interprétation du HCI

Chacune des quatre composantes du HCI a été convertie en une note comprise entre 0 et 10 selon une échelle préétablie par Tang (2013), avant d'être intégrée dans la formule pondérée de l'indice HCI (Tableau 5). Ces échelles ont été construites à partir d'enquêtes empiriques portant sur les préférences climatiques de touristes de plein air. Leur but est de refléter la manière dont les conditions climatiques affectent concrètement la qualité perçue d'une journée touristique.

La composante thermique (TC) repose sur la température effective, intégré ici en tant que variable synthétique combinant température, humidité et vent. Selon Blazejczyk *et al.* (2012), en Europe centrale, les seuils suivants sont utilisés : < 1 °C = très froid ; 1–9 °C = froid ; 9–17 °C = frais ; 17–21 °C = doux ; 21–23 °C = confortable ; 23–27 °C = chaud ; > 27 °C = très chaud. L'indice HCI attribue les scores les plus élevés aux conditions confortables et chaudes.

Pour la composante esthétique (A), les meilleurs scores sont attribués à des conditions légèrement voilées (1–10 % de couverture nuageuse, score de 9), et à une couverture modérée (11–20 %, score de 10). Cette distribution repose sur des préférences des touristes qui perçoivent souvent un léger voile nuageux comme plus agréable que le plein soleil, car il réduit l'éblouissement et améliore la qualité visuelle, tout en évitant la sensation d'écrasement thermique. Les scores diminuent ensuite en fonction de la

couverture nuageuse, traduisant une perception moins favorable des conditions visuelles et de l'ambiance générale (Tang, 2013 ; Scott *et al.*, 2016).

Pour les précipitations journalières cumulées, l'échelle prévoit une chute rapide du score dès les premières averses. Jusqu'à 1 mm, la note maximale est conservée (10), mais au-delà de 12 mm, le score tombe à 0, et atteint même -1 à partir de 25 mm. Ce traitement traduit la forte sensibilité des touristes à la pluie : plusieurs études (Tang, 2013 ; Scott *et al.*, 2016) ont montré que les précipitations sont perçues comme l'un des facteurs les plus dissuasifs, en particulier pour les activités extérieures telles que la randonnée ou la visite de sites culturels.

Enfin pour le vent, la grille d'évaluation établit que les vitesses faibles, comprises entre 1 et 9 km/h, sont les plus confortables, et se voient attribuer la note maximale (10). Une vitesse de vent nulle se voit ici attribuer un score de 8 et non de 10, car selon Tang (2013) et Scott *et al.* (2016) les touristes sont favorables à une légère brise qui peut parfois avoir un effet rafraichissant.

Composante	TC	A	R	W
Score	Température effective (°C)	Couverture nuageuse (%)	Précipitations (mm)	Vitesse du vent (km/h)
10	23 - 25	11 - 20	0	1 - 9
9	20 - 22 26	1 - 10 21 - 30	< 3	10 - 19
8	27 - 28	0 31 - 40		0 20 - 29
7	18 - 19 29 - 30	41 - 50		
6	15 - 17 31 - 32	51 - 60		30 - 39
5	11 - 14 33 - 34	61 - 70	6 - 8	
4	7 - 10 35 - 36	71 - 80		
3	0 - 6	81 - 90		40 - 49
2	-5 - -1 37 - 39	> 90	9 - 12	
1	< -5			
0	> 39		> 12	50 - 70
-1			> 25	
-10				> 70

Tableau 5. Système de notation HCI (selon Tang, 2013)

Les scores des quatre composantes (TC), (A), (R) et (W) sont finalement introduites dans l'équation du HCI pour donner le score global du HCI. Celui-ci est compris entre 0 (conditions dangereuses pour les touristes) et 100 (conditions idéales). Tang (2013) propose une échelle descriptive similaire à celle du TCI, allant de « Idéal » à « Impossible ». Toutefois, Scott *et al.* (2016) affinent cette approche en considérant que des scores inférieurs à 40 représentent des conditions jugées inacceptables par la majorité des touristes. Ils remettent également en question la notion de « conditions impossibles » au sens strict, en soulignant qu'un certain profil de touristes peuvent rechercher volontairement des conditions extrêmes (par exemple les sports nautiques lors de vents violents). Le HCI redéfinit ainsi le score minimal comme représentant des conditions dangereuses, caractérisées par des phénomènes climatiques sévères (chaleur extrême, vents forts, fortes précipitations) qui, bien que rares et ponctuels, ont un impact direct sur le potentiel touristique du jour.

L'échelle d'interprétation proposée par Scott *et al.* (2016) est donc utilisée dans cette étude et est représentée dans le tableau 6.

Score	Condition HCI
90 - 100	Idéal
80 - 89	Excellent
70 - 79	Très bon
60 - 69	Bon
50 - 59	Acceptable
40 - 49	Limite
20 - 39	Inacceptable
0 - 19	Dangereux

Tableau 6. Système de notation de l'HCI (selon Scott *et al.*, 2016)

Cette classification reflète la capacité du HCI à capturer la complexité de la météo perçue par les touristes, et à traduire les variations climatiques quotidiennes en un indicateur directement mobilisable pour la gestion touristique. Elle est également plus adaptée à l'étude des dynamiques de fréquentation journalière, car elle permet d'associer chaque journée à un niveau de qualité climatique cohérent avec les préférences exprimées dans la littérature.

5. Analyse de la fréquentation touristique

5.1 Fréquentation touristique par type d'activité

La fréquentation touristique quotidienne des attractions au G-D de Luxembourg entre avril et septembre est examinée en distinguant trois grandes catégories d'activités : les visites culturelles, les loisirs aquatiques et la randonnée. L'objectif est de comparer les niveaux et dynamiques de fréquentation entre les années 2023 et 2024, afin d'identifier d'éventuelles évolutions dans les comportements touristiques.

L'analyse présentée dans ce chapitre repose sur une approche centrée sur les moyennes journalières de fréquentation calculées pour chaque site touristique individuellement. Plutôt que de calculer une moyenne globale à partir de l'ensemble des observations quotidiennes, ce qui tend à faire ressortir surtout les attractions les plus fréquentées, cette méthode consiste à établir pour chaque site sa fréquentation moyenne quotidienne avant d'agréger ces valeurs par activité et par année.

Ce choix méthodologique présente plusieurs avantages. Il permet de mettre toutes les attractions sur un pied d'égalité, en évitant que les attractions majeures ne masquent les dynamiques propres aux attractions plus modestes. Il offre ainsi une vision plus représentative de la fréquentation typique d'un site (un musée, une piscine, un chemin pédestre, etc.) selon son type d'activité, donc les visites culturelles, les loisirs aquatiques et la randonnée. De plus, cette méthode met en évidence la variabilité des fréquentations moyennes entre les attractions, révélant des activités plus ou moins homogènes en termes d'attractivité.

Toutes les valeurs de fréquentation moyenne mentionnées dans ce chapitre font donc référence à des moyennes journalières calculées à l'échelle des attractions, puis synthétisées par catégorie d'activité et par année.

Il est important de souligner que la base de données est légèrement déséquilibrée. En particulier, les attractions de type « Visites culturelles » n'ont fourni que 361 observations en 2023, contre 849 en 2024, en raison de difficultés d'acquisition de certaines données d'archives. Cette différence doit être gardée en tête lors de l'interprétation des résultats.

La figure 11 permet de visualiser la répartition des fréquentations journalières. Chaque boîte correspond à une activité en une année donnée. La boîte centrale contient 50 %

des valeurs, délimitée par le premier et le troisième quartile (Q1 et Q3). Le trait noir horizontal au centre de cette boîte représente la médiane (valeur centrale de la distribution), tandis que le losange indique la moyenne. Les traits verticaux s'étendent généralement jusqu'à 1,5 fois l'écart interquartile, ce qui reflète l'étendue « normale » des données. Les valeurs atypiques sont représentées par des points bleus ou oranges au-delà de l'étendue normale.

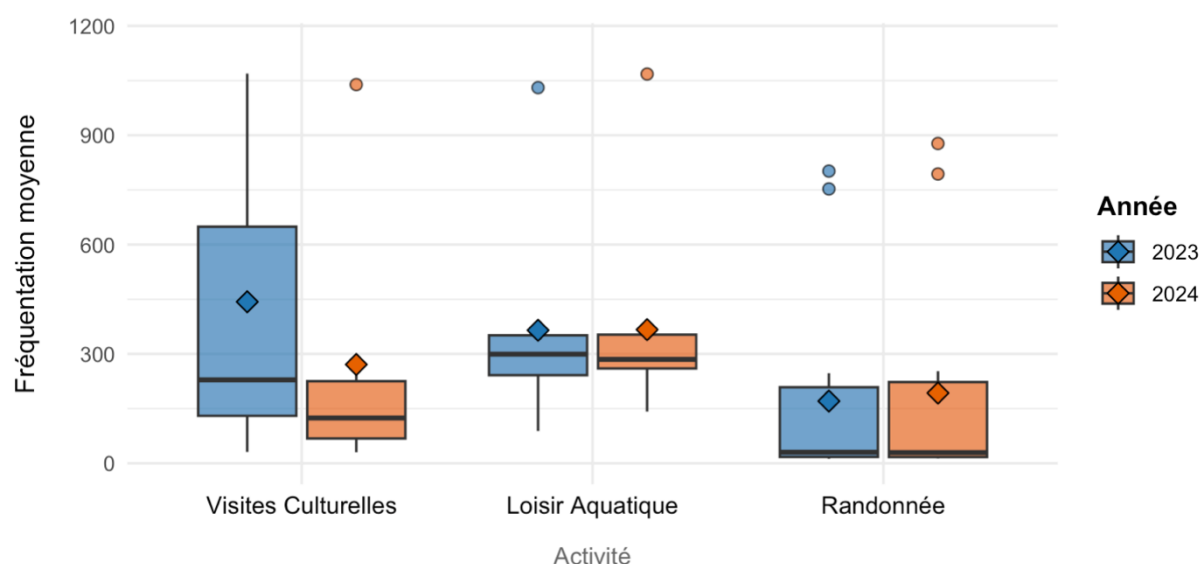


Figure 11. Distribution de la fréquentation journalière moyenne des activités par année

5.1.1. Fréquentation de l'activité « Visites Culturelles »

Les données des visites culturelles révèlent des écarts très marqués entre les deux années. En 2023, la fréquentation est nettement plus élevée, avec une moyenne de 443 visiteurs/jour, et une médiane à 229. En 2024, ces valeurs chutent à 271 et 124 respectivement, soit une baisse d'un peu moins de 50 %. Cette différence est visuellement frappante dans la figure 11 : la boîte orange de 2024 est nettement plus basse que celle de 2023. La dispersion est également très élevée en 2023 (écart-type de 551), ce qui suggère une grande hétérogénéité entre les attractions ou les jours. Cette tendance est confirmée par la figure 12. En 2023, la courbe rouge pointillée connaît une forte augmentation en juillet (607 visiteurs/jour en moyenne) et atteint un pic en août (731), avant de redescendre à 287 en septembre. En 2024, les pics sont deux fois moins marqués, avec 366 en juillet et 423 en août. Ces résultats suggèrent que l'été 2023 a constitué un pic de fréquentation pour les visites culturelles, tandis que l'année suivante a connu une fréquentation plus modérée, plus régulière, et moins saisonnière.

La forte baisse de la fréquentation estivale des attractions de visite en 2024 suggère un changement de comportement touristique, possiblement lié aux conditions météorologiques, à une offre culturelle moins attractive, ou à des préférences pour d'autres formes de tourisme. Toutefois, cette tendance doit être interprétée avec prudence, car les données disponibles sont nettement plus nombreuses pour 2024 (849 journées-site) que pour 2023 (361), ce qui peut introduire un biais de représentation. En effet, certaines journées très fréquentées en 2023 lors de périodes estivales ont pu être surreprésentées dans les données collectées, tandis que d'autres journées moins denses sont potentiellement absentes. À l'inverse, les données plus complètes de 2024 offrent une image plus réaliste mais peut-être moins biaisée par les événements exceptionnels.

5.1.2. Fréquentation de l'activité « Loisir aquatique »

Pour les activités de loisirs aquatiques, les différences entre les deux années sont quasiment nulles. La moyenne annuelle est de 365 visiteurs/jour en 2023 contre 367 en 2024, et la médiane montre une très faible différence avec 299 contre 285 respectivement. La figure 11 met également en évidence des valeurs extrêmes au-delà de 900 visiteurs/jour en moyenne pour un site de baignade pour les années 2023 et 2024.

La figure 12 vient nuancer cette stabilité en montrant une hausse estivale en 2024. Alors qu'en août 2023, la moyenne est de 409 visiteurs, elle passe à 500 en août 2024. De même, juillet 2024 (418) dépasse juillet 2023 (383).

De manière plus générale, les activités de loisir apparaissent stables sur l'ensemble de la période analysée, surtout en 2023 et légèrement renforcées durant les pics estivaux de 2024. Leur attractivité pourrait reposer sur plusieurs facteurs : des conditions climatiques propices, une accessibilité immédiate au public local (notamment aux familles et habitants du G-D de Luxembourg ou de la Grande Région), ainsi qu'un caractère récréatif et adaptable qui les rend attractives même en cas de fortes chaleurs et/ou de contraintes budgétaires.

5.1.3. Fréquentation de l'activité « Randonnée »

Enfin, la fréquentation des chemins de randonnée reste globalement faible sur l'ensemble des deux années observées. En 2023, la moyenne s'élève à 171 visiteurs par jour, mais la médiane chute à seulement 30 visiteurs, révélant une distribution très déséquilibrée. En 2024, la situation est similaire : la moyenne est légèrement plus élevée (193 visiteurs/jour), tandis que la médiane reste extrêmement basse (29 visiteurs). Cette forte dissymétrie entre moyenne et médiane suggère que la plupart des journées sont peu fréquentées, mais qu'un petit nombre de jours ou de chemins enregistrent des afflux importants, tirant artificiellement la moyenne vers le haut. La figure 11 illustre clairement cette réalité : la boîte représentant l'intervalle interquartile est assez allongée, avec le premier quartile à 17 et le troisième quartile à 209 et 223 pour les années 2023 et 2024 respectivement. La médiane se situe à l'extrémité basse de la boîte interquartile alors que la moyenne se trouve à l'extrémité opposée, traduisant une forte hétérogénéité. Cette configuration peut notamment s'expliquer par un effet de groupe : lorsqu'un groupe organisé emprunte un sentier rarement fréquenté, cela provoque une hausse brutale et ponctuelle de la fréquentation pour ce chemin au jour donné. Par exemple, des marches populaires organisées par la Fédération Luxembourgeoise de Marche Populaire ([FLMP.lu](https://www.flmp.lu)) totalisent chaque année entre 70 et 80 événements, rassemblant de nombreux participants. Un événement emblématique est la Marche internationale de Diekirch ([Marche.lu](https://www.marche.lu)) qui attire chaque mois de mai plusieurs milliers de marcheurs et illustre parfaitement ce phénomène. D'autres manifestations aux alentours des chemins de randonnée peuvent également générer ponctuellement des affluences exceptionnelles sur certains itinéraires.

La courbe mensuelle (Figure 12) montre une lente progression en 2024 où les fréquentations augmentent légèrement en mai et en août par rapport à l'année 2023, mais généralement les chiffres des visiteurs restent stables d'une année à l'autre.

Les fortes dispersions statistiques observées, notamment pour les visites culturelles et le loisir aquatique (surtout en 2024), justifient une attention particulière aux contextes spécifiques : météo du jour, week-end ou non, présence d'événements, accessibilité des chemins, etc. Ces facteurs seront examinés dans les chapitres suivants. L'activité de randonnée, quant à elle, semble répondre à une dynamique plus

régulière, mais pourrait aussi être influencée ponctuellement par la météo estivale ou les périodes de vacances scolaires, qu'il conviendra d'explorer plus en détail.

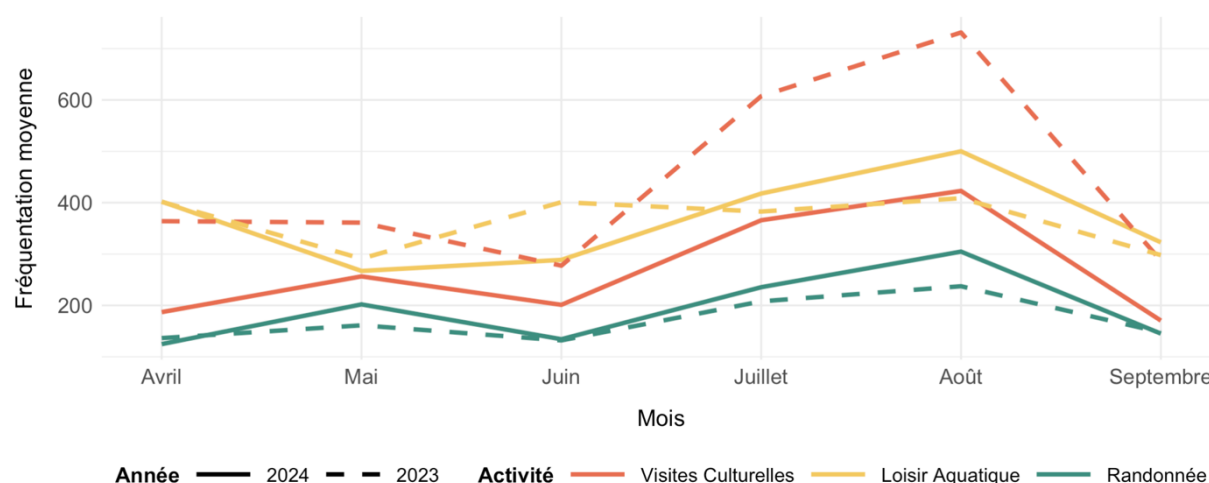


Figure 12. Fréquentation mensuelle selon les activités (2023 vs 2024)

5.2. Fréquentation touristique selon le type de jour

Après avoir examiné la fréquentation touristique quotidienne selon le type d'activité, ce chapitre vise à analyser les dynamiques de visite en fonction du type de jour : jours de semaine, week-ends et jours fériés. L'objectif est de comprendre comment les comportements de visite varient selon le calendrier, et si certaines activités ou certaines attractions sont plus fréquentées durant les jours de repos.

5.2.1. Répartition de la fréquentation

L'analyse de la fréquentation touristique entre avril et septembre s'intéresse ici à la manière dont les visites se répartissent entre trois types de jours : les jours de semaine (lundi à vendredi, hors jours fériés), les week-ends (samedi et dimanche, hors jours fériés), et les jours fériés (indépendamment de leur position dans la semaine). L'objectif est de mieux cerner les rythmes d'usage des différentes formes de tourisme au G-D de Luxembourg, en distinguant les comportements propres à chaque activité et à chaque site.

Pour ce faire, une méthode fondée sur des proportions de fréquentation a été utilisée. Les données ont d'abord été catégorisées selon le type de jour, puis la fréquentation a été agrégée pour chaque site, séparément pour la semaine, le week-end et les jours

fériés. Chaque composante a ensuite été exprimée en pourcentage de la fréquentation totale annuelle du site, afin de neutraliser les effets de taille. Enfin, ces proportions ont été moyennées à l'échelle des activités, de manière à faire émerger un profil type de fréquentation selon le calendrier. Cette approche permet de s'affranchir des volumes bruts, souvent dominés par les attractions majeures, pour se concentrer sur les comportements moyens de visite observés au sein de chaque catégorie.

À l'échelle des activités, les profils sont relativement différenciés (Figure 13). Les randonnées se démarquent par une fréquentation particulièrement concentrée le week-end, avec 41,3 % des visites réalisées les samedis et dimanches. Il s'agit de la part la plus élevée parmi les trois catégories d'activité, devant les loisirs aquatiques (37,4 %) et les visites culturelles (36,0 %). Les jours fériés jouent également un rôle non négligeable pour la randonnée, avec une proportion moyenne de 6,8 %, soit plus du double de celle des loisirs aquatiques (2,5 %) et nettement plus que pour les visites culturelles (4,3 %). À l'inverse, ce sont les jours de semaine qui concentrent l'essentiel de la fréquentation pour les visites culturelles (59,8 %) et les loisirs aquatiques (60,1 %), contre seulement 51,9 % pour la randonnée.

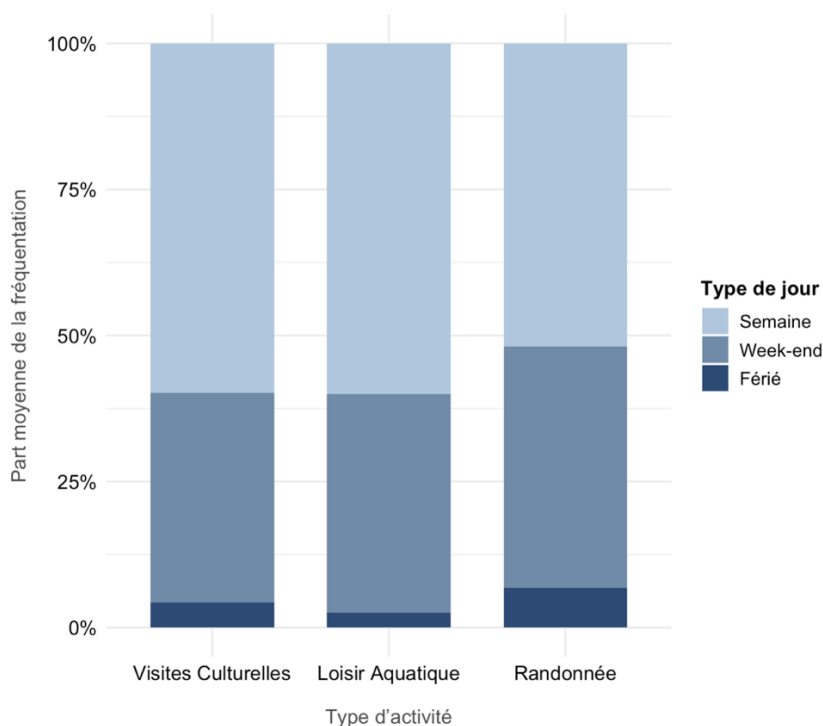


Figure 13. Répartition moyenne des fréquentations par activité selon le type de jour

Ces tendances générales se retrouvent également à l'échelle des attractions individuelles (Figure 14), mais avec une certaine hétérogénéité. Plusieurs sentiers de randonnée affichent une concentration très marquée de leur fréquentation le week-

end, comme la randonnée de Vianden (51,1 % de fréquentation le week-end, 8,3 % les jours fériés) ou la randonnée de Burfelt (48,3 % week-end, 8,8 % fériés). Cette dernière se distingue par une proportion de jours fériés particulièrement élevée, la plus haute parmi toutes les attractions analysées, ce qui suggère une sensibilité marquée aux calendriers non scolaires. À l'inverse, des lieux comme le Musée de la Mine de Cuivre (66,7 % en semaine) ou la piscine de Bettembourg (74,9 % en semaine) concentrent leur fréquentation sur les jours ouvrables.

Ces résultats confirment des comportements attendus : la randonnée est une activité typiquement pratiquée pendant les jours de congé, en particulier le week-end, lorsqu'elle s'inscrit dans des pratiques de loisir de proximité. À l'inverse, la fréquentation des attractions culturelles ou des piscines semble plus régulière et moins exclusivement concentrée sur le temps libre. Certaines attractions culturelles captent un public scolaire ou touristique organisé durant la semaine, tandis que des piscines urbaines peuvent accueillir un public local en semaine, notamment en période estivale ou lors de fortes chaleurs. Les jours fériés jouent un rôle complémentaire, mais rarement central, dans la structuration de la fréquentation.

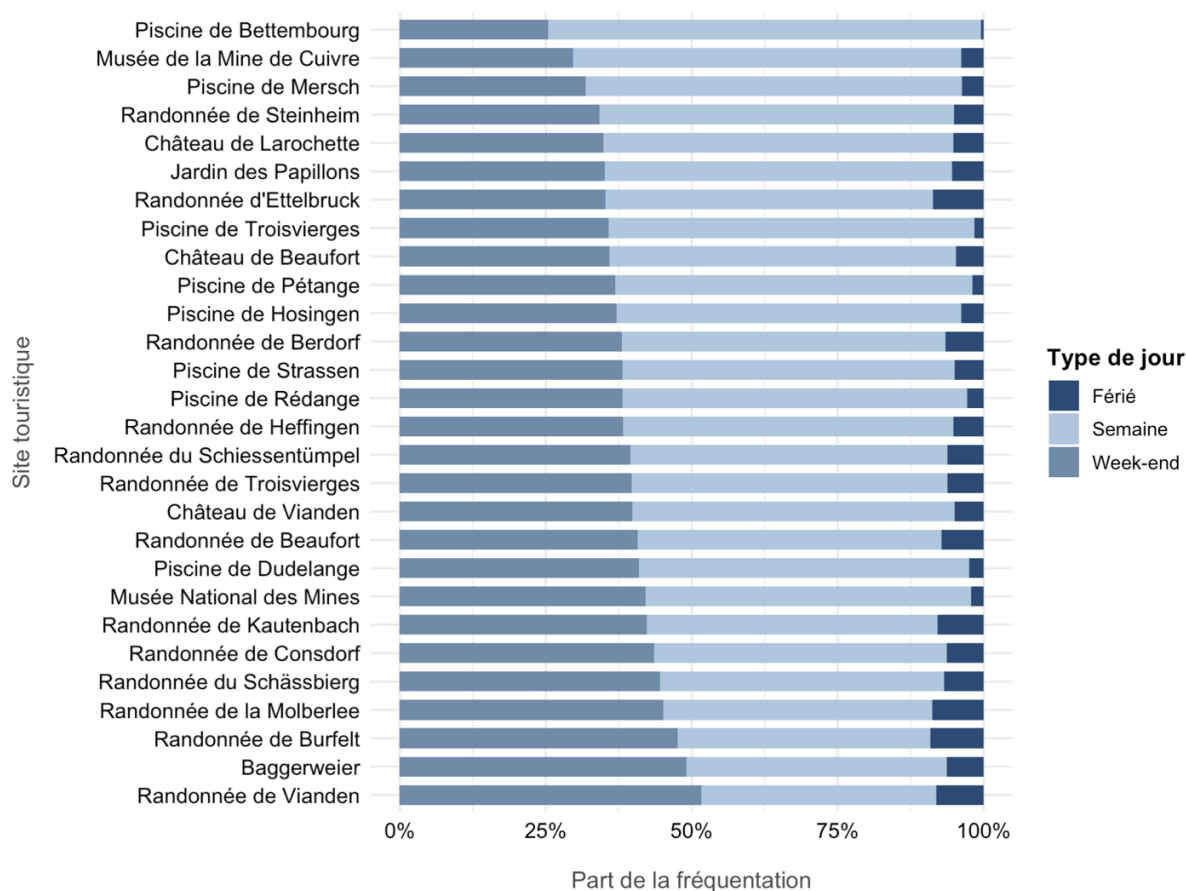


Figure 14. Répartition des fréquentations par site selon le type de jour

5.2.2. Variation relative entre jours de semaine et week-ends/fériés

Alors que la section précédente analysait la structure globale de la fréquentation selon le type de jour (en répartissant chaque site ou activité en pourcentage de fréquentation semaine, week-end et férié), cette seconde partie adopte une approche différentielle. Il ne s'agit plus ici de décrire « comment se répartit » la fréquentation, mais de mesurer dans quelle mesure elle augmente ou diminue les week-ends et jours fériés par rapport aux jours de semaine.

Ce changement de perspective est essentiel pour identifier non seulement les profils d'usage, mais aussi l'intensité du changement de fréquentation selon le calendrier. En effet, deux attractions peuvent avoir une même proportion de week-ends dans leur fréquentation globale, mais des différences très nettes en termes de variation relative : l'un peut enregistrer un doublement de fréquentation le week-end, pendant que l'autre ne connaît qu'une simple hausse marginale. Cette approche permet donc d'évaluer la dynamique temporelle, ce qui est utile pour la gestion des flux ou l'adaptation des horaires.

Les jours fériés ayant une occurrence relativement faible sur la période étudiée, ils ont été regroupés avec les week-ends dans cette analyse. Ce choix permet d'éviter une instabilité statistique liée à un trop petit nombre d'observations, tout en conservant une logique d'analyse centrée sur les jours non ouvrables, susceptibles de modifier les comportements de visite.

Les résultats agrégés par activité mettent clairement en évidence une forte disparité (Figure 15). Les chemins de randonnée enregistrent une hausse moyenne de fréquentation de +106 % les week-ends et jours fériés par rapport aux jours de semaine. Cela signifie que la fréquentation y est plus que doublée durant les jours de repos. Les loisirs aquatiques présentent une hausse moyenne de +54,8 %, tandis que les visites culturelles affichent une variation plus modeste, de l'ordre de +41,4 %. Ces tendances confirment les résultats précédents, tout en apportant une mesure de l'intensité de ces écarts.

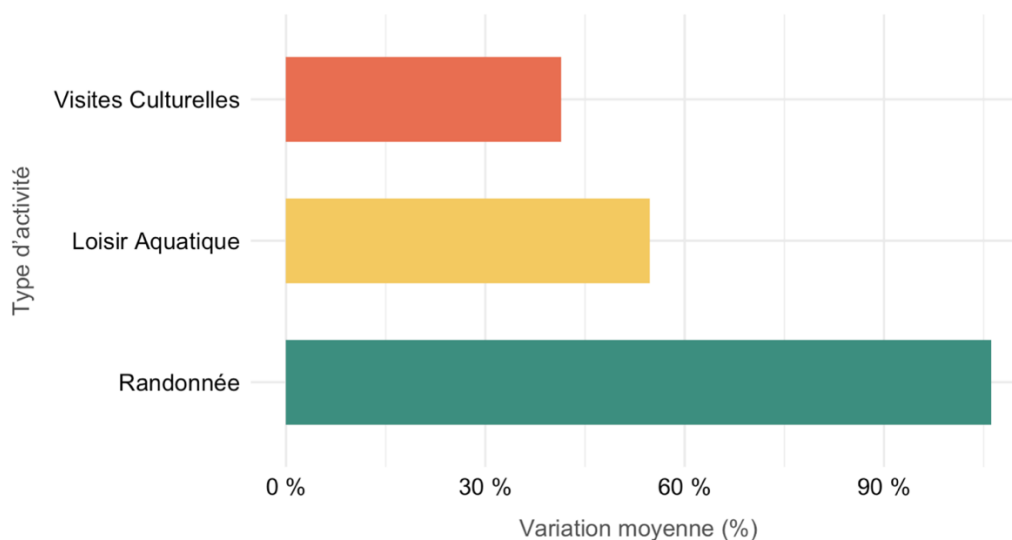


Figure 15. Variation moyenne de fréquentation par activité les week-ends et jours fériés

La figure 16 met en évidence la hiérarchie des variations de fréquentation entre les jours de semaine et les week-ends/fériés à l'échelle des attractions. La randonnée de Vianden affiche une variation remarquable de +216 %, suivie de très près par la randonnée de Burfelt (+184 %) et le site de baignade Baggerweier (+159 %). Les randonnées les plus spectaculaires (Molberlee, Schässbiere, Kautenbach) se situent toutes au-dessus de +100 %, confirmant la forte sensibilité de ces attractions aux week-ends et jours fériés. Les piscines suivent avec des hausses significatives : piscine de Dudelange (+84,9 %), Strassen (+58,3 %) ou Pétange (+53,8 %). À l'inverse, deux attractions affichent une baisse de fréquentation le week-end : la piscine de Bettembourg (-9,9 %) et surtout le Musée de la Mine de Cuivre (-32,5 %). Cela suggère une fréquentation nettement plus concentrée en semaine, possiblement liée à des groupes scolaires ou à des publics organisés, mais également au fait que certains touristes séjournent principalement en semaine et réservent les week-ends à leurs trajets d'arrivée ou de retour. On peut noter ici que la piscine de Bettembourg est une piscine intérieure, tout comme la piscine de Mersch, également située en bas de classement avec une variation modérée de +19,3 %. Ces caractéristiques pourraient limiter leur attractivité lors des week-ends estivaux, où les visiteurs privilégient des espaces de plein air. Il convient également de préciser que le Musée de la Mine de Cuivre ne dispose que de 204 jours de fréquentation enregistrés sur les 366 attendus pour les deux années combinées entre avril et septembre, soit environ 45 % de jours sans données. Cette couverture partielle pourrait influencer les résultats observés et appelle donc à une certaine prudence dans leur interprétation.

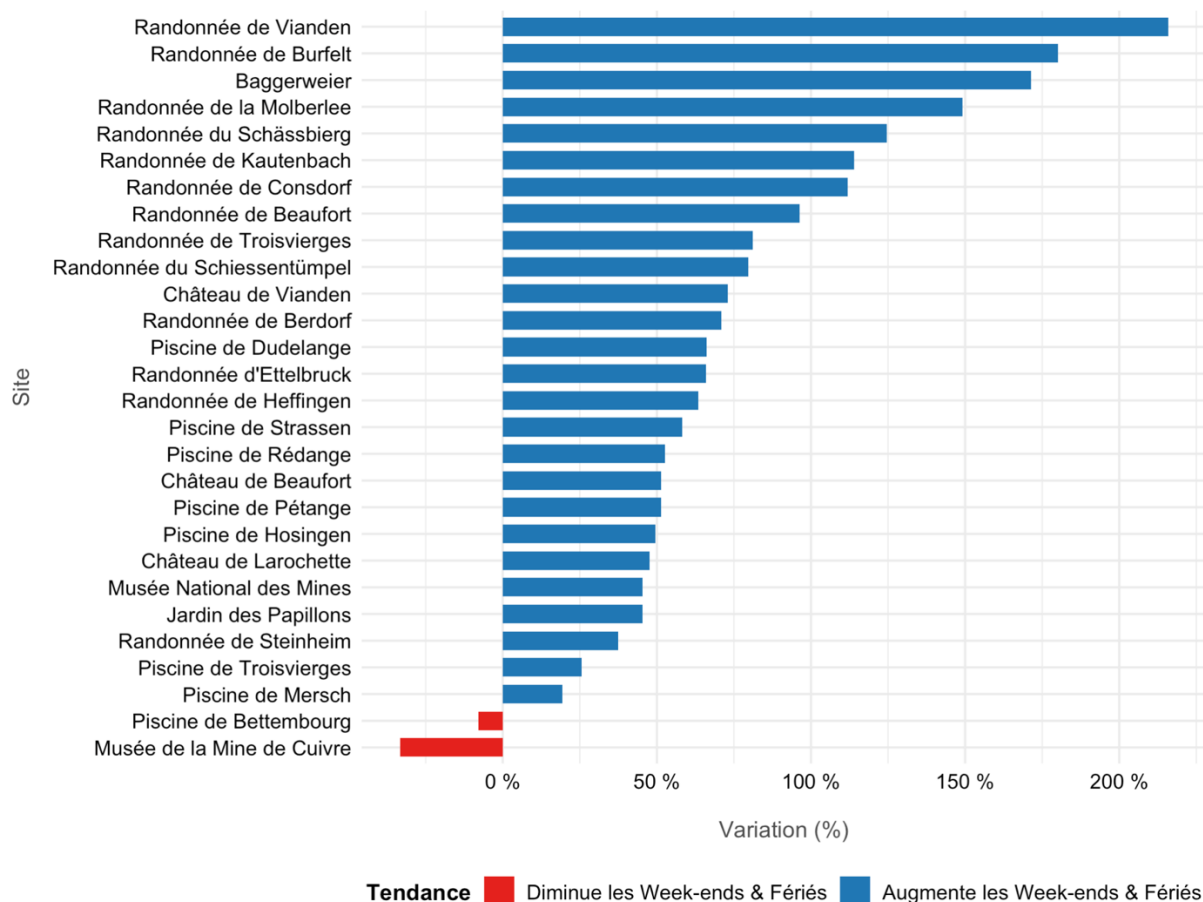


Figure 16. Variation relative de fréquentation par site les week-ends et jours fériés

Ces résultats révèlent que, bien au-delà de la simple répartition, certaines activités présentent de véritables effets de levier durant les week-ends. La randonnée en particulier montre une réactivité très forte au calendrier de temps libre : l'afflux du week-end transforme complètement la dynamique de fréquentation. Les loisirs aquatiques sont également sensibles aux jours de repos, mais de façon plus variable selon les attractions. Quant aux visites culturelles, leur moindre variation pourrait indiquer une fréquentation plus diffuse dans la semaine ou une meilleure régularité des flux. L'analyse différentielle permet ainsi de mettre en lumière la temporalité propre à chaque activité touristique, ce qui est fondamental pour comprendre comment ces dynamiques réagissent ensuite aux conditions climatiques, un point central des analyses à venir.

Il faut cependant souligner que derrière ces tendances globales se cachent des usages différenciés selon les publics : un même site peut être principalement fréquenté par des touristes à certains moments, et par des résidents locaux à d'autres. De plus, la nature même des activités influence cette distinction : un touriste visitera en général

une seule fois un musée ou un château au cours de son séjour, tandis qu'il pourra se rendre plusieurs fois à la piscine si les conditions sont chaudes, ou effectuer plusieurs randonnées sur des itinéraires différents. Dans ce dernier cas, certaines stations de comptage peuvent même enregistrer plusieurs passages d'un même touriste lorsqu'un tronçon commun est partagé par différents sentiers. Le G-D de Luxembourg, en tant que destination souvent intégrée à des itinéraires plus larges ou choisie pour de courts séjours, accueille fréquemment des touristes de passage qui s'arrêtent deux ou trois jours, sans rester une semaine entière. Il est donc tout à fait envisageable que certains visiteurs étrangers viennent spécifiquement le week-end pour randonner, tandis que d'autres lieux, comme certaines piscines intérieures, soient utilisés presque exclusivement par les habitants ou des groupes scolaires en semaine.

Toutefois, ces distinctions restent difficiles à établir à partir des seules données de fréquentation, qui agrègent sans distinction les usages des touristes, des résidents, ou des usagers institutionnels. Cette limite appelle à la prudence dans l'interprétation des comportements, tout en soulignant l'importance de croiser ces analyses temporelles avec d'autres dimensions, comme les effets du climat, qui feront l'objet des chapitres suivants.

5.3. Jours à fréquentation anormale

Le chapitre précédent a permis d'identifier les profils moyens de fréquentation selon le type de jour, en mettant en évidence la place centrale des week-ends et jours fériés pour certaines activités, en particulier la randonnée, et la relative régularité d'autres, comme certaines visites culturelles. Toutefois, cette approche reste centrée sur les rythmes habituels et ne dit rien des fluctuations extrêmes qui peuvent bouleverser ces schémas. Or, les dynamiques touristiques sont aussi marquées par des journées exceptionnelles, qu'il s'agisse de pics de fréquentation ou, à l'inverse, de creux inhabituels souvent liés à des facteurs ponctuels (météo, événements, fermetures, aléas calendaires). L'étude de ces jours anormaux est donc un complément indispensable pour comprendre la sensibilité réelle des activités et des attractions aux variations soudaines. Elle permet notamment de voir si les effets observés en moyenne sont portés par une constance relative ou, au contraire, par une alternance entre périodes creuses et afflux massifs. Ce chapitre s'attache ainsi à mesurer la proportion de jours à fréquentation anormalement haute ou basse, puis à examiner

leur répartition par type de jour et par site, afin de révéler la vulnérabilité ou la capacité d'attraction exceptionnelle des différents segments touristiques.

Pour chaque site, la fréquentation journalière a d'abord été standardisée en calculant la moyenne et l'écart-type sur l'ensemble des jours observés de la période d'étude (avril à septembre, années combinées). À partir de ces valeurs, chaque jour a été associé à un z-score, qui mesure l'écart par rapport à la moyenne du site en nombre d'écarts-types.

Un jour est considéré comme anormalement haut si sa fréquentation dépasse +1 écart-type au-dessus de la moyenne, et comme anormalement bas si elle est inférieure à -1 écart-type. Les jours situés entre ces deux seuils ne sont donc pas considérés comme anormaux.

Une fois identifiés, ces jours anormaux sont comptabilisés pour chaque activité (visites culturelles, loisirs aquatiques, randonnées) et exprimés en proportion du nombre total de jours observés. Les proportions d'anomalies hautes et basses sont ensuite ventilées selon le type de jour (semaine, week-end, jour férié) afin de mettre en évidence la répartition des anomalies dans le calendrier. Cette présentation permet de voir, par exemple, si les pics de fréquentation se concentrent surtout les week-ends ou si les creux apparaissent principalement en semaine.

5.3.1. Proportion de jours à fréquentation anormale

L'ensemble de la période avril-septembre présente une part non négligeable de jours s'écartant fortement des valeurs moyennes des attractions (Figure 17). Sur l'ensemble des activités, les visites culturelles sont celles qui enregistrent la plus forte proportion de jours anormaux (27,1 %), suivies des loisirs aquatiques (23,1 %) et de la randonnée (17,8 %). Cette hiérarchie reflète une sensibilité accrue des attractions culturelles aux variations ponctuelles, possiblement liées à la programmation d'événements, à la fréquentation par groupes organisés ou à des afflux irréguliers de touristes.

En distinguant les anomalies basses et hautes, les visites culturelles présentent 15,5 % de jours anormalement hauts contre 11,6 % de jours anormalement bas. Les loisirs aquatiques affichent un profil comparable (13,6 % hauts, 9,5 % bas), tandis que la randonnée, plus stable, enregistre 11,6 % de jours hauts pour seulement 6,2 % de jours bas.

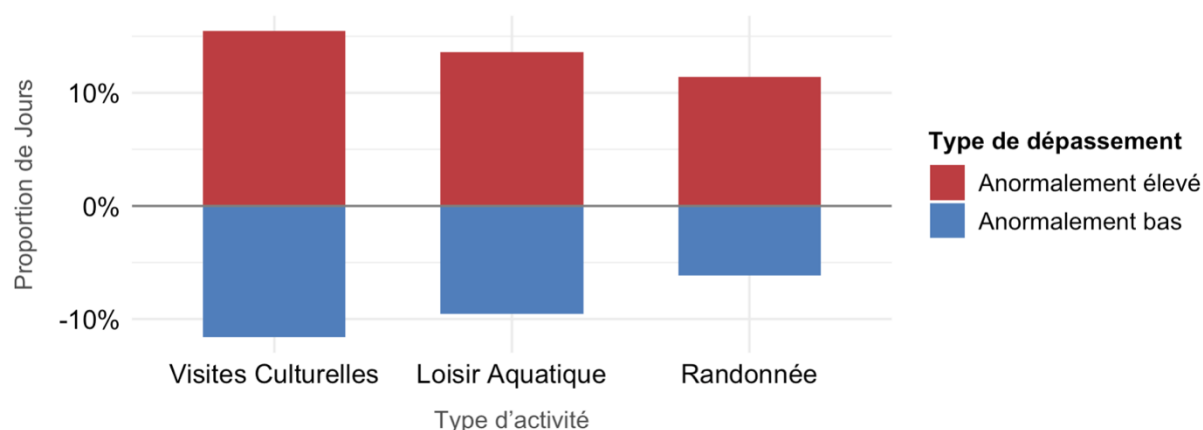


Figure 17. Proportion de jours à fréquentation anormale par activité.

5.3.2. Fréquentation anormalement basse

À l'échelle des activités (Figure 18), la majorité des anomalies basses se produit en semaine : 84,8 % pour les visites culturelles, 93,2 % pour les loisirs aquatiques, et 89,8 % pour la randonnée. Les week-ends et jours fériés concentrent donc relativement peu de journées creuses (moins de 11 % pour toutes les activités). Ce constat renforce l'idée que les jours de repos jouent un rôle de « filet de sécurité » pour la demande. Les creux se concentrent quand le capital temps est le plus contraint, donc en semaine, ce qui cadre avec le chapitre précédent où les week-ends soutiennent la fréquentation, surtout pour la randonnée.

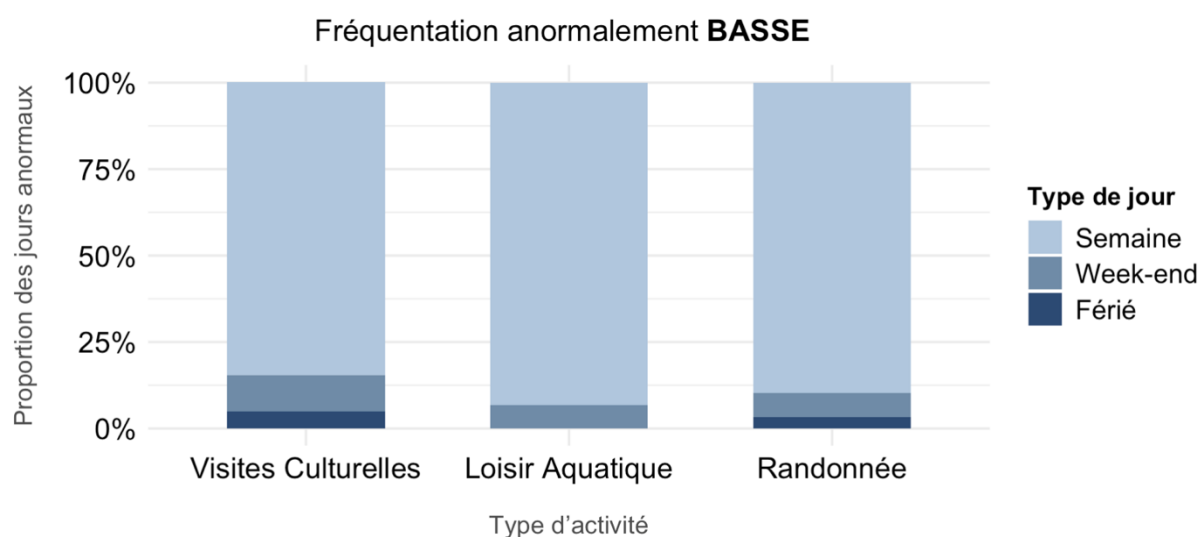


Figure 18. Proportion de jours à fréquentation anormalement basse par activité et par type de jour

La figure 19 représente les résultats par site, où les journées anormalement basses sont inexistantes pour les sentiers de randonnée les plus fréquentés comme Vianden, Burfelt, Kautenbach, Schässbiel. De même, des attractions de loisir aquatique comme le Baggerweier ou certaines piscines (Troisvierges, Dudelange) affichent une absence de creux extrêmes. Les anomalies basses sont en revanche plus fréquentes dans certaines attractions culturelles : Musée de la Mine de Cuivre (17,5 %) ou Château de Larochette (15,9 %). Ces résultats font écho aux tendances observées au chapitre précédent : les piscines intérieures et certains musées, moins dépendants des week-ends, sont plus exposés à des baisses marquées en dehors de leurs périodes d'attrait. Pour rappel, les résultats du Musée de la Mine de Cuivre peuvent être biaisés de par leur manque de données important.

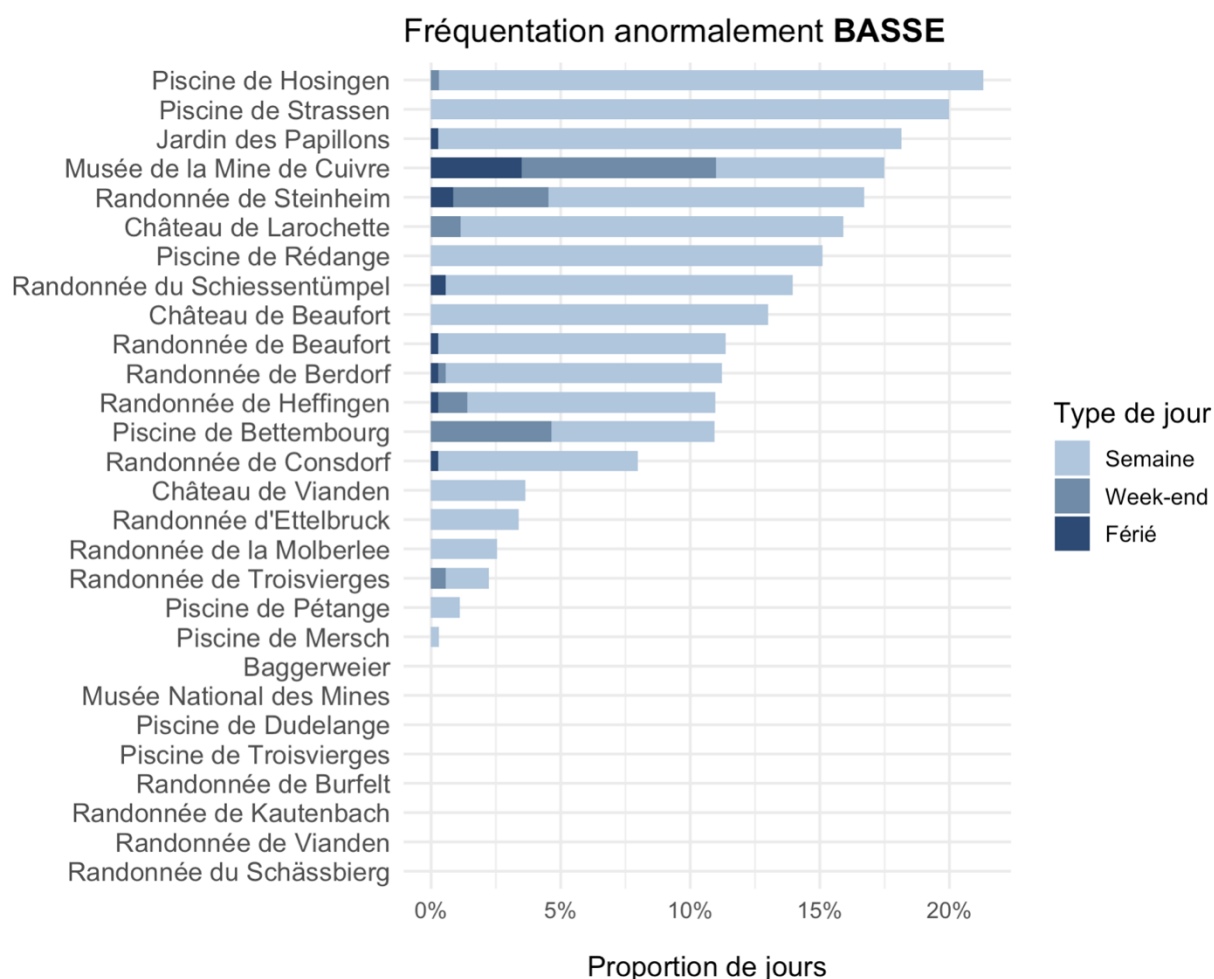


Figure 19. Proportion de jours à fréquentation anormalement basse par attraction et par type de jour

5.3.3. Fréquentation anormalement haute

Les anomalies hautes révèlent un schéma différent (Figure 20). Pour la randonnée, 56,5 % de ces journées exceptionnelles se produisent le week-end, contre 40,4 % pour les visites culturelles et 45,8 % pour les loisirs aquatiques. Les jours fériés jouent un rôle plus marqué pour la randonnée (13,3 %) que pour les autres activités (7,3 % visites culturelles, 2,6 % loisirs aquatiques). Ces chiffres confirment que la randonnée concentre ses pics lors des périodes de temps libre, prolongeant ainsi le profil déjà observé pour la fréquentation moyenne.

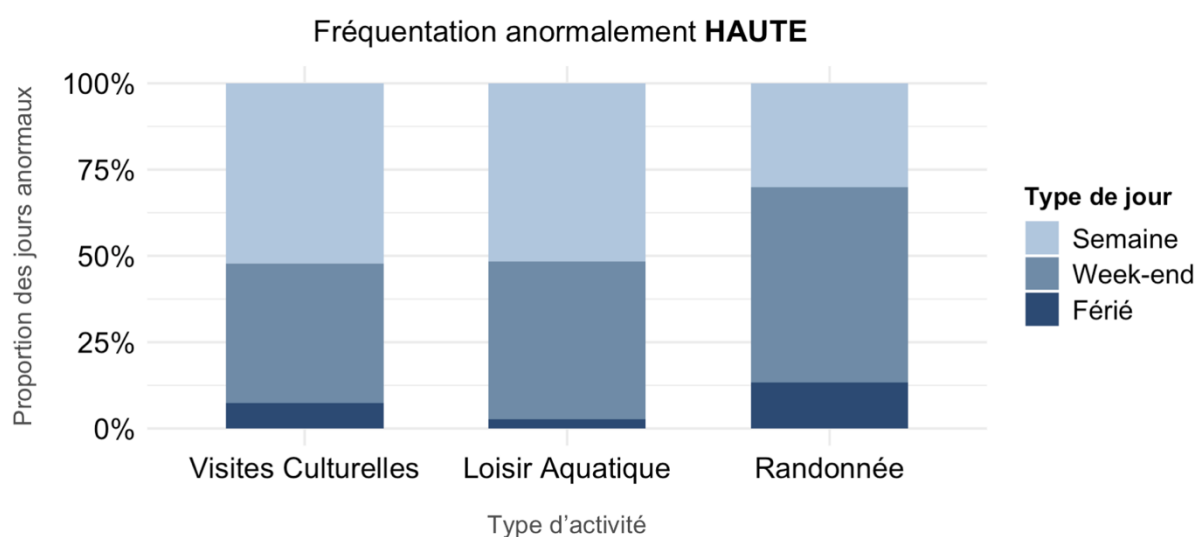


Figure 20. Proportion de jours à fréquentation anormalement haute par activité et par type de jour

À l'échelle des attractions (Figure 21), les plus fortes proportions de jours anormalement hauts sont observées pour des randonnées emblématiques : Consdorf (12,5 % du total, dont 9,4 % le week-end), Burfelt (11,7 %, dont 8,3 % le week-end), Molberlee (11,0 %, dont 7,3 % le week-end). Les loisirs aquatiques en plein air se distinguent également, avec le Baggerweier (11,7 %, dont 7,1 % le week-end) et la piscine de Dudelange (15,3 %, dont 8,5 % le week-end). Du côté culturel, le Château de Vianden (14,0 %) et le Jardin des Papillons (20,4 %) affichent des proportions élevées, réparties entre semaine et week-end. On retrouve ici les mêmes attractions que dans le chapitre précédent pour les plus fortes hausses relatives week-end/semaine, ce qui montre que leurs pics d'affluence ne sont pas seulement liés à une fréquentation moyenne plus élevée les jours de repos, mais qu'elles atteignent aussi régulièrement des niveaux exceptionnels.

Dans l'ensemble, cette analyse des jours anormaux affine les conclusions du chapitre 5.2. : la randonnée apparaît comme l'activité la plus réactive aux week-ends et fériés pour ses pics, mais aussi la plus protégée contre les creux, traduisant une forte attractivité dès que les conditions s'y prêtent. Les loisirs aquatiques et les visites culturelles présentent davantage de jours creux en semaine, mais aussi une capacité à générer des pics ponctuels, notamment lors de conditions météorologiques favorables ou d'événements spéciaux. En croisant ces résultats avec les données climatiques, il sera possible de mieux comprendre le rôle de la météo dans la genèse de ces variations extrêmes, un aspect clé pour anticiper l'impact du changement climatique sur les flux touristiques.

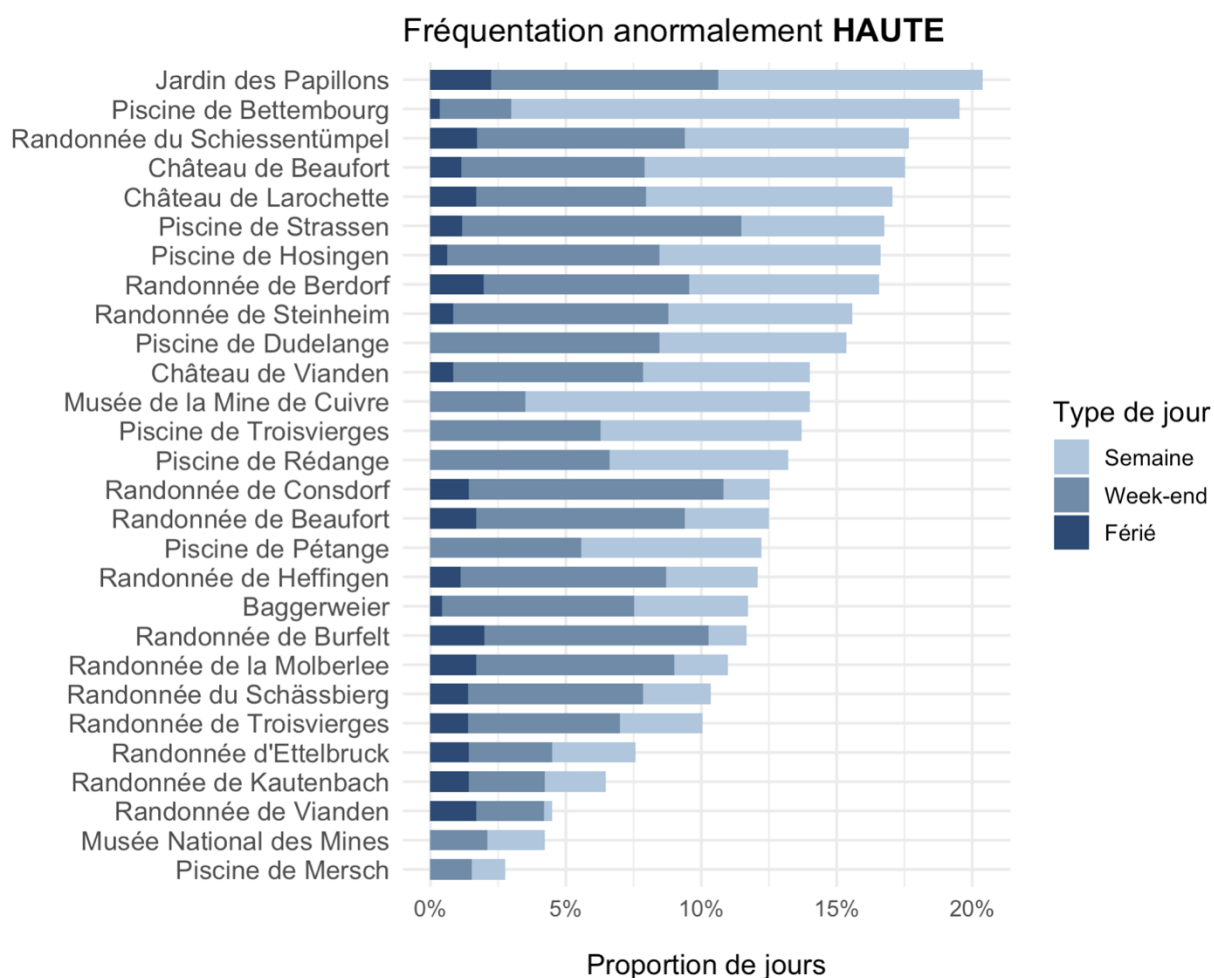


Figure 21. Proportion de jours à fréquentation anormalement haute par attraction et par type de jour

6. Analyse météorologique

6.1. Analyse des vagues de chaleur

Dans notre étude, la détection des vagues de chaleur ne se limite pas à l'identification de séquences de trois jours consécutifs de chaleur extrême. Une attention particulière est également portée aux jours isolés durant lesquels au moins un des seuils de chaleur extrême est franchi, sans nécessairement former une séquence continue. Ces journées sont désignées ici sous le terme de « jours de chaleur », une terminologie choisie pour désigner des épisodes thermiques ponctuels présentant un caractère exceptionnel sans toutefois répondre aux critères d'une vague de chaleur complète. Cette distinction permet d'analyser plus finement l'impact de la chaleur sur la fréquentation touristique, en intégrant également les effets potentiels de journées isolées mais particulièrement chaudes.

Le but de cette étude va être de comparer la fréquentation des attractions touristiques durant ces jours de chaleur, qu'elles fassent partie d'une vague ou non, avec la fréquentation observée lors des jours « normaux », c'est-à-dire ne présentant aucun dépassement des seuils définis. Cela permet de mieux comprendre si les comportements touristiques sont influencés par des températures extrêmes, même lorsqu'elles ne s'inscrivent pas dans une séquence prolongée.

Concernant l'indice Excess Heat Factor (EHF), la littérature recommande classiquement un seuil basé sur le 95e percentile pour définir l'occurrence de chaleur extrême (Nairn *et al.*, 2009). Toutefois, cet indice a été développé dans le contexte australien, où les vagues de chaleur sont plus fréquentes et plus intenses qu'au G-D de Luxembourg. Dans le contexte luxembourgeois, l'application d'un seuil aussi élevé s'est révélée peu opérante : aucune vague de chaleur ni même aucun jour isolé de chaleur n'a pu être détecté en utilisant ce seuil, ce qui suggère une sensibilité mal adaptée au climat local. Pour cette raison, il a été décidé d'abaisser le seuil à 90e percentile, une valeur plus adaptée à la réalité climatique du G-D de Luxembourg. Ce choix méthodologique vise à garantir la détection d'événements significatifs dans un climat tempéré où les extrêmes sont plus modérés mais néanmoins potentiellement importants.

Ainsi, dans le cadre de cette étude, un jour de chaleur est défini comme un jour au cours duquel au moins l'un des trois critères suivants est rempli :

- T_{\max} supérieure au 90e percentile de référence (2005–2025) (TX90)
- T_{\min} supérieure au 90e percentile de référence (2005–2025) (TN90)
- EHF strictement positif (calculé avec un seuil de 90e percentile)

Une vague de chaleur, quant à elle, est identifiée lorsqu'au moins trois jours consécutifs remplissent l'un de ces critères.

6.1.1. Résultats des vagues de chaleur

Pour l'année 2023 (Figure 22), un total de 34 jours de chaleur et 3 vagues de chaleur ont été identifiés.

La première vague est survenue en juin, du 10.06 au 12.06.

La deuxième vague, la plus longue de l'année, s'est déroulée du 16.08 au 22.08, soit 7 jours consécutifs. À cette séquence s'ajoutent les 24.08 et 25.08, identifiés comme jours de chaleur isolés.

La troisième vague s'est produite en septembre, du 07.09 au 12.09.

La figure 22 illustre l'ensemble des jours de chaleur de la période estivale de 2023 en distinguant les niveaux de validation des critères:

- En jaune : jours pour lesquels un seul critère est rempli,
- En orange : jours avec deux critères remplis,
- En rouge : jours avec les trois critères remplis,
- En vert : jours sans aucun critère atteint, considérés comme « jours de référence » ou de conditions normales.

Cette classification visuelle permet de situer temporellement les épisodes de chaleur, d'identifier les pics d'intensité et de les relier aux données de fréquentation touristique dans les analyses ultérieures.

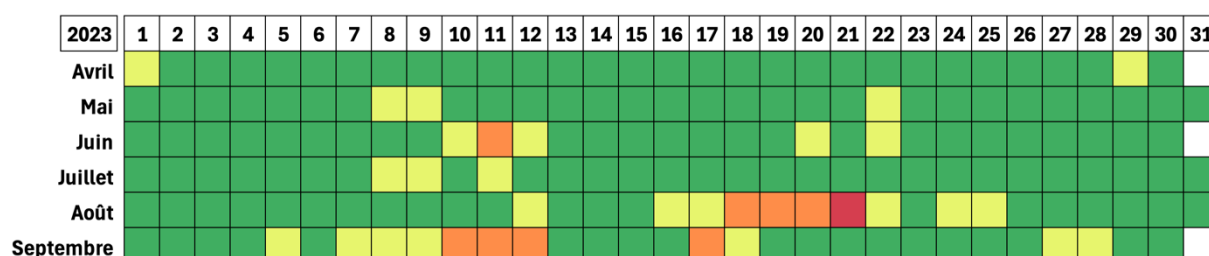


Figure 22. Identification de jours de chaleur en 2023 pour la station d'Ettelbruck, selon le nombres de critères remplis : (1) : Jaune ; (2) : Orange ; (3) : Rouge.

En 2024 (Figure 23), 31 jours de chaleur et 2 vagues de chaleur ont été détectés. La première vague est apparue précocement, dès le printemps, du 05.04 au 08.04. La seconde vague, plus marquée, a eu lieu du 29.08 au 05.09, durant 8 jours consécutifs.

Le mois de juin 2024 ne présente aucun jour de chaleur identifié, ce qui contraste fortement avec l'année précédente.

Enfin, les 12 et 13 août se distinguent particulièrement : le 13 août a été identifié comme jour de chaleur par les trois critères simultanément, et le 12 août selon deux critères. Ces journées représentent des pics thermiques remarquables, bien qu'isolés, qui pourraient avoir eu un impact ponctuel sur les pratiques touristiques.

La figure 23 illustre l'ensemble des jours de chaleur de la période estivale de 2024 avec les mêmes paramètres que la figure 22.

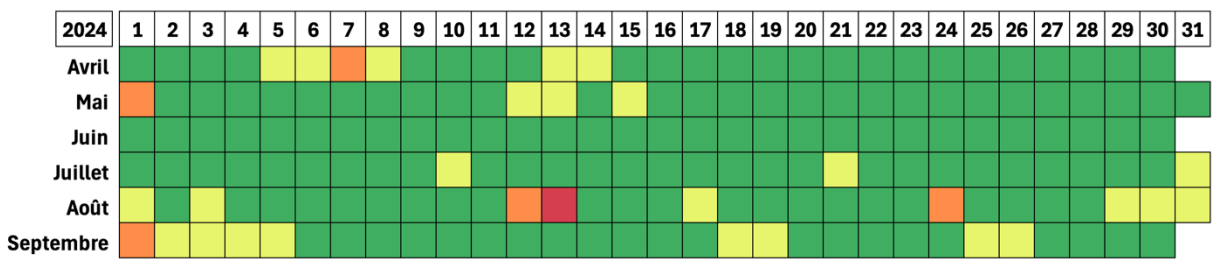


Figure 23. Identification de jours de chaleur en 2024 pour la station d'Ettelbruck, selon le nombres de critères remplis : (1) : Jaune, (2) : Orange et (3) : Rouge.

6.2. Analyse des indices thermiques

6.2.1. Résultats du HCI

L'analyse des indices HCI journaliers sur la période d'étude met en évidence des dynamiques saisonnières marquées et relativement cohérentes entre 2023 et 2024 (Figure 24 pour 2023 ; Figure 25 pour 2024). Sur l'ensemble des deux années, le HCI moyen s'établit à environ 73,6, ce qui correspond à la catégorie *Très bon*. Les deux saisons sont rythmées par l'alternance de longues séquences très favorables, souvent classées *Excellent* ou *Idéal*, et de périodes plus mitigées, marquées par des valeurs *Limite* ou *Inacceptable*. Ces phases basses apparaissent surtout lors des transitions saisonnières, en début de printemps et à l'automne.

En 2023, le mois de juin se démarque nettement par une constance exceptionnelle : presque toutes les journées se situent en *Excellent* ou *Idéal*, avec une séquence remarquable du 5 au 27 juin. Septembre 2023 présente également une remarquable homogénéité, en particulier entre le 2 et le 17, où l'ensemble des journées est classé dans les deux meilleures catégories. Avril 2023 affiche une progression nette entre la première quinzaine, plus variable, et la seconde, dominée par le *Bon* et le *Très bon*. Mai 2023, quant à lui, est ponctué de deux longues phases favorables (13–22 et 24–31 mai).

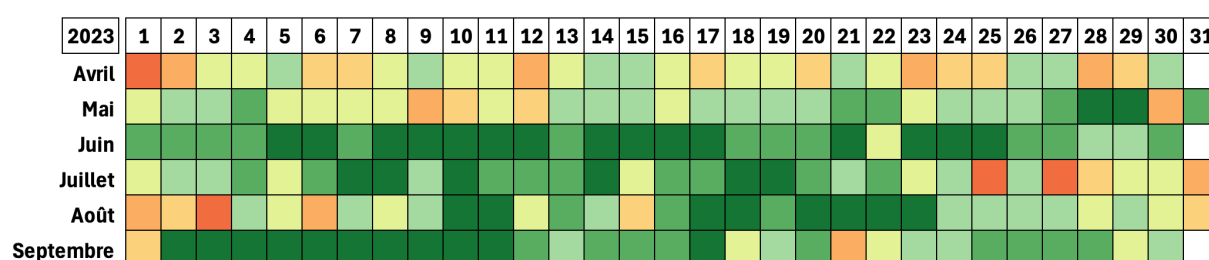


Figure 24. Résultats du HCI pour la période d'étude de 2023 (Légende au Tableau 6)

En 2024, les grandes tendances saisonnières se confirment, mais avec quelques différences notables. Avril se montre plus contrasté que l'année précédente, alternant journées favorables et creux marqués, parfois classés *Inacceptable*. Mai est plus irrégulier qu'en 2023, avec plusieurs journées très défavorables au milieu du mois. Juin 2024 n'atteint le niveau exceptionnel de 2023 qu'en toute fin de mois (24–27 juin). En revanche, août 2024 se distingue par une homogénéité remarquable : dès le 2 août et jusqu'à la fin du mois, la quasi-totalité des journées est classée *Excellent* ou *Idéal*, avec peu d'interruptions. Septembre 2024, en revanche, est moins régulier que celui de 2023, affichant plusieurs valeurs basses dès la première moitié et en fin de mois.

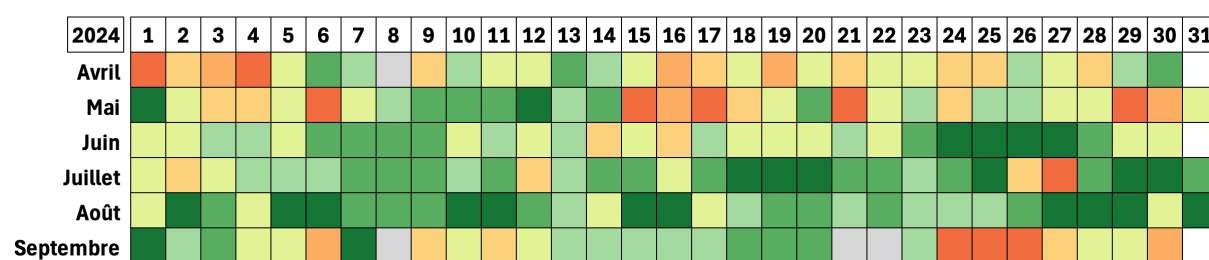


Figure 25. Résultats du HCI pour la période d'étude de 2024 (Légende au Tableau 6)

Les deux années présentent des similitudes marquées : un mois d'avril et un début mai globalement moyen à correct, une succession de journées *excellentes* ou *idéales* de juin à août, ponctuées par quelques interruptions moins propices, ainsi qu'une période très favorable en septembre qui offre la possibilité de derniers pics de fréquentation avant la clôture de la saison estivale.

Cependant, certaines différences sont significatives : 2023 excelle par son mois de juin et son début d'automne, tandis que 2024 compense un printemps moins favorable par un mois d'août exceptionnellement stable et performant.

Ainsi, l'observation croisée des figures 24 et 25 permet de constater que, malgré les variations interannuelles, la structure générale des saisons reste similaire, avec un potentiel touristique maximal concentré sur des fenêtres récurrentes en cœur d'été, mais que la répartition précise des journées les plus favorables varie sensiblement d'une année à l'autre.

7. Analyse des relations fréquentation – météorologie

7.1. Impact des jours de chaleur sur la fréquentation

Les conditions météorologiques influencent fortement les pratiques touristiques, et la chaleur extrême peut agir comme un facteur déclencheur ou inhibiteur selon la nature de l'activité. L'hypothèse de départ de cette analyse est qu'il existe des changements mesurables de fréquentation lors des jours de chaleur identifiés avec des effets différenciés selon les activités et les attractions. On s'attend notamment à ce que les activités extérieures, en particulier les loisirs aquatiques, bénéficient d'un afflux marqué les jours chauds, tandis que certaines activités intérieures ou de plein air moins adaptées à la chaleur puissent voir leur fréquentation diminuer.

7.1.1. Analyse générale

Les résultats globaux confirment l'existence d'une relation, bien que modeste, entre la présence d'un jour de chaleur et la fréquentation. La corrélation de Spearman entre la variable de jour de chaleur et la fréquentation est faible ($\rho = 0,0185$) et non significative au seuil de 5 % ($p = 0,091$), ce qui indique qu'il n'existe pas de relation monotone forte entre les deux variables sur l'ensemble des données. En revanche, la corrélation de Pearson est légèrement plus élevée ($r = 0,0300$) et significative ($p = 0,0063$), ce qui traduit une relation linéaire très faible mais statistiquement détectable. Ces différences s'expliquent par le fait que Pearson capte essentiellement les différences de moyenne entre les jours de chaleur et jours normaux, tandis que Spearman s'intéresse au rang relatif des fréquentations, moins influencé par de petites variations.

En termes de variation moyenne, les jours de chaleur s'accompagnent globalement d'une fréquentation plus élevée pour certaines catégories d'activités, mais cette tendance est loin d'être uniforme. Cela suggère que l'effet de la chaleur est fortement conditionné par le type d'activité et par le site concerné, et que l'indicateur de jour de chaleur ne constitue pas un déterminant universel du comportement des visiteurs. Il faut également tenir compte du fait que certains publics, comme les touristes en vacances ou les groupes encadrés (collectivités, colonies), maintiennent généralement les activités prévues quel que soit le temps, ce qui atténue la sensibilité apparente de leur fréquentation aux conditions météorologiques.

7.1.2. Analyse par activité

Les résultats par activité montrent des contrastes nets (Figure 26). La catégorie d'activité des loisirs aquatiques est la plus sensible aux jours chauds, avec une hausse moyenne de fréquentation de +32,6 %. La corrélation de Spearman ($\rho = 0,0881$; $p < 0,001$) reste modeste mais significative, ce qui traduit un lien positif régulier entre chaleur et hausse de fréquentation. Ce résultat confirme que la chaleur agit comme un facteur d'attraction direct pour les piscines et plans d'eau.

Pour la randonnée, l'effet est très faible (+2,77 %) et la corrélation de Spearman est proche de zéro ($\rho = 0,00827$; $p = 0,575$), donc non significative. La fréquentation ne semble pas influencée de manière notable par la chaleur, ce qui peut refléter un équilibre entre des sorties favorisées par le beau temps et une réduction liée à l'inconfort thermique.

Quant aux visites culturelles, on observe même une légère baisse moyenne (-3,06 %) et une corrélation négative, faible et non significative ($\rho = -0,00791$; $p = 0,767$). Cela suggère que la chaleur ne stimule pas la fréquentation de ce type d'activité et pourrait même légèrement la détourner, les visiteurs privilégiant alors des activités plus rafraîchissantes ou des lieux extérieurs.

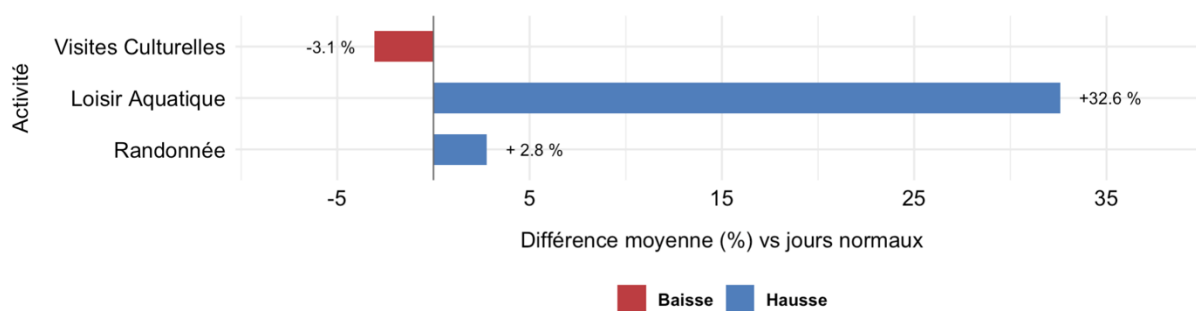


Figure 26. Impact des jours de chaleur sur la fréquentation moyenne par activité.

7.1.3. Analyse par site

L'analyse site par site affine ces observations et met en évidence des disparités importantes (Figure 27). Les attractions les plus réactives aux jours chauds sont la piscine de Troisvierges, la piscine de Dudelange et le Baggerweier, tous trois en extérieur, avec des hausses spectaculaires de fréquentation (+141 %, +116 % et +111 % respectivement) et des corrélations de Spearman parmi les plus élevées

($\rho \approx 0,22$ à $0,29$; $p < 0,001$). Ces résultats confirment le rôle central de la chaleur comme moteur de visite pour les infrastructures aquatiques en plein air.

Les piscines de Mersch, de Rédange et de Strassen, qui sont couvertes ou mixtes (Rédange), connaissent quant à elles des hausses plus modérées mais néanmoins nettes (+33,8 %, +31,3 % et +27,6 % respectivement), avec des corrélations positives et significatives, ce qui confirme la tendance générale observée pour le loisir aquatique.

Les randonnées de Vianden et de Steinheim connaissent des hausses plus modérées (+32,5 % et +22,6 %) et des corrélations positives significatives uniquement pour Steinheim. Ces cas illustrent que certaines randonnées peuvent tirer parti de journées chaudes, probablement en lien avec des parcours ombragés ou proches de l'eau.

On a également des attractions à effet négatif marqué comme le Musée National des Mines (-23,1 %), la randonnée de Kautenbach (-19,8 %) ou la randonnée de la Molberlee (-10,2 %) qui montrent que la chaleur peut décourager les touristes, soit en raison d'un inconfort extérieur trop important, soit parce que le profil de l'attraction n'incite pas à des sorties lors de conditions thermiques extrêmes.

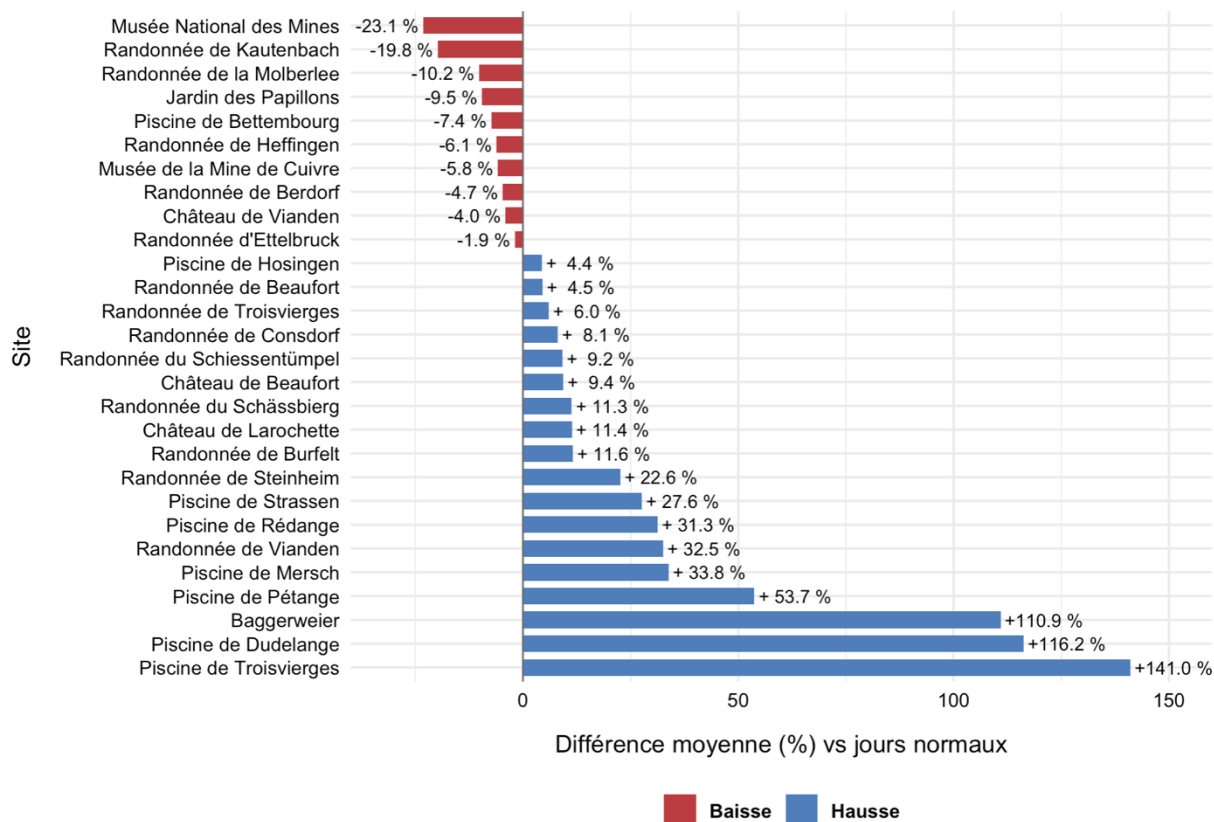


Figure 27. Impact des jours de chaleur sur la fréquentation moyenne par attraction.

7.1.4. Conclusion

Les résultats confirment partiellement l'hypothèse initiale : les jours de chaleur influencent bien la fréquentation, mais de manière très hétérogène selon l'activité et l'attraction. Les loisirs aquatiques sont clairement favorisés, avec des hausses importantes et régulières, tandis que la randonnée n'enregistre qu'un effet faible et les visites culturelles tendent même à reculer. Cette variabilité est cohérente avec les préférences comportementales attendues face à la chaleur : recherche d'eau et de fraîcheur, évitement d'efforts prolongés en milieu chaud ou d'espaces clos peu ventilés et non climatisés.

Cependant, la faiblesse des corrélations globales et l'absence de relation significative pour de nombreuses catégories indiquent que l'indicateur « Jour de chaleur », pris seul, n'explique qu'une petite part de la variabilité de la fréquentation. Il peut donc être considéré comme un indicateur pertinent pour certaines activités spécifiques (loisir aquatique notamment), mais non robuste pour décrire l'ensemble des comportements touristiques. Une analyse plus fine pourrait intégrer d'autres variables météorologiques (température exacte, humidité, rayonnement), notamment à travers l'indicateur HCI et des variables contextuelles (week-end, vacances scolaires) pour améliorer la compréhension de ces dynamiques.

7.2. Lien entre HCI et fréquentation touristique

L'analyse de l'effet du HCI (Holiday Climate Index) sur la fréquentation est menée à l'aide d'une approche en z-score plutôt qu'en volumes absolus. Cette méthode consiste à exprimer la fréquentation d'une attraction, pour chaque jour, en écarts-types par rapport à sa moyenne habituelle. Un z-score de 0 correspond à la moyenne de l'attraction, +1 à un jour dont la fréquentation est un écart-type au-dessus, et -1 à un jour un écart-type en dessous.

Cette standardisation présente plusieurs avantages majeurs dans le contexte de ce mémoire. Elle neutralise complètement la taille des attractions : un petit musée et une grande piscine sont ramenés sur la même échelle, ce qui permet de comparer leur comportement sans que les différences de volume ne dominent les résultats. Elle exprime les variations en termes relatifs, mettant ainsi en évidence les jours « au-dessus » ou « en dessous » de la normale pour chaque attraction, indépendamment des chiffres bruts. Enfin, elle accentue les variations climatiques : si les jours de

catégorie *Idéal* ou *Excellent* se traduisent par des z-scores moyens nettement supérieurs à zéro, cela indique clairement que la fréquentation a tendance à dépasser la moyenne habituelle dans ces conditions.

La principale limite de cette méthode est qu'elle ne permet pas de parler en nombre de visiteurs. Un z-score de +1 peut représenter 50 visiteurs supplémentaires pour une petite attraction, mais plusieurs centaines pour une grande attraction. Il faut donc rappeler au lecteur ce que signifie cette unité statistique. Dans ce mémoire, l'objectif étant d'évaluer la sensibilité relative de la fréquentation aux conditions climatiques, le z-score est particulièrement adapté.

7.2.1. Résultats globaux

À l'échelle de l'ensemble des attractions et des jours, la corrélation de Spearman entre le score HCI et le z-score de fréquentation est positive et hautement significative ($p = 0,249$; $p = 7,66 \times 10^{-117}$). Cela traduit une tendance nette : plus le HCI est favorable, plus la fréquentation dépasse fréquemment la moyenne habituelle des attractions.

Le test de Kruskal–Wallis confirme ces résultats avec une p-value extrêmement faible ($p = 2,51 \times 10^{-110}$), indiquant que la distribution des z-scores diffère significativement entre les catégories de HCI. En clair, la probabilité que ces différences soient dues au hasard est quasi nulle.

L'examen des z-scores moyens par catégorie de HCI met en évidence une progression régulière : de -0,40 en *Inacceptable* à +0,25 en *Idéal*. Autrement dit, dans les conditions les plus favorables, la fréquentation se situe en moyenne un quart d'écart-type au-dessus de la normale, alors qu'elle est nettement inférieure dans les conditions défavorables. Les intervalles de confiance à 95 %, qui représentent la plage de valeurs dans laquelle on estime que la véritable moyenne a 95 % de chance de se situer, permettent d'évaluer la précision des estimations et de vérifier le recouvrement entre catégories. Ici, ces intervalles se chevauchent très peu entre les extrêmes, ce qui renforce la certitude statistique que les niveaux de fréquentation diffèrent réellement d'une catégorie HCI à l'autre (Figure 28).

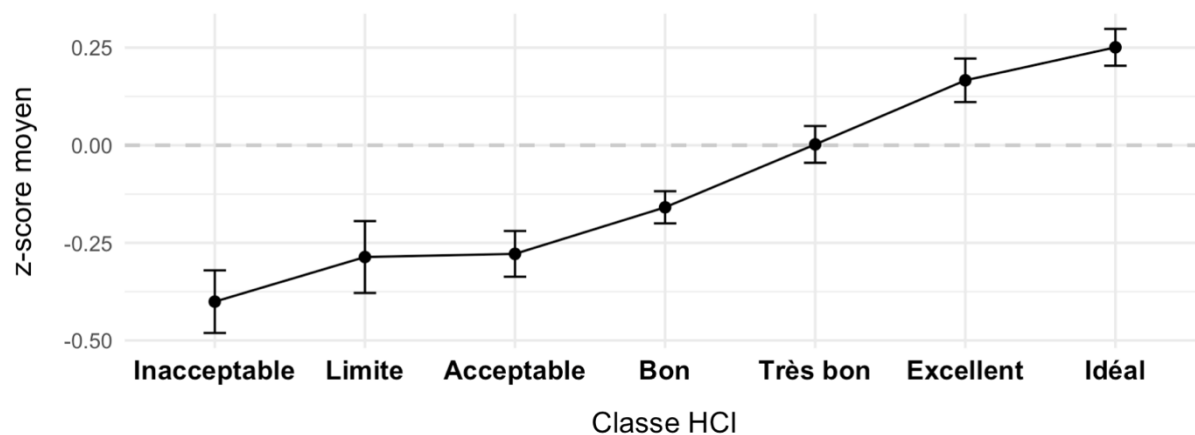


Figure 28. IC95% des fréquentations standardisées (z-scores) par classe HCI

Les statistiques de type boxplot en figure 29 confirment la tendance : la médiane passe de -0,61 en *Inacceptable* à +0,06 en *Idéal*, avec une dispersion relativement constante mais des valeurs maximales plus élevées dans les catégories favorables (jusqu'à +15,87). Ces extrêmes témoignent de journées où certaines attractions connaissent des pics exceptionnels de fréquentation dans de bonnes conditions climatiques.

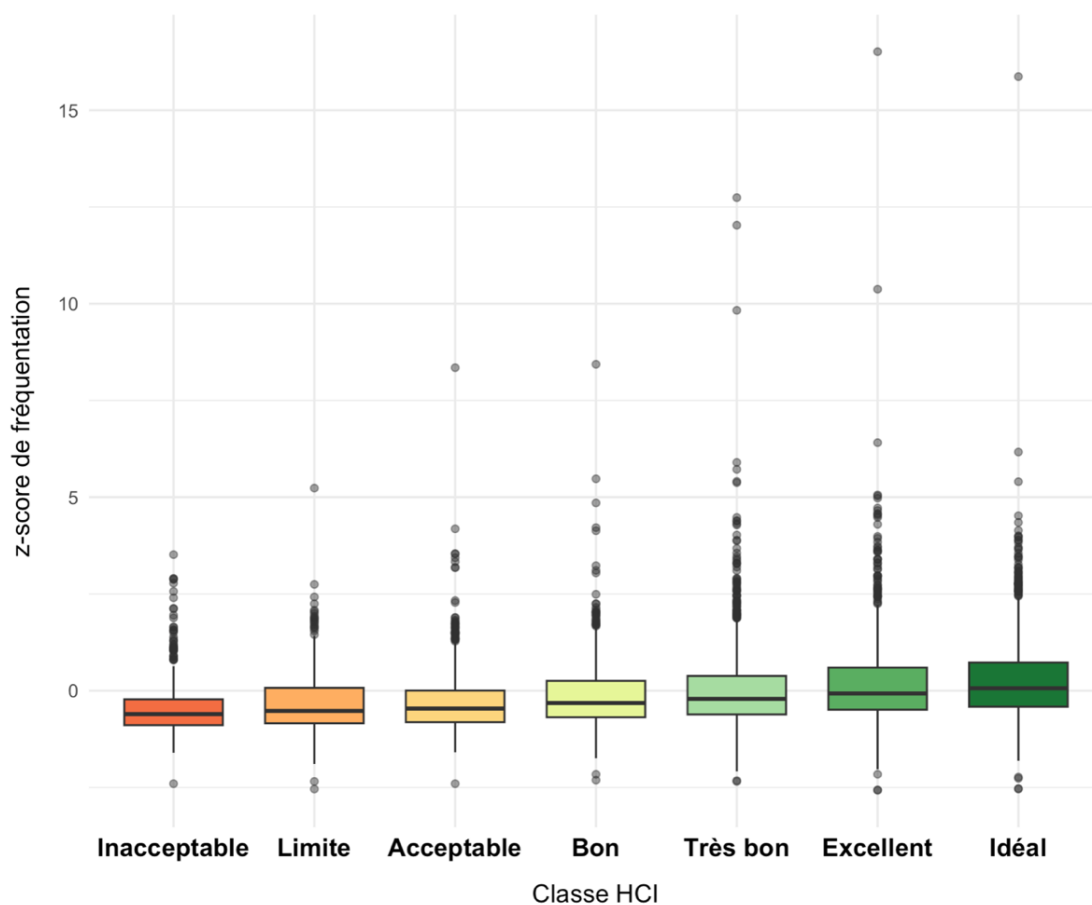


Figure 29. Fréquentations standardisées (z-scores) par classe HCI

7.2.2. Résultats par activité

Les corrélations de Spearman calculées séparément par activité révèlent des sensibilités différenciées : $\rho = 0,15$ pour les Visites culturelles, $\rho = 0,18$ pour le Loisir aquatique et $\rho = 0,33$ pour la Randonnée. Ainsi, les activités de plein air, et surtout la randonnée, réagissent davantage aux variations climatiques que les visites culturelles, souvent moins dépendantes des conditions extérieures.

L'analyse des z-scores moyens par activité et par catégorie HCI, accompagnée des intervalles de confiance à 95 % (Figure 30), permet d'évaluer à la fois l'ampleur et la fiabilité des différences observées.

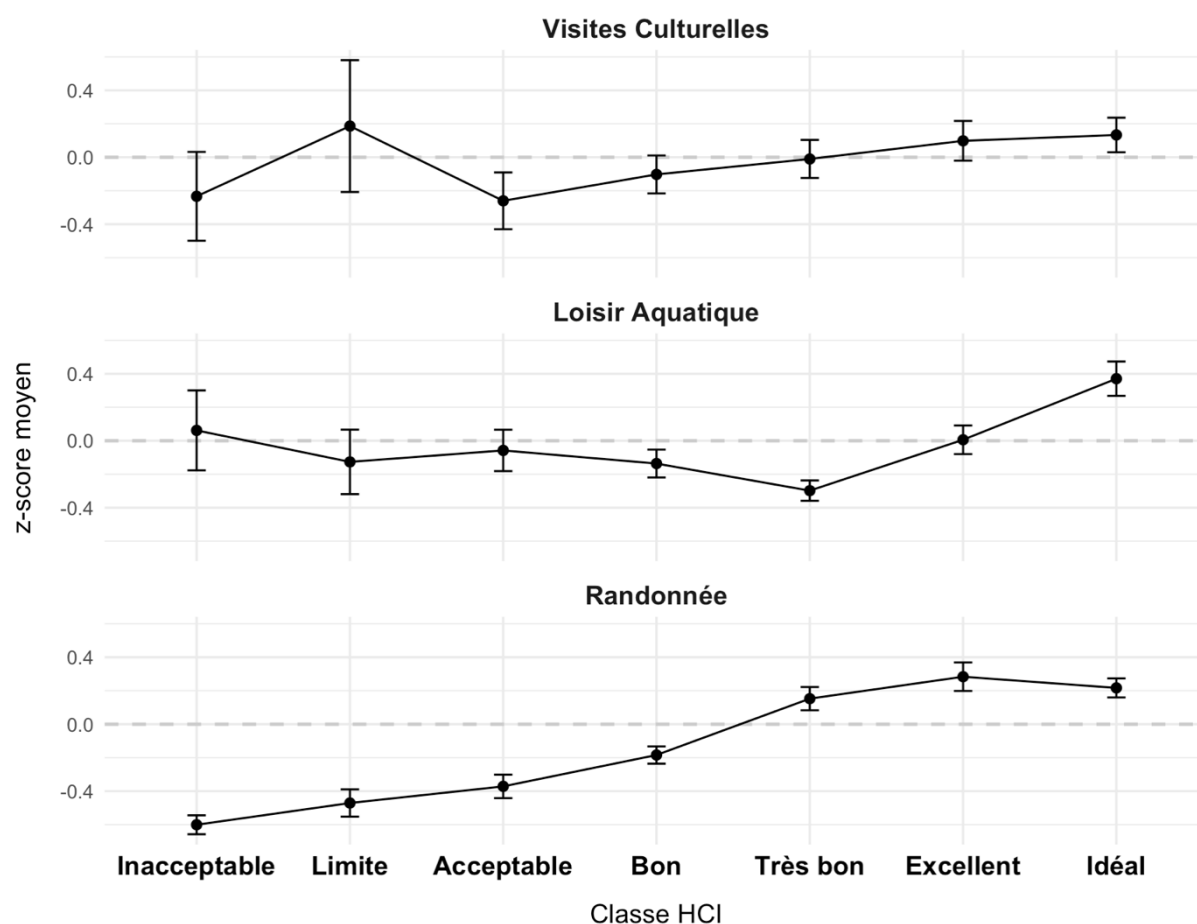


Figure 30. IC95% des fréquentations standardisées (z-scores) par classe HCI et activité

Pour les visites culturelles, la moyenne passe de -0,23 en *Inacceptable* à +0,13 en *Idéal*. Dans la catégorie *Inacceptable*, l'intervalle de confiance est assez large et englobe la valeur zéro, ce qui signifie que la fréquentation pourrait ne pas différer significativement de la moyenne habituelle d l'attraction. En revanche, en *Idéal*,

l'intervalle se situe entièrement au-dessus de zéro, ce qui suggère une hausse réelle de la fréquentation par rapport à la normale. Entre ces deux extrêmes, les valeurs restent proches de zéro et les intervalles sont parfois larges (comme en *Limite*), traduisant une incertitude plus forte sur l'effet du climat. Globalement, l'évolution est positive mais modérée, et l'impact du climat reste secondaire face à d'autres déterminants comme la programmation culturelle ou le calendrier scolaire.

Pour le loisir aquatique, les z-scores progressent de 0,06 en *Inacceptable* à 0,37 en *Idéal*. Dans les HCI défavorables, les intervalles de confiance englobent zéro, indiquant que la fréquentation peut être similaire à la moyenne habituelle. Mais dès que les conditions deviennent favorables (*Excellent* et *Idéal*), les intervalles sont nettement au-dessus de zéro, ce qui traduit un effet positif clair et statistiquement fiable. Ces résultats confirment que le loisir aquatique profite nettement des bonnes conditions météorologiques, avec des journées souvent bien plus fréquentées que la normale.

Pour la randonnée, l'évolution est la plus marquée : -0,60 en *Inacceptable* à +0,22 en *Idéal*. Dans les HCI les plus bas, les intervalles de confiance sont entièrement négatifs, montrant une baisse nette et significative de fréquentation par rapport à la moyenne habituelle. À l'inverse, les catégories les plus favorables présentent des intervalles entièrement positifs, confirmant une augmentation robuste de la fréquentation. Cela reflète une dépendance directe de la randonnée aux conditions climatiques : mauvaise météo = fréquentation en dessous de la moyenne, bonne météo = fréquentation au-dessus.

En conclusion, l'approche par z-score met en évidence de manière claire et robuste que des conditions climatiques plus favorables (HCI élevé) sont associées à des fréquentations supérieures à la moyenne normale des attractions, particulièrement pour les activités de plein air comme la randonnée et le loisir aquatique. En effet, la randonnée affiche la réponse la plus nette, suivie du loisir aquatique, alors que les visites culturelles montrent un effet plus atténué et statistiquement moins marqué.

Pour compléter cette lecture statistique et la rendre plus concrète, la part de la fréquentation totale observée par attraction dans chaque classe HCI a également été examinée (Figure 31). Cet indicateur ne mesure pas uniquement le nombre de jours appartenant à chaque catégorie HCI, mais pondère ces jours par le volume réel de fréquentation qu'ils représentent. Ainsi, une attraction peut avoir relativement peu de

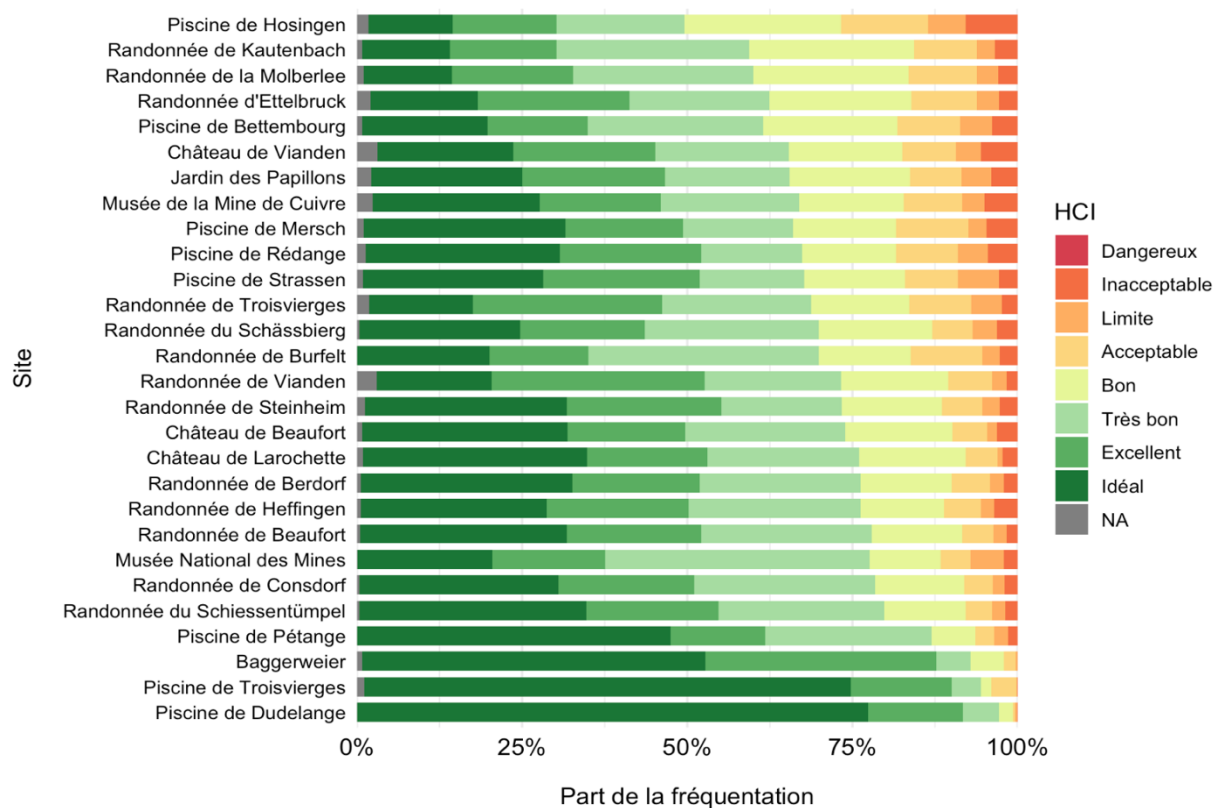
journées classées *Idéal* mais concentrer l'essentiel de sa fréquentation sur celles-ci, ou au contraire accueillir un flux régulier même lors de conditions moins favorables. Cette analyse visuelle met en lumière les stratégies d'ouverture, la saisonnalité effective et la sensibilité à la météo propres à chaque attraction. Elle montre par exemple que certaines attractions obtiennent d'excellents scores HCI tout en n'étant ouvertes qu'une partie de la saison. La piscine de Dudelange arrive en tête avec 77,4 % des journées classées *Idéal*, mais ne compte que 99 jours d'ouverture en 2023 et 107 en 2024, alors que la période étudiée (01 avril – 30 septembre) s'étend sur 183 jours. Elle n'ouvre qu'à la fin du mois de mai (27.05 en 2023, 25.05 en 2024) et ferme dès début septembre (03.09 en 2023, 09.09 en 2024). La piscine de Troisvierges occupe la deuxième place avec 73,6 % de journées *Idéal*, mais son ouverture est encore plus restreinte : 112 jours en 2023 et seulement 68 en 2024. Cette dernière adapte fortement son calendrier aux conditions météorologiques, n'ouvrant au grand public que lorsque la météo est favorable, tout en restant disponible en permanence pour les campeurs du site. Les données de fréquentation des visiteurs du camping ne sont pas disponibles car les campeurs ont libre accès et ne sont donc pas « comptés » à l'entrée de la piscine. À l'inverse, la piscine de Dudelange, une fois ouverte, maintient ses activités jusqu'à la fin de sa saison, même lors de journées moins favorables selon le HCI. Dans ce cas, la fréquentation baisse simplement les jours moins adaptés, tandis que les journées *Idéal* connaissent une affluence très élevée.

Le Baggerweier se classe troisième avec 51,8 % de journées *Idéal* et 35 % *Excellent*. Sa politique d'ouverture, calquée sur celle de Dudelange, limite également la saison à environ deux tiers de la période étudiée (120 jours en 2023, 122 en 2024).

En dehors de ces attractions à ouverture restreinte, les meilleurs scores HCI sur l'ensemble de la période sont observés pour les chemins de randonnée. Six d'entre eux affichent plus de 50 % de journées fréquentées classées *Idéal* ou *Excellent* combinés.

À l'opposé, les trois attractions présentant les proportions les plus élevées de fréquentation lors de journées *Acceptable*, *Limite* ou *Inacceptable* sont des piscines couvertes. La piscine de Hosingen se distingue particulièrement, avec 26,7 % de sa fréquentation sur ces trois catégories combinées. Ouverte toute la saison sauf la première quinzaine de septembre, elle constitue une option privilégiée pour les visiteurs par mauvais temps, grâce à ses équipements intérieurs. Elle dispose également d'un bassin extérieur naturel, activé uniquement lors des journées chaudes,

mais cet atout saisonnier ne modifie pas son positionnement principal : celui d'une infrastructure couverte et attractive en conditions météorologiques défavorables.



Pour prolonger l'analyse par z-score, les journées à fréquentation « anormale » sont isolées au sens statistique. Pour rappel, un jour anormalement « haut » correspond à un z-score de fréquentation $\geq +1$ (au moins un écart-type au-dessus de la moyenne de l'attraction), tandis qu'un jour anormalement « bas » correspond à ≤ -1 . L'objectif est double : identifier dans quelles classes HCI (de *Dangereux* à *Idéal*) ces extrêmes surviennent, et mesurer quelle place ils prennent au niveau des attractions.

À l'échelle de l'ensemble des jours et des attractions, les corrélations confirment l'hypothèse attendue mais avec une amplitude modérée : plus le HCI est favorable, plus la probabilité d'un jour « haut » augmente légèrement ($\rho = 0,127$; $p = 5,58 \times 10^{-31}$; $n = 8\,228$), et plus le HCI est défavorable, plus la probabilité d'un jour « bas » augmente légèrement ($\rho = -0,124$; $p = 1,34 \times 10^{-29}$; $n = 8\,228$). La signification statistique est très forte, mais l'ampleur des effets rappelle que le climat n'est qu'un des moteurs des extrêmes, aux côtés de facteurs calendaires, de l'offre, de la concurrence, de contraintes de capacité, etc.

Pour comprendre la structure d'ensemble par attraction, une analyse en composantes principales (PCA) est utilisée. Concrètement, pour chaque attraction la proportion de jours « hauts » (ou « bas ») est calculée dans chaque classe HCI, et un vecteur « *Poids de fréquentation* » est ajouté, qui indique la part de la période d'étude portée par ces jours anormaux. Autrement dit, il s'agit d'une proportion (entre 0 et 1, lisible en %) qui mesure l'importance réelle des jours à fréquentation anormale d'une attraction : non pas leur nombre, mais la part de la fréquentation totale qu'ils concentrent. Deux variantes sont utilisées selon le type d'extrême :

$$\text{Poids de fréquentation « hauts »} = \frac{\sum \text{fréquentations des jours « hauts » de l'attraction}}{\sum \text{fréquentations de tous les jours de l'attraction}}$$

$$\text{Poids de fréquentation « bas »} = \frac{\sum \text{fréquentations des jours « bas » de l'attraction}}{\sum \text{fréquentations de tous les jours de l'attraction}}$$

Concrètement, si une attraction cumule 50 000 visites sur la saison, dont 15 000 pendant ses jours « hauts », alors *Poids* (hauts) = 15 000/50 000 = 0,30, soit 30 % de l'année « portée » par ces journées. Ce poids complète l'information sur la météo car une attraction peut avoir peu de jours « hauts », mais très lourds en volume (poids élevé), ou au contraire beaucoup de jours « hauts » peu fréquentés (poids faible). Dans la PCA, la flèche « *Poids de fréquentation* » sert à voir avec quelles classes HCI ce poids varie :

- flèches proches → association positive (les jours anormaux qui « comptent » surviennent souvent sous ces classes) ;
- flèches opposées → association négative ;
- flèches perpendiculaires → relation faible sur le plan.

À noter que l'orientation absolue du plan est conventionnelle ; ce sont les angles entre flèches qui importent.

La PCA résume les variables en deux axes principaux (notés Dim1 et Dim2) : ce sont des « combinaisons » de variables qui captent le maximum de variabilité entre attractions. Sur le graphique, chaque flèche correspond à une variable ; la longueur reflète la qualité de représentation sur le plan (\cos^2), et surtout l'angle traduit

l'association : deux flèches proches indiquent des variables qui augmentent ensemble, opposées indiquent une association négative, perpendiculaires indiquent une relation faible sur ce plan. Seuls les deux premiers axes sont tracés parce qu'ils expliquent l'essentiel de la variance ; les dimensions suivantes existent mais n'apportent que des nuances supplémentaires non représentées.

Dans le cas des jours anormalement bas (Figure 32), les deux premiers axes expliquent 84,4 % de la variance (61,2 % pour le premier, 23,3 % pour le second). Le premier axe concentre l'information avec de fortes contributions des classes *Bon*, *Très bon* et *Acceptable*, ainsi que du *Poids de fréquentation* ; autrement dit, il ordonne les attractions selon l'importance de « bas » qui surviennent dans des conditions météorologiques correctes plutôt que franchement défavorables. Le second axe met en tension *Idéal* et *Excellent* d'un côté et *Limite* de l'autre. Surtout, on observe que les flèches *Très bon*, *Excellent* et *Idéal* pointent dans la même direction que *Poids de fréquentation*, alors que *Limite*, *Inacceptable* et *Acceptable* leur sont plutôt perpendiculaires. Cette géométrie signifie que, dans les attractions où les « bas » pèsent beaucoup dans l'année, ces creux surviennent fréquemment malgré une météo acceptable à favorable : l'explication est donc à chercher hors climat (calendrier, offre, concurrence, organisation, etc.). À l'inverse, les classes franchement défavorables génèrent certes des « bas », mais elles n'expliquent pas où ces « bas » pèsent le plus d'une attraction à l'autre : leur quasi-orthogonalité au *Poids de fréquentation* indique une faible corrélation avec ce poids sur le plan factoriel.

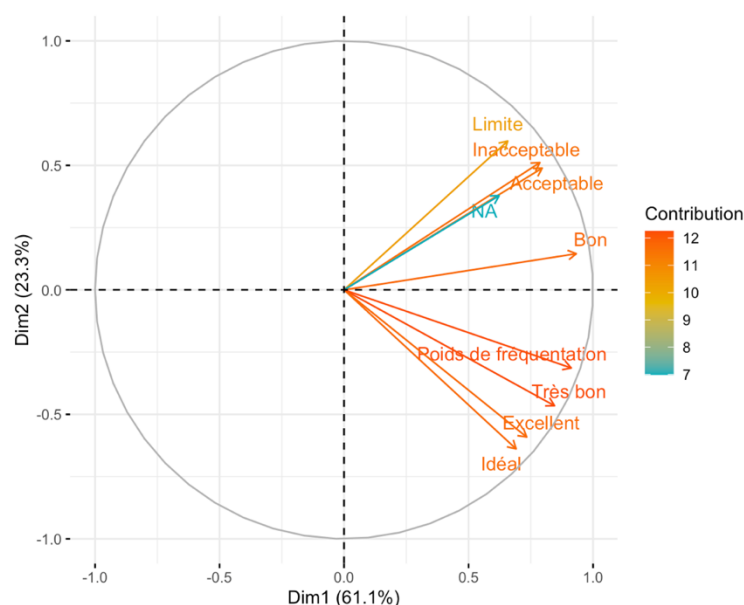


Figure 32. PCA des jours de fréquentation anormalement basse : classes HCl et *Poids de fréquentation*

Dans le cas des jours anormalement élevés (Figure 33), les deux premiers axes expliquent 61,2 % de la variance (42,8 % et 18,4 %). Le premier axe est dominé par *Limite*, *Inacceptable* et *Acceptable* et distingue donc les attractions où des « hauts » apparaissent sous conditions médiocres de ceux qui concentrent leurs « hauts » ailleurs. Le second axe associe très nettement *Idéal* et *Poids de fréquentation* : plus une attraction a une fréquentation anormalement élevée sur ses journées « hautes », plus ces pics se produisent quand le HCI est optimal. Là encore, les classes médiocres sont plutôt perpendiculaires à cette association : elles expliquent peu la variabilité du poids des « hauts » entre attractions. On notera que des nuances supplémentaires entre *Très bon* et *Excellent* existent sur un troisième axe, non représenté sur la figure car l'essentiel est déjà expliqué par les deux premiers.

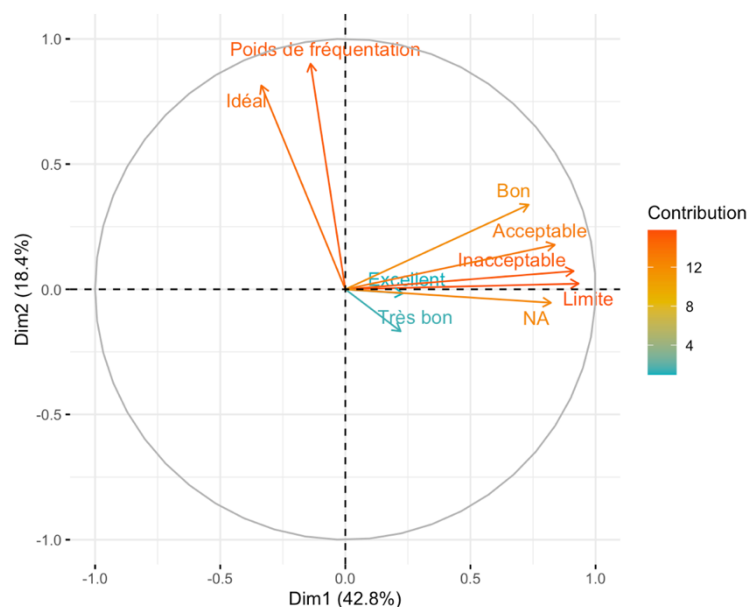


Figure 33. PCA des jours de fréquentation anormalement haute : classes HCI et *Poids de fréquentation*

Ces lectures globales se retrouvent par attraction dans les répartitions pondérées par la fréquentation. En commençant par les jours anormalement bas (Figure 34), les itinéraires de randonnée concentrent souvent leurs creux sous *Acceptable* et *Bon*, ce qui cadre avec l'idée qu'une météo moyenne réduit la fréquentation (par ex. Schiessentümpel et Consdorf). Certaines attractions indoor ou mi-couvertes enregistrent aussi des « bas » malgré des HCI favorables (*Très bon*, *Idéal*) comme les piscines de Bettembourg, Pétange, Hosingen et Rédange, signe de déterminants non

climatiques existants pour ces fréquentations. À l'inverse, d'autres cas sont clairement météo-sensibles : la randonnée de la Molberlee concentre la majorité de ses « bas » en *Inacceptable* (~69 %), et la piscine couverte de Mersch ne connaît des « bas » qu'en *Inacceptable* (100 %), ce qui illustre des creux alignés sur des conditions franchement défavorables. À noter que certains chemins de randonnée ou de piscine ouvertes à des dates précises ne connaissent pas de jours à fréquentation anormalement basse.

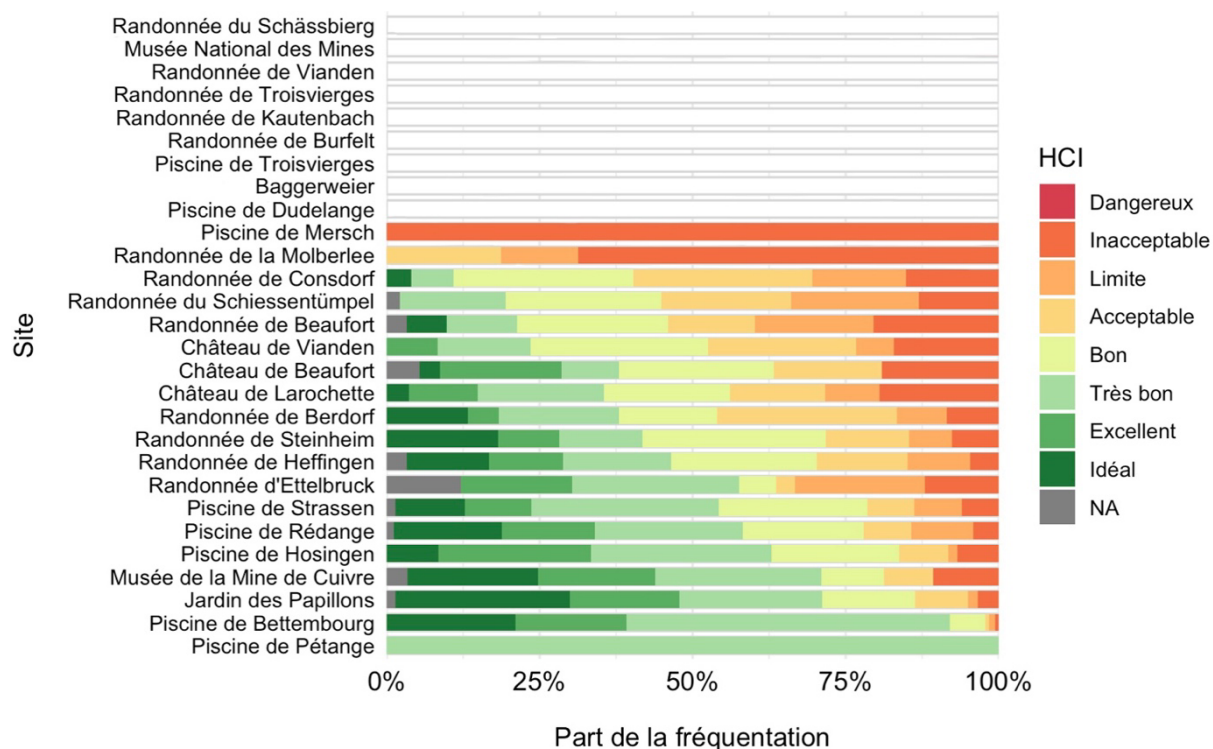


Figure 34. Répartition Jours à fréquentation anormalement basse par classe HCI et par attraction.

À l'inverse, pour les jours anormalement élevés (Figure 35), plusieurs piscines extérieures et grands itinéraires concentrent leurs pics sous *Idéal*, ce qui illustre la co-direction entre *Idéal* et *Poids de fréquentation* observée en PCA (p. ex. Dudelange, Troisvierges, Pétange côté piscines ; Schiessentümpel et Berdorf côté randonnées). La piscine de Troisvierges, située à proximité immédiate d'un camping, s'inscrit dans ce schéma ; toutefois, ce voisinage n'explique pas les résultats observés, car la piscine est en plein air et les campeurs disposent d'un libre accès qui n'est pas comptabilisé dans les données. Quant à la piscine de Mersch (*Idéal* ~65 %), le fait qu'un équipement couvert enregistre de tels résultats peut sembler contre-intuitif, mais cela pourrait

s'expliquer par la présence d'un camping situé juste à côté. Les campeurs, en recherche d'activités aquatiques pour se rafraîchir lors de journées idéales, peuvent ainsi contribuer à une fréquentation accrue, même si la piscine est couverte. Quelques attractions présentent des « hauts » davantage sous *Excellent* que sous *Idéal* (randonnée de Vianden, Musée National des Mines), tandis que, du côté culturel, certains lieux montent même quand le HCI est médiocre (Jardin de Papillons, Château de Vianden, Musée de la Mine de Cuivre).

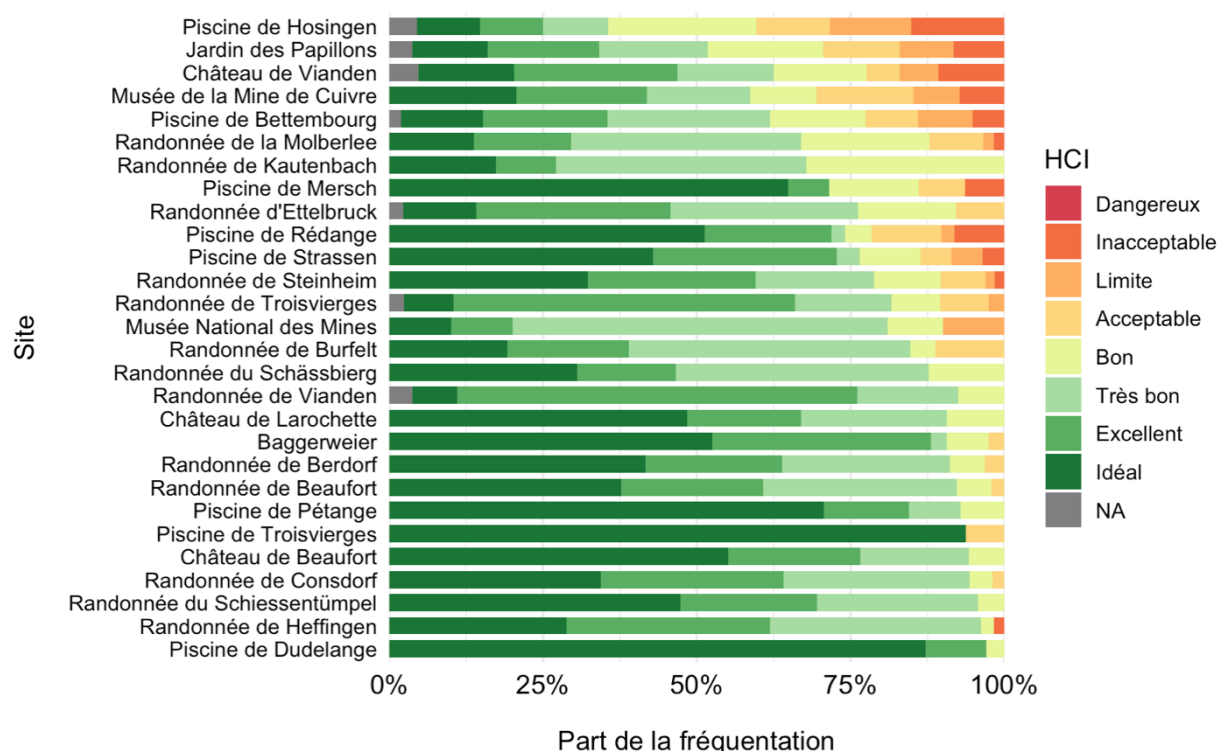


Figure 35. Répartition Jours à fréquentation anormalement élevée par classe HCI et par attraction.

En résumé, les corrélations indiquent clairement le sens (HCI favorable → davantage de jours « hauts » ; HCI défavorable → davantage de « bas »), mais avec une ampleur modérée, tandis que les PCA montrent comment cela s'organise entre attractions. Lorsque les « bas » pèsent lourd dans la saison d'une attraction, ils surviennent souvent malgré une météo correcte ou bonne : il faut donc mobiliser des leviers non climatiques (programmation, tarification, capacité, marketing local, etc.) précisément sur ces périodes. À l'inverse, lorsque les « hauts » structurent la saison, ils coïncident surtout avec des fenêtres *Idéal*, ce qui plaide pour un ciblage calendaire des actions lorsque la prévision HCI bascule vers *Très bon* ou *Idéal*. Deux points de méthode

complètent ce tableau : d'une part, quelques valeurs HCI manquantes (NA) contribuent encore à la variance et gagneraient à être traitées ; d'autre part, la PCA décrit des co-variations et ne tranche pas la causalité.

Au total, le HCI donne le tempo des extrêmes : il favorise les pics et réduit les creux, avec un effet plus marqué pour les activités de plein air. Les attractions qui savent capitaliser sur les fenêtres *Très bon* à *Idéal* transforment plus souvent les bonnes journées en succès et amortissent mieux les périodes faibles lorsque ces fenêtres se raréfient. Les figures 32 et 33 expliquent la mécanique générale, tandis que les figures 34 et 35 montrent comment elle se manifeste concrètement d'une attraction à l'autre.

7.3. Analyse RADAR

L'analyse RADAR a pour objectif de représenter simultanément plusieurs dimensions d'un même phénomène sur un graphique unique, de manière à visualiser rapidement le profil relatif de différentes attractions. Dans le cadre de cette étude, six indices synthétiques ont été construits pour décrire, pour chaque attraction touristique, des aspects complémentaires de sa fréquentation : variabilité interne, influence du calendrier, sensibilité à la chaleur, sensibilité à la pluie, effet des conditions climatiques idéales et résilience face au mauvais temps. Cette approche permet de condenser des phénomènes complexes et multidimensionnels en mesures standardisées, comparables entre elles et entre attractions, facilitant ainsi l'identification des points forts et des points faibles relatifs. La forme et l'extension du polygone tracé pour chaque attraction traduisent son profil global, tandis que la comparaison visuelle entre polygones met en évidence les différences et similitudes entre attractions touristiques.

7.3.1. Normalisation commune des indices

Pour que ces six mesures puissent être lues et interprétées sur un pied d'égalité, chaque indice brut est transformé sur une échelle commune allant de -10 à +10 grâce à une méthode robuste aux valeurs extrêmes. Cette normalisation repose sur la comparaison entre attractions : la valeur centrale de référence n'est pas la médiane des données propres à une attraction, mais la médiane calculée sur l'ensemble des attractions pour un indice donné. Ce choix garantit que chaque attraction est évaluée par rapport à la tendance centrale du groupe étudié, et non uniquement par rapport à sa propre variabilité. Une valeur finale de 0 indique donc que l'attraction se situe exactement dans la valeur centrale observée pour toutes les attractions sur cet indice. Les valeurs positives reflètent une performance supérieure à la tendance générale, tandis que les valeurs négatives traduisent une performance inférieure. Ce positionnement relatif permet d'effectuer une comparaison directe et cohérente entre attractions, ce qui n'aurait pas été possible avec une normalisation interne à chaque attraction.

7.3.2. Indice Variabilité & Extrêmes

Le premier indice combine deux dimensions complémentaires. La première est la variabilité relative de la fréquentation, mesurée par le coefficient de variation qui calcule le rapport entre l'écart-type de fréquentation (σ_F) et la moyenne (\bar{F}).

$$\text{Coefficient de Variation} = \frac{\sigma_F}{\bar{F}}$$

Un coefficient élevé signifie que la fréquentation de l'attraction fluctue beaucoup au cours de la saison, tandis qu'un coefficient faible traduit une fréquentation plus régulière.

La seconde dimension porte sur la répartition de la fréquentation anormale entre journées « hautes » et « basses », donc l'asymétrie entre les jours extrêmes, définie par un écart d'au moins un écart-type par rapport à la moyenne de l'attraction.

$$\text{Asymétrie} = \frac{\sum F_{\text{jours « hauts »}} - \sum F_{\text{jours « bas »}}}{\sum F_{\text{totale}}}$$

On mesure ici si le volume annuel est surtout porté par des journées de forte affluence ou s'il est pénalisé par de nombreux creux.

Les deux composantes sont ensuite normalisées séparément, puis moyennées. Ce choix d'une pondération égale ne vise pas à prédire un comportement mais à fournir un indicateur synthétique équilibré, intégrant à la fois l'ampleur des variations et l'importance relative des journées extrêmes.

7.3.3. Indice Week-end / Férié

Cet indice évalue l'effet du calendrier en comparant la fréquentation moyenne (\bar{F}) observée les week-ends et jours fériés à celle des jours de semaine, en rapportant cet écart à la variabilité globale de l'attraction.

$$\text{Indice Week-end/Férié} = \frac{\bar{F}_{\text{Week-end/Férié}} - \bar{F}_{\text{Semaine}}}{\sigma_F}$$

Un score élevé traduit un net surcroît de fréquentation lors des jours non ouvrés, signe d'une forte attractivité auprès d'un public disponible sur ces créneaux (touristes de

loisirs, résidents en sortie de week-end). Un score négatif indique une fréquentation plus importante en semaine, ce qui peut correspondre à des attractions liées à des activités scolaires, professionnelles ou à des visites organisées en semaine. La normalisation permet de comparer directement l'ampleur de cet effet entre attractions, indépendamment de leur niveau absolu de fréquentation.

7.3.4. Indice Effet Chaleur

L'effet chaleur mesure la relation entre la température maximale quotidienne (T_{\max}) et la fréquentation, après avoir exprimé ces deux variables de manière standardisée au sein de chaque attraction.

$$\text{Fréquentation} = a + b \times T_{\max}$$

La pente de cette relation traduit la sensibilité de l'attraction aux journées chaudes : une valeur positive indique que la fréquentation augmente avec la chaleur, une valeur négative qu'elle diminue. Ce choix de travailler sur des données standardisées permet de neutraliser les différences structurelles entre attractions (par exemple, des moyennes climatiques différentes) et de se concentrer sur la tendance relative. La normalisation entre les différentes attractions permet ensuite d'identifier celles qui réagissent le plus fortement, de manière positive ou négative, aux variations de chaleur.

7.3.5 Indice Résilience à la pluie

Pour évaluer l'effet des précipitations (P), la relation entre la fréquentation et la quantité de pluie quotidienne est analysée après avoir transformé cette dernière par un logarithme. Cette transformation permet de réduire l'influence disproportionnée des très fortes pluies et de mieux mettre en évidence l'impact des petites et moyennes précipitations, souvent plus fréquentes et significatives dans le comportement des visiteurs.

$$\text{Fréquentation} = a + c \times \log(1 + P)$$

La pente obtenue est inversée pour que les valeurs positives correspondent à une bonne résilience (faible baisse de fréquentation en cas de pluie), tandis que les valeurs négatives indiquent une forte sensibilité aux épisodes pluvieux. Là encore, la normalisation rend les comparaisons entre attractions immédiates.

7.3.6. Indice Beau Temps HCI

Cet indice compare la fréquentation moyenne des journées classées « *Idéal* » et « *Excellent* » ($\bar{F}_{\text{« Idéal » \& « Excellent »}}$) selon l’HCI à la fréquentation moyenne annuelle de l’attraction ($\bar{F}_{\text{Annuelle}}$). Il mesure le gain relatif associé à des conditions climatiques idéales.

$$\text{Indice Beau Temps HCI} = \frac{\bar{F}_{\text{« Idéal » \& « Excellent »}}}{\bar{F}_{\text{Annuelle}}}$$

Un score positif signifie que l’attraction bénéficie particulièrement de ces journées favorables, ce qui est fréquent pour des activités de plein air. Un score proche de zéro indique que la fréquentation reste stable quelle que soit la météo, tandis qu’un score négatif suggère que les très belles journées ne se traduisent pas par une hausse, voire s’accompagnent d’une baisse de fréquentation (par exemple si le public cible préfère d’autres types d’activités lors de ces conditions).

7.3.7. Indice Mauvais temps HCI

Symétrique du précédent, cet indice évalue la résistance de l’attraction aux journées classées au plus « *Acceptable* » selon l’HCI, soit « *Acceptable* », « *Limite* », « *Inacceptable* » et « *Dangereux* ». À noter que suivant les résultats obtenus précédemment, la classe « *Dangereux* » ne se manifeste pas dans notre échantillon. Cet indice mesure donc la variation relative de fréquentation entre ces jours défavorables et la moyenne annuelle.

$$\text{Indice Mauvais Temps HCI} = \frac{\bar{F}_{\text{« Acceptable », « Limite » \& « Inacceptable »}}}{\bar{F}_{\text{Annuelle}}}$$

Un score positif indique que l’attraction maintient une fréquentation satisfaisante même dans de mauvaises conditions météorologiques, un score négatif signale une forte dépendance à la météo favorable.

7.3.8. Grille de lecture du graphique RADAR

Sur le graphique RADAR (modèle en figure 36), chaque axe correspond à l’un de ces six indices normalisés. La ligne axiale centrale du RADAR (valeur 0), représentée en rouge sur la figure 36, correspond à la tendance centrale de l’ensemble des attractions étudiées pour l’indice considéré. Plus le polygone associé à une attraction s’étend vers

l'extérieur sur un axe, plus cette attraction obtient un score supérieur à la moyenne générale pour cette dimension. Inversement, un retrait vers le centre ou vers l'intérieur traduit un score inférieur à la moyenne. La comparaison visuelle entre polygones permet ainsi d'identifier rapidement les points forts (axes où l'attraction dépasse nettement les autres) et les points faibles (axes où il est en retrait), offrant une vue d'ensemble des performances relatives sur l'ensemble des dimensions considérées.

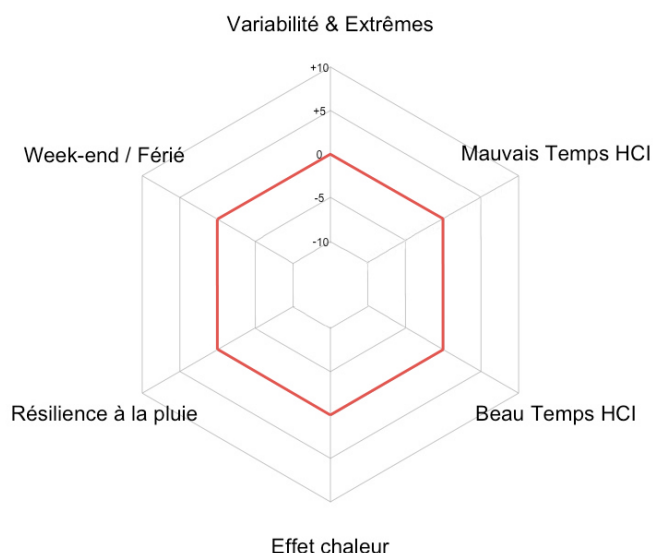


Figure 36. RADAR Modèle, avec en rouge la tendance centrale

7.3.9. Résultats RADAR

L'analyse des résultats des différents indices du RADAR met en évidence plusieurs regroupements d'attractions présentant des profils similaires, tant dans leurs forces que dans leurs faiblesses.

Des attractions qui ont un profil RADAR similaire sont notamment les piscines ou points d'eau extérieurs les plus fréquentés en été, comme le Baggerweier, la piscine de Dudelange et la piscine de Troisvierges (Figure 37). Ils peuvent former un groupe qui se caractérise par des valeurs très élevées sur l'indice combiné global, une forte sensibilité au calendrier (week-ends et jours fériés) et des scores nettement positifs pour la chaleur, traduisant un effet amplificateur lors des journées chaudes et estivales. En revanche, ces attractions affichent une résilience aux conditions défavorables nettement plus faible, signe que leur attractivité chute rapidement dès que la météo se dégrade. Elles incarnent un modèle très saisonnier et météo-dépendant, où les pics de fréquentation sont directement liés aux conditions idéales.

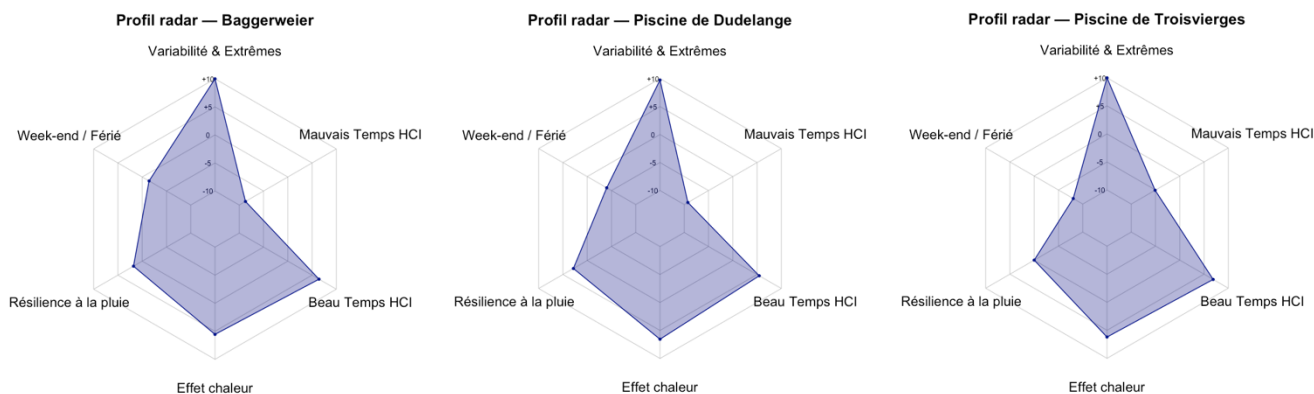


Figure 37. RADAR du Baggerweier & des piscines de Dudelange et de Troisvierges

Certains établissements couverts présentent un profil RADAR différent de celui des attractions extérieures, telles que le Jardin des Papillons, la piscine de Hosingen et la piscine de Mersch (Figure 38). Ce groupe à profil similaire se caractérise par des scores modérés ou négatifs sur les indices liés au calendrier et à la chaleur, mais par des valeurs positives en résilience face aux conditions défavorables du HCI. Pourtant, ce qui est étonnant ici, c'est que la résilience face à la pluie apparaît très négative, en contraste avec les attractions en plein air précédemment évoquées, qui se montrent généralement plus résistantes aux précipitations que ces attractions couvertes. Cela suggère que, contrairement à l'intuition, les établissements couverts ne parviennent pas nécessairement à attirer davantage de visiteurs lors de journées pluvieuses, probablement en raison de la nature même de leur offre (par exemple un public plus local ou une attractivité moins différenciée), ce qui limite leur rôle de refuge climatique.

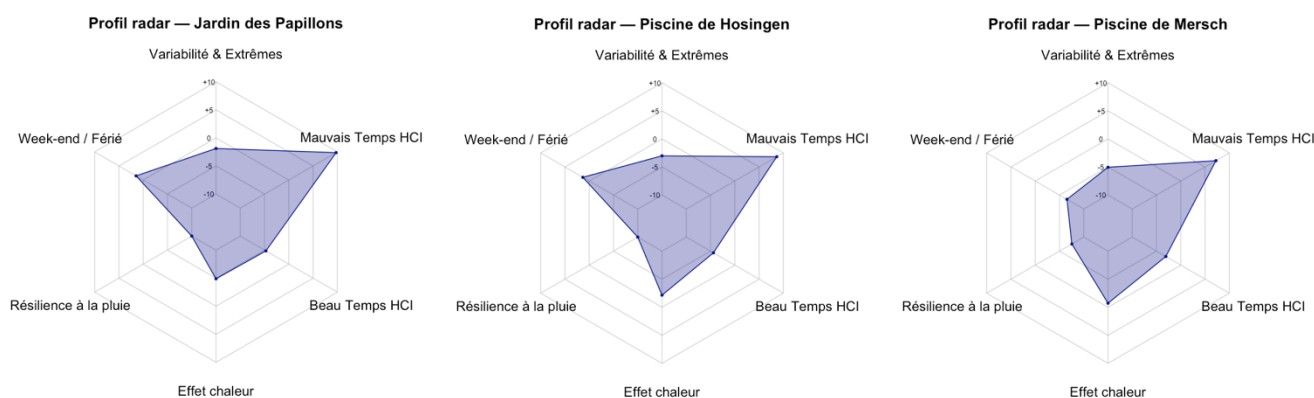


Figure 38. RADAR du Jardin des Papillons & des piscines de Hosingen et de Mersch

Comme le groupe précédent, les piscines de Rédange et de Strassen, ainsi que le Château de Vianden (Figure 39) affichent des scores modérés sur les indices liés au calendrier et des performances correctes en résilience aux conditions défavorables, mais se distinguent par un indice effet de chaleur plus élevé et parviennent donc davantage à capitaliser sur les journées chaudes. La piscine de Strassen se singularise par un effet week-end et jours fériés plus marqué. Le Château de Vianden, quant à lui, se démarque par une variabilité interne plus importante, signe que sa fréquentation connaît de fortes fluctuations d'un jour à l'autre, sans doute en fonction de facteurs ponctuels tels que des événements culturels, des visites guidées ou l'afflux de groupes organisés. La piscine de Rédange adopte un profil plus équilibré, sans excès marqué dans un indice particulier, mais avec une capacité notable à mieux performer lors des journées chaudes. Cette particularité peut s'expliquer par sa configuration mixte, qui combine un bassin intérieur et un bassin extérieur. En cas de mauvais temps, l'espace couvert assure une continuité de l'activité, tandis que par temps chaud, l'espace extérieur devient un atout. Ce double fonctionnement joue ainsi un rôle de « tampon » face aux aléas climatiques, permettant à l'attraction de maintenir une fréquentation régulière tout en profitant pleinement des conditions favorables.

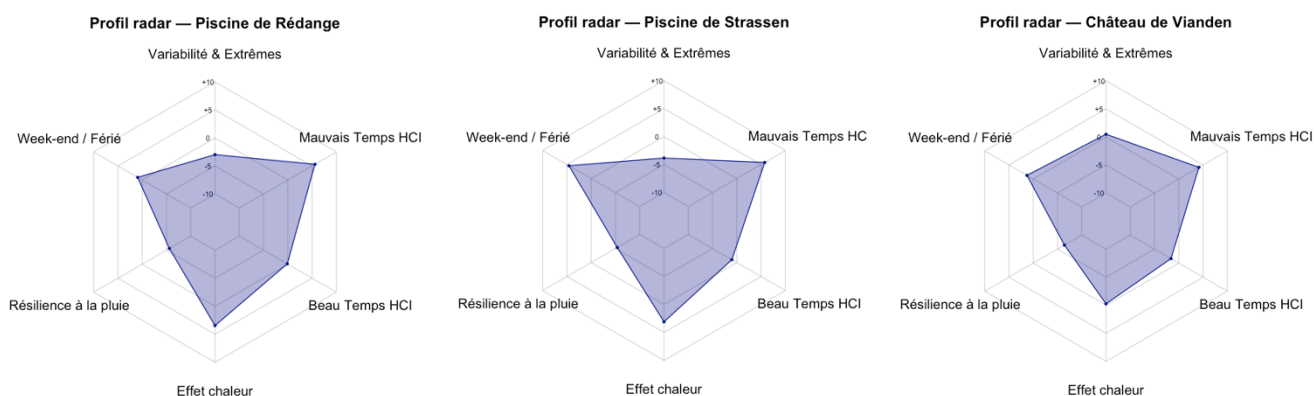


Figure 39. RADAR des piscines de Rédange et de Strassen et du Château de Vianden

De manière générale, les profils de randonnée présentent des scores RADAR équilibrés et proches des tendances centrales de l'ensemble des attractions étudiées (autour de 0). Dans la Figure 40, quelques itinéraires ont été sélectionnés afin d'illustrer les différences de profils au sein de cette catégorie d'activité. On y retrouve notamment la randonnée de Beaufort, la randonnée de la Molberlee et la randonnée du Schiessentümpel. Ces parcours se distinguent par des scores positifs pour l'effet week-end et une tolérance correcte à la pluie, avec une sensibilité à la chaleur variable selon l'attraction. Le Schiessentümpel, par exemple, enregistre de bonnes performances lors des journées chaudes, grâce à la présence de sa cascade emblématique qui offre un point d'eau rafraîchissant facilement accessible.

Certaines randonnées, comme celles de Beaufort, du Schiessentümpel, mais aussi de Berdorf et de Consdorf, affichent même des scores relativement élevés pour les indices week-end/férié et, de façon plus surprenante, pour la résilience à la pluie. Ces itinéraires, tous situés dans le Müllerthal, bénéficient d'un maillage dense de sentiers, avec pour chaque station de comptage au moins un itinéraire de plus de 100 km et plusieurs parcours de difficulté élevée. Cela laisse penser qu'ils attirent un public plus aguerri, moins influencé par les conditions météorologiques, et qui recherche avant tout la pratique sportive. Pour ces randonneurs, un temps légèrement humide ou plus frais peut même être préférable à de fortes chaleurs, surtout sur de longues distances.

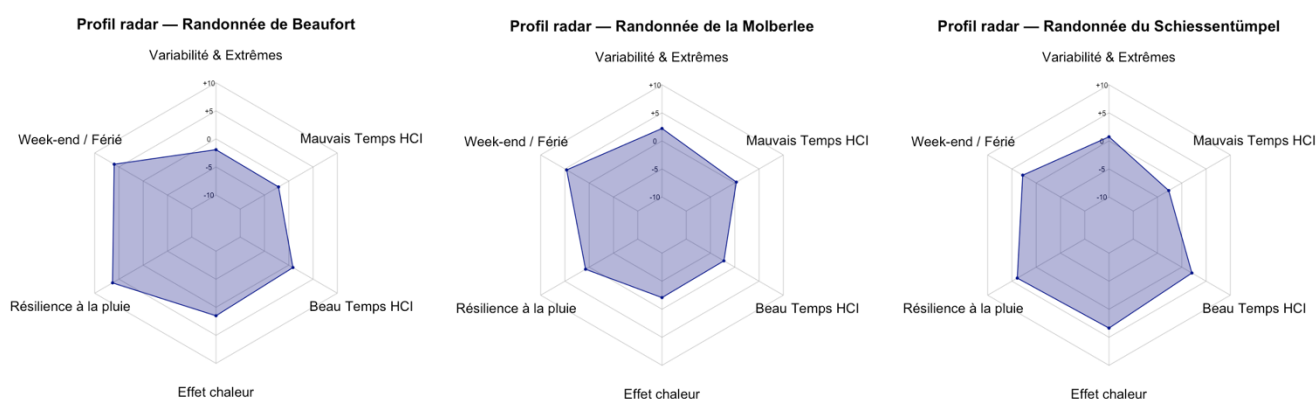


Figure 40. RADAR de la randonnée de Beaufort, de la Molberlee et du Schiessentümpel

Un ensemble d'attractions présentant des profils RADAR proches se retrouve dans le musée national des mines, le musée de la mine de cuivre et la piscine de Bettembourg (Figure 41). Leurs RADARS affichent des scores généralement très faibles, presque toujours en dessous des tendances centrales de l'ensemble des attractions étudiées (autour de 0). Comme déjà observé, le musée de la mine de cuivre et la piscine de Bettembourg sont les deux seules attractions où la variation relative de fréquentation diminue les week-ends et jours fériés. Bien qu'elles se situent principalement en intérieur, voire en souterrain, elles ne bénéficient pas d'une fréquentation accrue les jours de pluie, ni même lors des périodes de chaleur ou de conditions favorables selon le HCI. En revanche, l'analyse par l'HCI permet de mettre en évidence un point essentiel : ces attractions se révèlent performantes lorsque les conditions météorologiques sont globalement défavorables pour l'activité touristique. Ce signal, invisible dans une analyse séparée de la pluie ou de la température, illustre l'intérêt d'utiliser le HCI pour révéler ce type de dynamique. Dans cette perspective, on peut suggérer que lorsque les conditions sont peu propices aux activités de plein air, une partie des visiteurs se tourne vers des alternatives intérieures comme une piscine couverte, un musée ou une mine.

Une autre interprétation possible est que ces attractions attirent avant tout un public motivé par l'activité elle-même : la visite d'un musée ou d'une mine, ou la pratique régulière de la natation, surtout en semaine. Leur fréquentation normale ne dépend donc pas nécessairement du beau temps, mais profite marginalement des conditions défavorables, car les touristes plus occasionnels cherchent alors une solution de repli à ces moments-là.

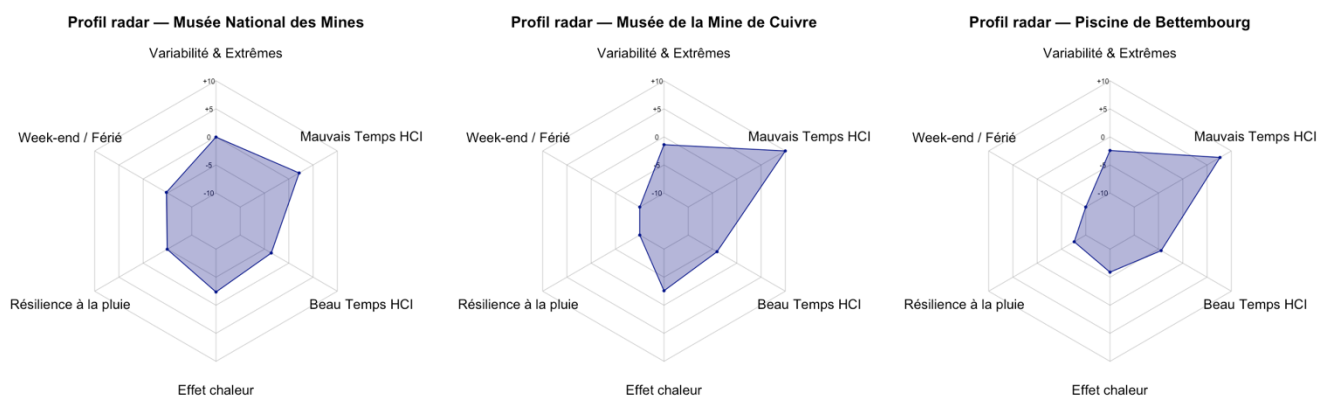


Figure 41. RADAR du Musée National des Mines, du Musée de la Mine de Cuivre et de la piscine de Bettembourg

Le dernier groupe d'attractions aux profils RADAR similaires regroupe la piscine de Pétange ainsi que les châteaux de Larochette et de Beaufort (Figure 42). Elles se caractérisent par des fréquentations plus élevées lors de journées classées comme favorables par le HCI et en conditions de chaleur. À l'inverse, leurs scores se situent généralement en dessous des tendances centrales lors des périodes de mauvais temps selon le HCI. Le château de Beaufort présente toutefois une meilleure résilience à la pluie que les deux autres attractions.

Cette dynamique reflète le fait que ces attractions sont particulièrement fréquentées lorsqu'elles peuvent tirer parti de conditions agréables. La piscine de Pétange pouvant être reconvertie en piscine extérieure profite des journées chaudes et ensoleillées, tandis que les châteaux se prêtent davantage à la visite en climat sec et confortable. Leur baisse relative de fréquentation en cas de mauvais temps souligne la vulnérabilité des activités de plein air dépendantes d'un cadre esthétique et patrimonial. La résilience spécifique du château de Beaufort pourrait s'expliquer par son agencement, alternant espaces intérieurs et extérieurs, ce qui permet aux visiteurs de poursuivre la visite malgré la pluie. Enfin, ces résultats traduisent aussi que les touristes choisissant ces destinations recherchent avant tout une expérience agréable, valorisée par le beau temps, et tendent à éviter ces activités dès lors que les conditions climatiques se dégradent.

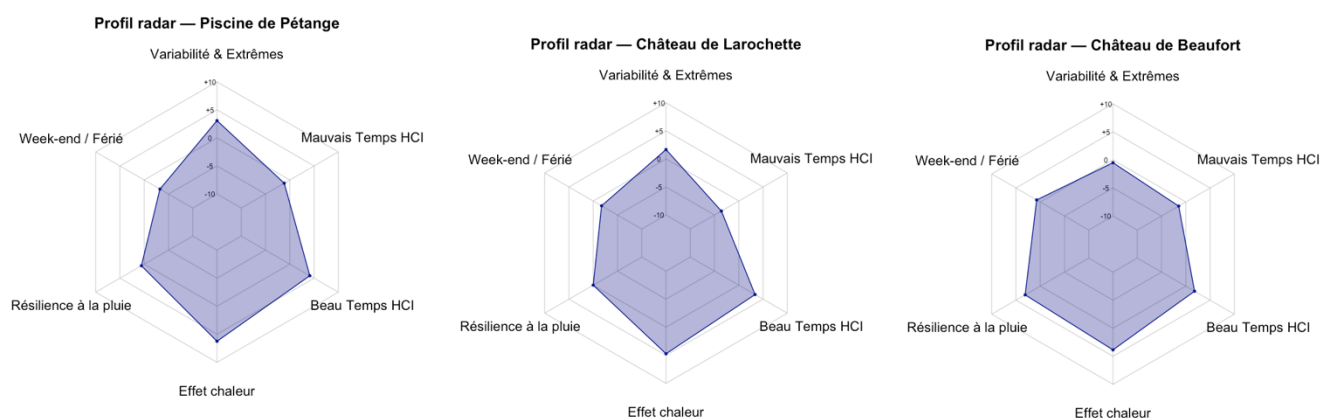


Figure 42. RADAR de la piscine de Pétange et des châteaux de Larochette et de Beaufort

En conclusion, cette lecture des profils RADAR montre que les attractions touristiques se répartissent en configurations distinctes, allant des lieux fortement météo-dépendants aux sites plus résilients, en passant par des profils intermédiaires modulés par le type d'activité et la clientèle. L'analyse souligne également que la performance touristique ne dépend pas uniquement de la présence d'une météo favorable : une attraction peut compenser une faible sensibilité à la chaleur par une bonne tolérance à la pluie ou par une fréquentation régulière, et inversement, une attraction très performante en été peut perdre fortement en fréquentation dès que les conditions se dégradent.

Un apport majeur de cette étude est l'utilisation du Holiday Climate Index (HCI), qui s'est révélé être un outil particulièrement pertinent pour l'analyse des profils d'attractions. En effet, l'observation isolée de la chaleur ou de la pluie ne permettait pas toujours de dégager des conclusions claires ni d'interpréter de façon satisfaisante les variations de fréquentation. À l'inverse, les catégories HCI de « beau temps » et de « mauvais temps » se sont avérées bien plus concluantes, offrant une lecture synthétique et opérationnelle des conditions perçues par les touristes et permettant de mieux cerner les profils d'attractions ainsi que les tendances de fréquentation.

Ces résultats ouvrent des perspectives stratégiques différenciées : les attractions saisonnières peuvent chercher à lisser leur fréquentation par des activités alternatives en cas de météo défavorable, tandis que les attractions plus résilientes peuvent capitaliser sur les périodes optimales grâce à des campagnes ciblées pour maximiser leur attractivité.

8. Discussion

L'objectif central de cette recherche était d'évaluer dans quelle mesure les conditions climatiques estivales influencent la fréquentation touristique au G-D de Luxembourg, en portant une attention particulière aux différences de sensibilité selon les types d'activités. Trois catégories distinctes ont été analysées : les visites culturelles, les loisirs aquatiques et la randonnée. L'hypothèse de départ postulait que les loisirs aquatiques bénéficieraient d'un effet positif marqué par des conditions chaudes et ensoleillées, que la randonnée serait stimulée par un climat agréable mais non extrême, et que les visites culturelles pourraient être moins sensibles aux variations climatiques, voire connaître une légère diminution de leur fréquentation en période de forte chaleur. Cette hypothèse a été confrontée aux données journalières collectées entre avril et septembre pour les années 2023 et 2024, en lien avec un ensemble complet d'indicateurs météorologiques, incluant notamment le Holiday Climate Index (HCI) afin d'appréhender la dimension du confort climatique ressenti par les visiteurs.

L'analyse des données de fréquentation met en évidence des contrastes marqués entre les deux années étudiées et entre les catégories d'activités. Les visites culturelles apparaissent comme la catégorie la plus fréquentée en volume absolu, mais également la plus variable. En 2023, la fréquentation moyenne journalière par attraction s'élève à 443 visiteurs, avec des pointes spectaculaires au cœur de l'été, notamment en août où la moyenne quotidienne atteint 731 visiteurs. Le mois de juillet est également marqué par une affluence élevée, dépassant 600 visiteurs par jour. L'année 2024 se révèle nettement plus modérée, avec une moyenne de 271 visiteurs par jour et des pics estivaux nettement atténués, culminant à 423 visiteurs en août. Cette baisse de fréquentation s'accompagne d'une réduction de la dispersion des valeurs, suggérant que la dynamique exceptionnelle de 2023 était liée à un ensemble de facteurs conjoncturels, potentiellement climatiques mais aussi organisationnels ou événementiels.

Les loisirs aquatiques présentent un profil très différent, caractérisé par une remarquable stabilité interannuelle. La fréquentation moyenne est de 365 visiteurs par jour en 2023 et de 367 en 2024, ce qui traduit une constance globale. Toutefois, un examen plus fin de la répartition saisonnière révèle qu'en 2024, les mois d'été sont plus dynamiques qu'en 2023, en particulier le mois d'août qui atteint 500 visiteurs par

jour en moyenne, contre 409 l'année précédente. Les journées les plus fréquentées coïncident presque systématiquement avec des épisodes de chaleur, ce qui confirme la forte dépendance de ce type d'activité aux conditions météorologiques estivales.

La randonnée, quant à elle, affiche les volumes moyens les plus faibles, avec 171 visiteurs par jour en 2023 et 193 en 2024. Ces chiffres sont marqués par une très forte asymétrie : la majorité des journées enregistrent des fréquentations très faibles, parfois inférieures à quelques dizaines de visiteurs, mais ponctuées par quelques journées exceptionnelles liées à des événements organisés ou à des périodes particulièrement attractives. La randonnée se distingue aussi par sa sensibilité au calendrier : la fréquentation y est plus que doublée les week-ends et jours fériés par rapport aux jours de semaine, traduisant une pratique fortement corrélée à la disponibilité des visiteurs, en grande partie résidents ou excursionnistes.

Les conditions climatiques observées sur la période d'étude permettent de mieux comprendre certaines de ces dynamiques. L'identification des jours de chaleur, définis par des températures maximales ou minimales supérieures au 90e percentile et par un Facteur d'Excès de Chaleur (EHF) positif, révèle que l'été 2023 a connu 34 jours de chaleur répartis sur trois vagues distinctes, d'une durée moyenne de quatre jours chacune. L'été 2024, bien que légèrement moins chaud en termes de jours totaux (31 jours de chaleur), présente deux vagues de chaleur plus longues, en moyenne cinq jours, concentrées essentiellement sur les mois de juillet et août. Le calcul du HCI permet de compléter ce tableau : les conditions jugées « *Très bonnes* » à « *Idéales* » se concentrent généralement à mi-juin, mi-août et début septembre. L'année 2023 se distingue par un mois de juin particulièrement favorable, tandis que 2024 se démarque par un mois d'août exceptionnellement propice aux activités de plein air, avec très peu de journées défavorables. Les conditions « *Inacceptables* » ou « *Limite* » sont rares mais peuvent se regrouper sur des périodes précises, notamment au début du printemps 2024 en raison d'une météo pluvieuse et fraîche.

L'étude des liens entre climat et fréquentation confirme la sensibilité différenciée des activités. Les jours de chaleur ont un effet très marqué sur les loisirs aquatiques, avec une augmentation moyenne de fréquentation de 32,6 %, effet statistiquement significatif et corrélé positivement aux températures maximales. La randonnée présente un effet très modeste (+2,8 %), non significatif, ce qui indique que la chaleur n'est pas un moteur de fréquentation pour ce type d'activité. Les visites culturelles

affichent même une légère baisse ($-3,1\%$) lors des journées chaudes, bien que cet effet ne soit pas significatif, ce qui suggère une possible substitution de la demande vers des activités plus rafraîchissantes ou extérieures.

Lorsque l'on considère le HCI, la relation avec la fréquentation apparaît plus nette. La corrélation globale entre le HCI et la fréquentation standardisée est positive et hautement significative ($\rho = 0,249$, $p \ll 0,001$). Un gradient clair se dessine : les journées classées « *Inacceptables* » présentent une fréquentation nettement inférieure à la moyenne (z-score $\approx -0,40$), tandis que les journées « *Idéales* » enregistrent des valeurs supérieures (z-score $\approx +0,25$). Cette tendance se retrouve pour chaque activité mais avec des intensités différentes : la randonnée est la plus sensible à l'amélioration des conditions, passant d'un z-score moyen de $-0,60$ en « *Inacceptable* » à $+0,22$ en « *Idéal* », les loisirs aquatiques progressent de manière marquée dès les conditions « *Très bonnes* », atteignant $+0,37$ en « *Idéal* », tandis que les visites culturelles montrent une progression plus modérée.

L'analyse des journées à fréquentation extrême complète ce tableau. Les pics de fréquentation des activités de plein air se produisent majoritairement lors de conditions « *Idéales* » ou « *Excellentes* », ce qui valide l'intérêt opérationnel du HCI pour la prévision et la gestion des flux touristiques. Cependant, certaines journées de creux sont observées malgré des conditions climatiques favorables, signe que des facteurs non climatiques tels que le calendrier, l'organisation d'événements ou la conjoncture touristique générale interviennent également dans la dynamique des visites.

Ces résultats s'inscrivent en cohérence avec la littérature scientifique. Les observations rejoignent les travaux de Matzarakis (2006) et de Freitas (2003) sur l'influence décisive des conditions perçues sur le comportement touristique, ainsi que les analyses de Scott *et al.* (2016) sur la capacité du HCI à rendre compte des variations de fréquentation. L'exemple des loisirs aquatiques au G-D de Luxembourg illustre le schéma déjà documenté dans d'autres contextes européens où les fortes chaleurs agissent comme un levier d'attractivité. La randonnée, moins sensible à la chaleur mais très impactée par les conditions défavorables, reflète le profil typique des activités extérieures dans les régions tempérées. Les visites culturelles, enfin, apparaissent moins réactives aux fluctuations climatiques mais peuvent subir une légère désaffection en cas de chaleur extrême, traduisant une reconfiguration temporaire de la demande.

Au-delà de l'intérêt scientifique, ces résultats comportent des implications opérationnelles importantes. Ils plaident pour une adaptation des stratégies de gestion et de promotion touristique aux prévisions climatiques, ce qui peut passer par une mise en avant accrue des loisirs aquatiques lors des périodes de chaleur anticipée. À l'inverse, il peut être pertinent de mener des actions de promotion pendant les périodes de faible affluence ou en cas de conditions météorologiques défavorables, afin de mieux répartir les flux et maintenir l'attractivité. La diversification de l'offre culturelle pour la rendre plus attractive en été, ainsi que des aménagements visant à améliorer le confort thermique sur les chemins de randonnée, complètent ces pistes. Ces enseignements constituent une base solide pour le développement d'approches de gestion touristique sensibles au climat, particulièrement pertinentes dans un contexte de réchauffement global et d'évolution prévisible des régimes météorologiques estivaux.

8.1. Limites de l'étude

La présente étude, bien qu'elle apporte des éclairages significatifs sur les liens entre conditions météorologiques et fréquentation touristique au G-D de Luxembourg, comporte un certain nombre de limites qui doivent être prises en considération pour interpréter les résultats avec justesse.

Tout d'abord, l'acquisition des données de fréquentation n'a pas toujours été aisée. Toutes les attractions touristiques ne disposent pas de données quantitatives détaillées, et parmi celles qui en possèdent, certaines ont été réticentes à les partager, même si la majorité a accepté de le faire. Les données obtenues ont dû être traitées dans le respect strict de la confidentialité, ce qui a parfois limité la liberté d'exploitation et d'analyse. Cette contrainte a pu restreindre la profondeur de certaines comparaisons, en particulier lorsqu'il s'agissait d'identifier des tendances précises ou de croiser les informations avec d'autres sources.

Sur le plan météorologique, si le G-D de Luxembourg bénéficie d'un réseau dense de stations, toutes ne mesurent pas l'ensemble des paramètres climatiques nécessaires à cette étude. Dans certains cas, il a été nécessaire de combiner les données issues de plusieurs stations pour constituer un jeu complet. Cette opération a introduit un risque d'hétérogénéité dans les séries temporelles, notamment lorsque les stations se trouvent dans des environnements microclimatiques différents. Toutefois, les résultats

des analyses menées laissent penser que cet effet n'a pas eu d'impact majeur sur les tendances générales observées.

Enfin, il convient de souligner que certaines dimensions du tourisme n'ont pas pu être explorées pleinement. Par exemple, l'intégration de données de fréquentation issues des hébergements touristiques aurait permis de mieux capter la durée et la structure des séjours, et d'obtenir ainsi une vision plus fine des dynamiques touristiques. De même, l'extension de la base de fréquentation à un plus grand nombre d'attractions aurait renforcé la robustesse des analyses comparatives et permis d'affiner l'étude des variations selon les types d'activités et de contextes météorologiques.

8.2. Ouvertures et perspectives

Ainsi, malgré ces contraintes, les résultats obtenus conservent une pertinence certaine pour éclairer les interactions entre météo et fréquentation touristique. Ils confirment également la solidité des approches mobilisées, en particulier la capacité du Holiday Climate Index (HCI) à fournir une lecture cohérente et opérationnelle des effets du climat sur les comportements de visite. Ce constat renforce la légitimité de son utilisation dans le cadre d'analyses touristiques et ouvre la voie à des recherches futures visant à élargir le champ d'observation, à tester cet indice dans d'autres contextes spatiaux ou temporels, et à perfectionner les méthodes d'analyse pour une compréhension toujours plus fine des liens entre conditions météorologiques et pratiques touristiques.

9. Conclusion

Ce mémoire avait pour objectif d'analyser l'impact des conditions météorologiques, et plus largement du climat, sur la fréquentation des attractions touristiques au G-D de Luxembourg, en s'appuyant sur des données journalières de fréquentation d'attractions touristiques et sur des variables climatiques détaillées. La problématique posée en introduction était la suivante : dans quelle mesure l'étude des variations de fréquentation liées aux conditions météorologiques permet-elle d'anticiper les effets des changements climatiques sur les tendances de fréquentation touristique des différentes attractions et activités au G-D de Luxembourg ?

L'analyse a montré que la fréquentation touristique présente des sensibilités différenciées selon les types d'activités et les attractions. Les résultats mettent en évidence que la température joue un rôle clé, avec des effets particulièrement marqués lors des journées de chaleur, tandis que l'indice Holiday Climate Index (HCI) a permis de préciser ces relations en intégrant simultanément plusieurs paramètres météorologiques. Les activités de plein air, telles que la randonnée et le loisir aquatique, apparaissent plus réactives aux variations climatiques que les visites culturelles, souvent moins dépendantes des conditions extérieures. Les analyses ont également mis en évidence des effets combinés du calendrier, de la variabilité intra-saisonnière et des conditions idéales sur la fréquentation.

Ces résultats permettent de répondre à la problématique : l'étude fine des liens entre météo et fréquentation fournit des éléments tangibles pour anticiper l'impact futur du réchauffement climatique sur le tourisme luxembourgeois. Elle révèle que certaines activités pourraient bénéficier d'étés plus chauds et plus secs, tandis que d'autres, au contraire, risquent de subir des baisses de fréquentation lors d'épisodes de chaleur extrême ou de conditions défavorables. Ces tendances confirment l'importance d'une adaptation différenciée selon les secteurs et les attractions, en tenant compte à la fois de la vulnérabilité climatique et des comportements touristiques observés.

Toutefois, cette étude comporte des limites, notamment liées à la période d'observation restreinte, au caractère partiel des données de fréquentation et à l'absence d'intégration des projections climatiques directement dans les modèles de fréquentation. Ces limites ouvrent des perspectives de recherche futures : élargir la période et la diversité des attractions étudiées, croiser les analyses avec des enquêtes qualitatives sur les motivations et perceptions des visiteurs, ou encore intégrer des

scénarios climatiques afin d'anticiper plus finement les évolutions possibles. Enfin, cette approche pourrait être appliquée à d'autres territoires pour comparer les réponses touristiques aux variations climatiques et identifier des stratégies d'adaptation transférables.

En définitive, ce travail contribue à une meilleure compréhension des interactions entre climat et tourisme au G-D de Luxembourg et met en lumière la nécessité d'une planification touristique résiliente. Dans un contexte où le réchauffement climatique modifie déjà les comportements et les flux touristiques, disposer d'analyses quantitatives fines et contextualisées constitue un atout majeur pour orienter les choix stratégiques, assurer la pérennité du secteur et saisir les opportunités émergentes, notamment autour du concept de « tourisme de fraîcheur » ou de « coolcation » qui pourrait renforcer l'attractivité du G-D de Luxembourg dans les années à venir.

10. Annexes

10.1. Liste des Attractions

Stations météo utilisées par indicateurs météo de chaque attraction touristique.

	Attractions touristiques	Precipitations	Températures	Humidité	Radiation	Ensoleillement	Vent
1	Château de Vianden	Vianden	Fouhren	Fouhren	Fouhren	Fouhren	Reuler
2	Château de Beaufort	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig
3	Château de Larochette	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig
4	Musée National des Mines	Livange	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn
5	Musée de la Mine de Cuivre	Vianden	Fouhren	Fouhren	Fouhren	Fouhren	Reuler
6	Jardin des Papillons	Grevenmacher	Grevenmacher	Grevenmacher	Grevenmacher	Grevenmacher	Grevenmacher
7	Baggerweier	Remerchen	Remerchen	Remerchen	Remich	Remich	Remich
8	Piscine de Bettembourg	Livange	Roeser	Roeser	Merl	Merl	Merl
9	Piscine de Hosingen	Hosingen	Hosingen	Hosingen	Hosingen	Hosingen	Reuler
10	Piscine de Mersch	Mersch	Beringen	Beringen	Useldange	Useldange	Useldange
11	Piscine de Rédange	Reichlange	Useldange	Useldange	Useldange	Useldange	Useldange
12	Piscine de Dudelange	Livange	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn
13	Piscine de Troisvierges	Asselborn	Asselborn	Asselborn	Huldange	Reuler	Reuler
14	Piscine de Pétange	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn	Oberkorn
15	Piscine de Strassen	Merl	Merl	Merl	Merl	Merl	Merl
16	Randonnée de Beaufort	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig
17	Randonnée de Berdorf	Bollendorf	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig
18	Randonnée de Heffingen	Godbrange	Godbrange	Godbrange	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig
19	Randonnée de Consdorf	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig
20	Randonnée du Schiessentümpel	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig	Waldbillig
21	Randonnée de Steinheim	Echternach	Echternach	Echternach	Echternach	Echternach	Echternach
22	Randonnée de Burfelt	Arsdorf	Arsdorf	Arsdorf	Eschdorf	Eschdorf	Eschdorf
23	Randonnée d'Ettelbrück	Ettelbrück	Ettelbrück	Ettelbrück	Ettelbrück	Eschdorf	Eschdorf
24	Randonnée de la Molberlee	Kautenbach	Dahl	Dahl	Dahl	Dahl	Eschdorf
25	Randonnée du Schässbiere	Harlange	Esch-sur-Sûre	Harlange	Harlange	Eschdorf	Eschdorf
26	Randonnée de Troisvierges	Asselborn	Asselborn	Asselborn	Huldange	Reuler	Reuler
27	Randonnée de Kautenbach	Kautenbach	Dahl	Dahl	Dahl	Dahl	Eschdorf
28	Randonnée de Vianden	Vianden	Fouhren	Fouhren	Fouhren	Fouhren	Reuler

Légende :

Station Météo Catégorie 1

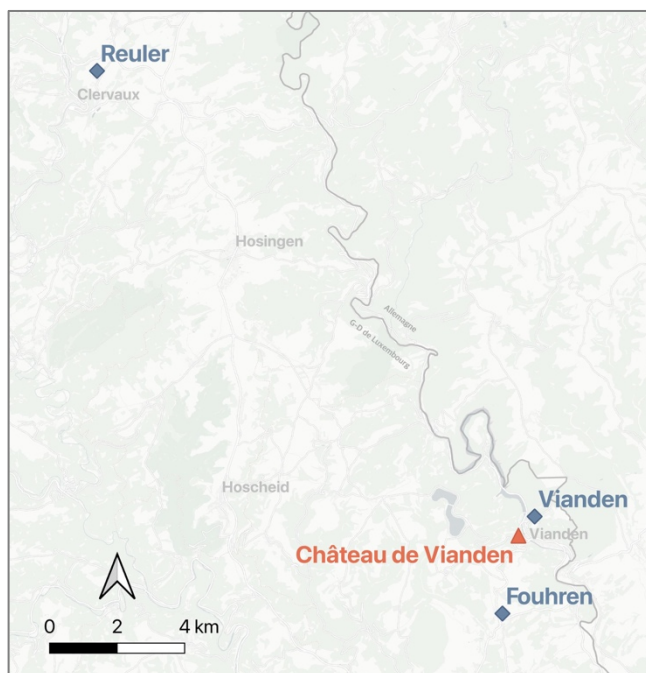
Station Météo Catégorie 2

Station Météo Catégorie 3

10.2. Catalogue des Attractions « Visite Culturelle »

Château de Vianden

Forteresse médiévale remarquablement restaurée, dominant la vallée de l'Our, avec parcours de visite à l'intérieur des salles et en extérieur sur les remparts et la cour.



Catégorie d'Activité : **Visite Culturelle**

Type d'espace : **Intérieur & Extérieur**

Site Web : Castle-Vianden.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



Montée du Château
L-9408 Vianden
Région Touristique **Oesling**



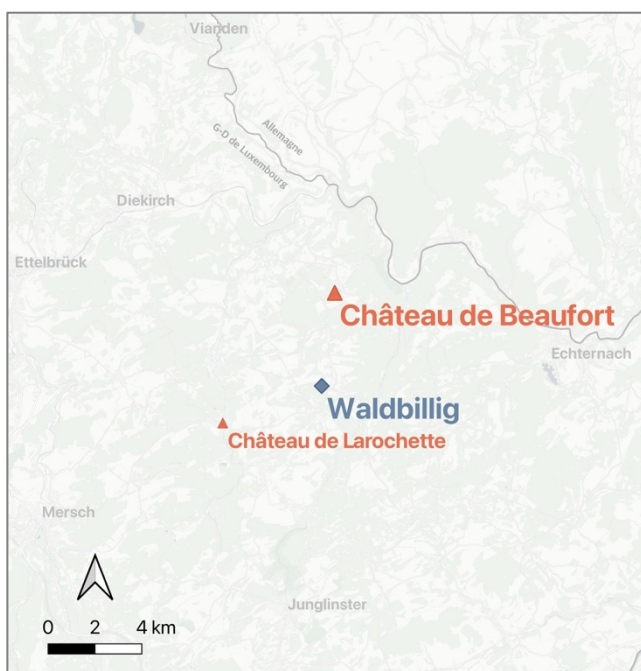
49.9351 N, 6.2030 E

Stations Météorologiques utilisées :

Vianden	49.9400 N, 6.2100 E
Fouhren	49.9145 N, 6.1951 E
Reuler	50.0633 N, 6.0366 E

Château de Beaufort

Ensemble composé des ruines d'un château médiéval et d'un château Renaissance, visite principalement en extérieur pour les ruines et en intérieur pour certaines parties.



Catégorie d'Activité : **Visite Culturelle**

Type d'espace : **Intérieur & Extérieur**

Site Web : Beaufortcastles.com
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



Rue du Château
L-6313 Beaufort
Région Touristique **Müllerthal**



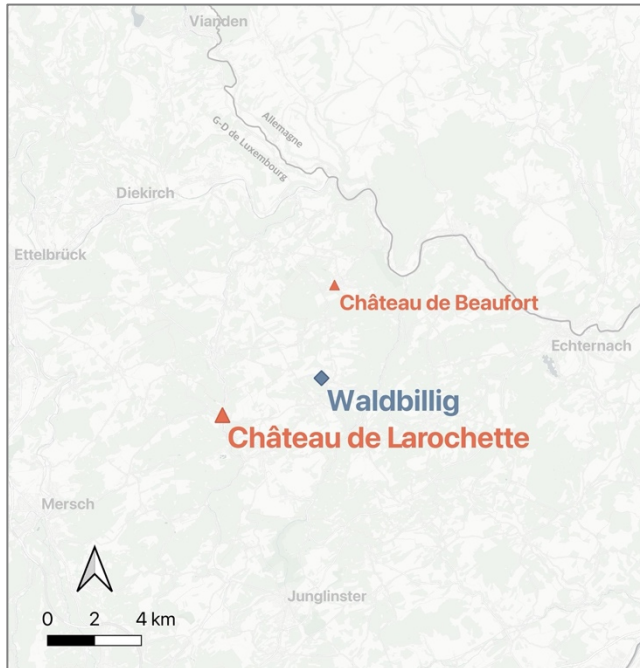
49.8336 N, 6.2873 E

Stations Météorologiques utilisées :

Waldbillig	49.7981 N, 6.2773 E
-------------------	---------------------

Château de Larochette

Ruines d'un château féodal sur un promontoire rocheux, visite essentiellement en extérieur, avec accès à quelques espaces couverts.



Catégorie d'Activité : **Visite Culturelle**

Type d'espace : **Intérieur & Extérieur**

Site Web : Chateaularochette.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



Montée du Château
L-7622 Larochette
Région Touristique **Müllerthal**



49.7855 N, 6.2178 E

Stations Météorologiques utilisées :

Waldbillig 49.7981 N, 6.2773 E

Jardin des Papillons

Serre tropicale abritant papillons exotiques et plantes rares, entièrement couverte et chauffée.



Catégorie d'Activité : **Visite Culturelle**

Type d'espace : **Intérieur**

Site Web : Papillons.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



56, Route de Trèves
L-6793 Grevenmacher
Région Touristique **Moselle**



49.6842 N, 6.4494 E

Stations Météorologiques utilisées :

Waldbillig 49.7981 N, 6.2773 E

Musée National des Mines

Musée retraçant l'histoire minière du G-D de Luxembourg, avec exposition en surface et visite guidée dans d'anciennes galeries souterraines.



Catégorie d'Activité : **Visite Culturelle**

Type d'espace : **Intérieur & Souterrain**

Site Web : mnm.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



Carreau de la mine Walert
L-3714 Rumelange
Région Touristique **Minett**



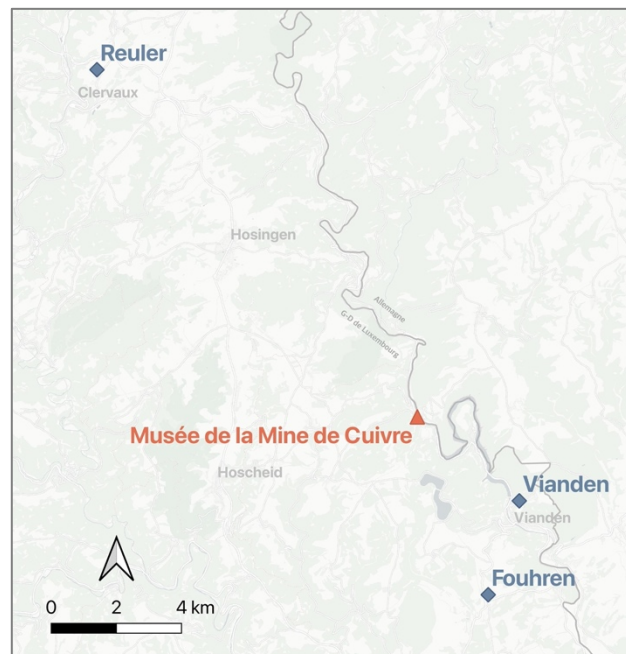
49.4609 N, 6.0231 E

Stations Météorologiques utilisées :

Livange	49.5300 N, 6.1200 E
Oberkorn	49.5122 N, 5.9011 E

Musée de la Mine de Cuivre

Description : Site minier historique avec exposition en surface et exploration guidée d'anciennes galeries de cuivre.



Catégorie d'Activité : **Visite Culturelle**

Type d'espace : **Intérieur & Souterrain**

Site Web : Stolzembourg.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



5A, rue Principale
L - 9463 Stolzembourg
Région Touristique **Oesling**



49.9644 N, 6.1680 E

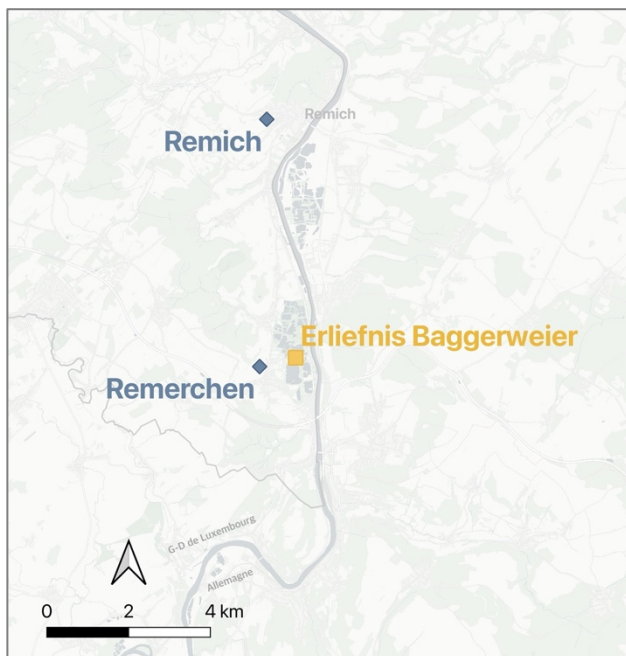
Stations Météorologiques utilisées :

Vianden	49.9400 N, 6.2100 E
Fouhren	49.9145 N, 6.1951 E
Reuler	50.0633 N, 6.0366 E

10.3. Catalogue des Attractions « Loisir Aquatique »

« Erliefnis Baggerweier »

Plan d'eau aménagé avec plages, zones de baignade et activités nautiques en plein air.




Catégorie d'Activité : **Loisir Aquatique**

Type d'espace : **Extérieur**

Site Web : Baggerweier.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg.lu)

 Breicherwee
L-5441 Remerschen
Région Touristique **Moselle**

 49.4926 N, 6.3613 E

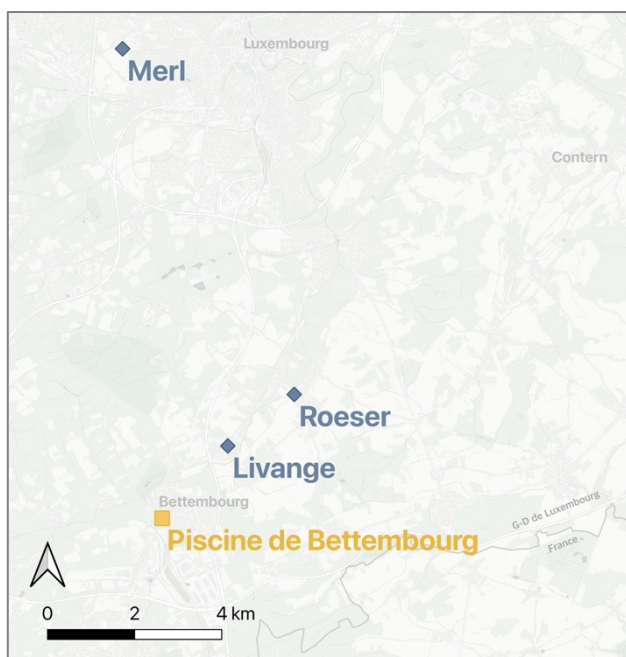
Stations Météorologiques utilisées :

Remerchen	49.4910 N, 6.3490 E
Remich	49.5452 N, 6.3549 E

Centre de Natation « An der Schwemm »

Piscine de Bettembourg


Centre aquatique avec bassins intérieurs, espace bien-être et bassin extérieur ouvert en été.




Catégorie d'Activité : **Loisir Aquatique**

Type d'espace : **Intérieur & Extérieur**

Site Web : An-der-Schwemm.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg.lu)

 10, Rue J.H. Polk
L-3275 Bettembourg
Région Touristique **Minett**

 49.5156 N, 6.0983 E

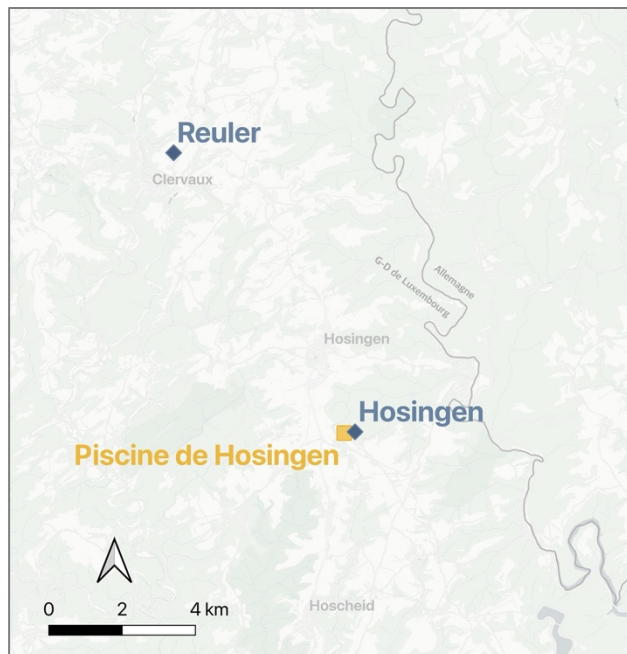
Stations Météorologiques utilisées :

Livange	49.5300 N, 6.1200 E
Roeser	49.5401 N, 6.1417 E
Merl	49,6129 N, 6,0916 E

Centre Aquatique « AquaNat'Our »

Piscine de Hosingen

Grand complexe aquatique avec plusieurs bassins intérieurs, espace bien-être et bassin extérieur saisonnier.



Catégorie d'Activité : **Loisir Aquatique**

Type d'espace : **Intérieur & Extérieur**

Site Web : Aquanatour.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



1A, Parc
L-9836 Hosingen
Région Touristique **Oesling**



49.9929 N, 6.0974 E

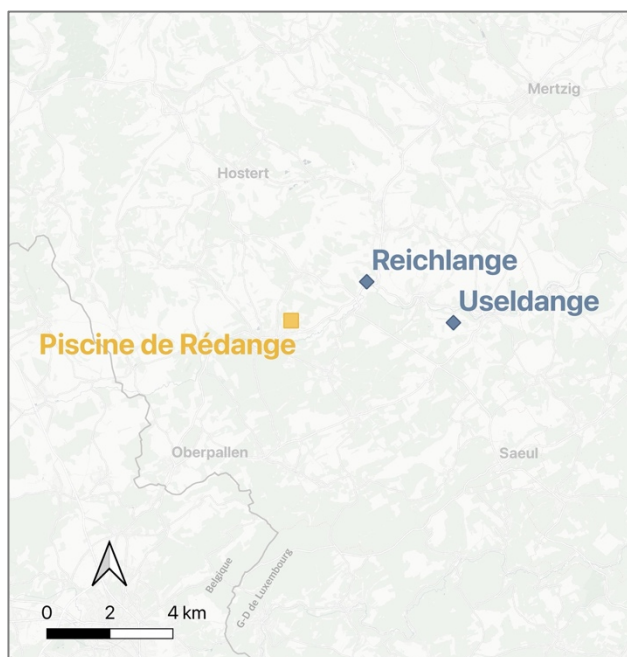
Stations Météorologiques utilisées :

Hosingen	49.9931 N, 6.1015 E
Reuler	50.0633 N, 6.0366 E

« Réidener Schwämm »

Piscine de Rédange

Piscine couverte avec espace bien-être et bassin extérieur accessible en période estivale.



Catégorie d'Activité : **Loisir Aquatique**

Type d'espace : **Intérieur & Extérieur**

Site Web : Reidener-Schwemm.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



28, Rue de la Piscine
L-8508 Redange-sur-Attert
Région Touristique **Gutland**



49.7697 N, 5.8961 E

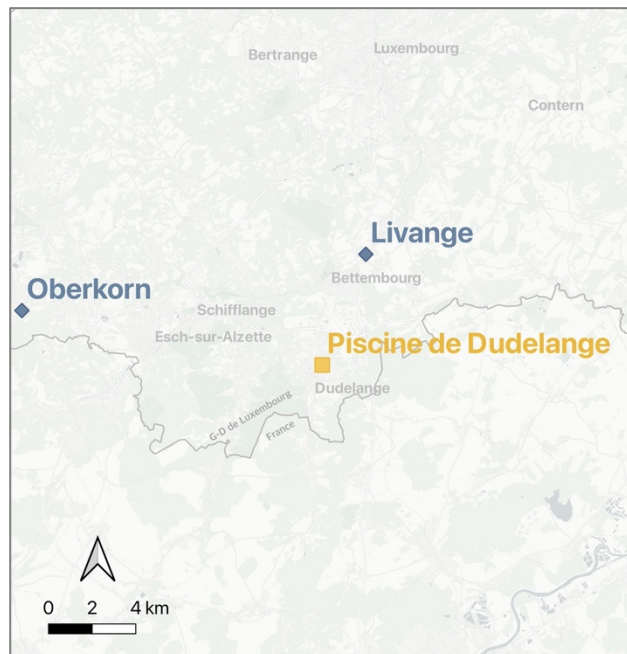
Stations Météorologiques utilisées :

Reichlange	49.7800 N, 5.9300 E
Useldange	49.7674 N, 5.9675 E

Piscine en plein air Dudelange

Piscine de Dudelange

Piscine extérieure chauffée avec bassins de nage et de loisirs, ouverte uniquement en saison estivale.



Catégorie d'Activité : **Loisir Aquatique**

Type d'espace : **Extérieur**

Site Web : Dudelange.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



70A, Rue du Parc
L-3542 Dudelange
Région Touristique **Minett**



49.4851 N, 6.0897 E

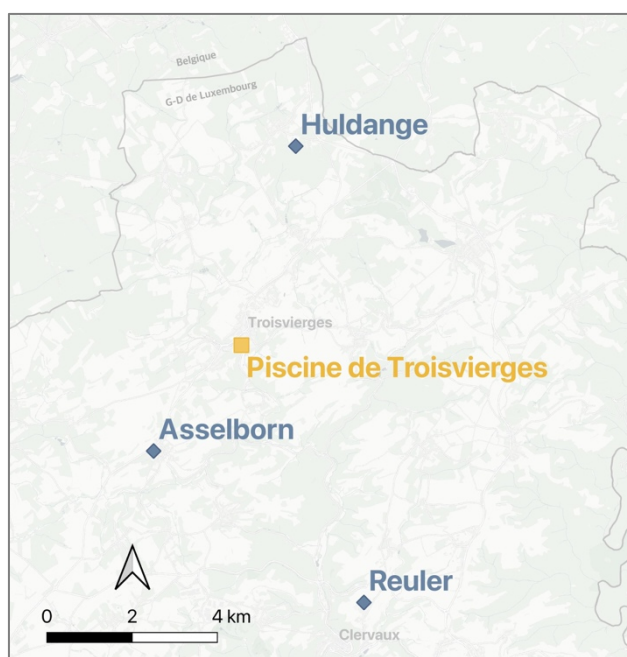
Stations Météorologiques utilisées :

Livange	49.5300 N, 6.1200 E
Oberkorn	49.5122 N, 5.9011 E

Piscine en plein air Troisvierges

Piscine de Troisvierges

Complexe en plein air avec grand bassin et zones de détente, ouvert en été.



Catégorie d'Activité : **Loisir Aquatique**

Type d'espace : **Extérieur**

Site Web : Visittroisvierges.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



32, Rue Millbich
L-9905 Troisvierges
Région Touristique **Oesling**



50.1185 N, 5.9997 E

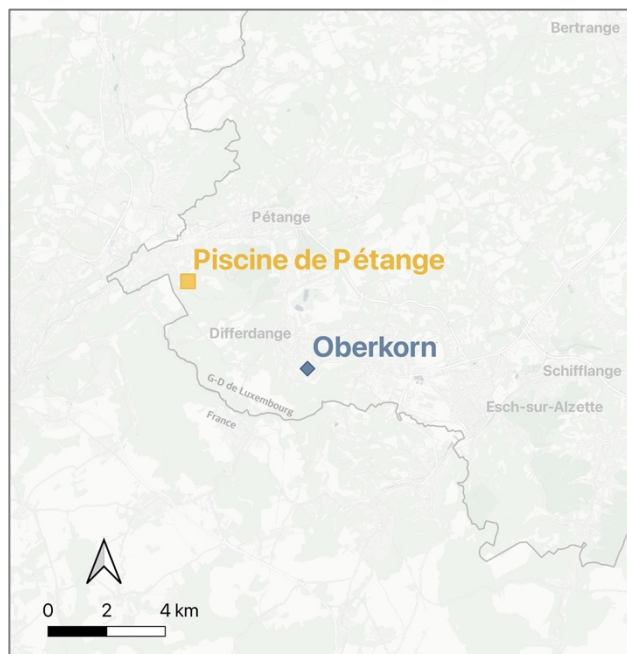
Stations Météorologiques utilisées :

Asselborn	50.0969 N, 5.9696 E
Huldange	50.1600 N, 6.0200 E
Reuler	50.0633 N, 6.0366 E

Piscine Kordall « PiKo »

Piscine de Pétange

Centre aquatique couvert avec bassins intérieurs et petit espace extérieur découvert en été.



Catégorie d'Activité : **Loisir Aquatique**

Type d'espace : **Intérieur & Extérieur**

Site Web : Petange.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



1, Rue de la Piscine
L-4846 Rodange
Région Touristique **Minett**



49.5403 N, 5.8463 E

Stations Météorologiques utilisées :

Oberkorn 49.5122 N, 5.9011 E

Centre Aquatique & Wellness « Les Thermes »

Piscine de Strassen

Centre aquatique et bien-être avec grands bassins intérieurs, toboggans, spa, et bassin extérieur chauffé utilisable toute l'année.



Catégorie d'Activité : **Loisir Aquatique**

Type d'espace : **Intérieur & Extérieur**

Site Web : Lesthermes.net
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



Rue des Thermes
L-8018 Strassen
Région Touristique **Gutland**



49.5019 N, 6.2821 E

Stations Météorologiques utilisées :

Merl 49.6129 N, 6.0916 E

Centre Aquatique « Krounebiérg »

Piscine de Mersch

Centre aquatique avec bassins intérieurs, toboggans et bassin extérieur découvert en été.



Catégorie d'Activité : **Loisir Aquatique**

Type d'espace : **Intérieur & Extérieur**

Site Web : Krounebiérg.lu
[Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)



14, Rue de la Piscine
L-7572 Mersch
Région Touristique **Guttländ**



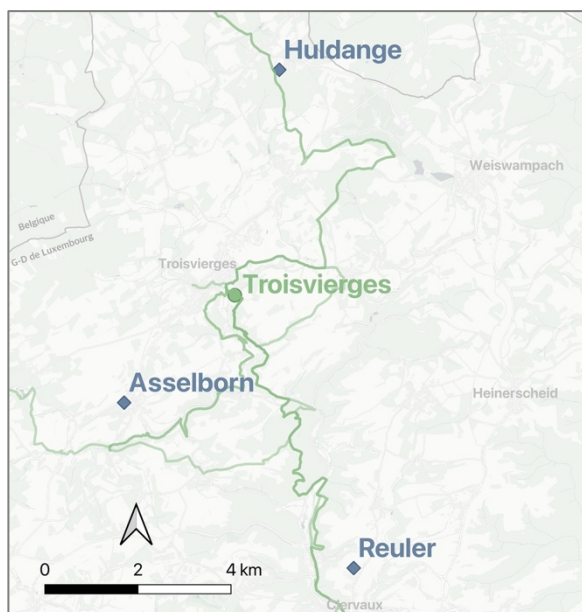
49.7433 N, 6.0915 E

Stations Météorologiques utilisées :

Mersch	49.7500 N, 6.1200 E
Beringen	49.7620 N, 6.1118 E
Useldange	49.7674 N, 5.9675 E

10.4. Catalogue des Attractions « Randonnée »

Randonnée à Troisvierges



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Troisvierges

5 Chemins de Randonnée

📍 50.1167 N, 6.0040 E

Région Touristique **Oesling**

Stations Météorologiques utilisées :

Huldange	50.1600 N, 6,0200 E
Asselborn	50.0969 N, 5.9696 E
Reuler	50.0633 N, 6.0366 E

Éislek Pad Troisvierges

Troisvierges ↻

📍 19,23 km 📈 513 m

Difficulté : **Moyen**

Escapardenne Éislek Trail

Kautenbach → La Roche-en-Ardenne

📍 106,95 km 📈 2390 m 🕒

32:10 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Visit-Eislek.lu

TV 3

Troisvierges ↻

📍 8,14 km 📈 150 m 🕒 2:20 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Visit-Eisleck.lu

GR57 – Vallée de l'Ourthe (B) – Gilsdorf (L)

Huldange → Gilsdorf

📍 102 km 📈 2810 m 🕒 30:00 h

Difficulté : **Difficile**

Liberation Route Europe – Luxembourg

Schengen → Niederwampach

📍 253,24 km 📈 5700 m 🕒

73:30 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Visit-Luxembourg

Randonnée à Kautenbach & au Molberlee



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Kautenbach

6 Chemins de Randonnée

📍 49.9584 N, 6.0141 E

Compteur Molberlee

6 Chemins de Randonnée

📍 49.9473 N, 6.0636 E

Région Touristique **Oesling**

Stations Météorologiques utilisées :

Kautenbach	49.9500 N, 6.0200 E
Dahl	49.9360 N, 5.9809 E
Eschdorf	49.8800 N, 5.9361 E

Kautenbach :

KI 8

Kautenbach ↻

📍 17,03 km 📈 570 m 🕒 5:35 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Visit-Eislek.lu

CFL 08

Wiltz → Kautenbach

📍 13,37 km 📈 380 m 🕒 4:20 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Visit-Eislek.lu

Molberlee :

Éislek Pad Hoscheid

Hoscheid ↻

📍 11,63 km 📈 420 m 🕒 4:00 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Visit-Eislek.lu

Escapardenne Lee Trail

Ettelbruck → Kautenbach

📍 52,40 km 📈 1810 m 🕒 17:55 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Visit-Eislek.lu

Kautenbach & Molberlee :

Escapardenne Éislek Trail

Kautenbach → Roche-en-Ardenne

📍 106,95 km 📈 2390 m 🕒 32:10 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Visit-Eislek.lu

Liberation Route Europe – Luxembourg

Schengen → Niederwampach

📍 253,24 km 📈 5700 m 🕒 73:30 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : [Visit Luxembourg](http://Visit-Luxembourg)

Sentier National Charles Mathieu

📍 46 km 📈 1601 m 🕒 9:11 h

Difficulté : **Difficile**

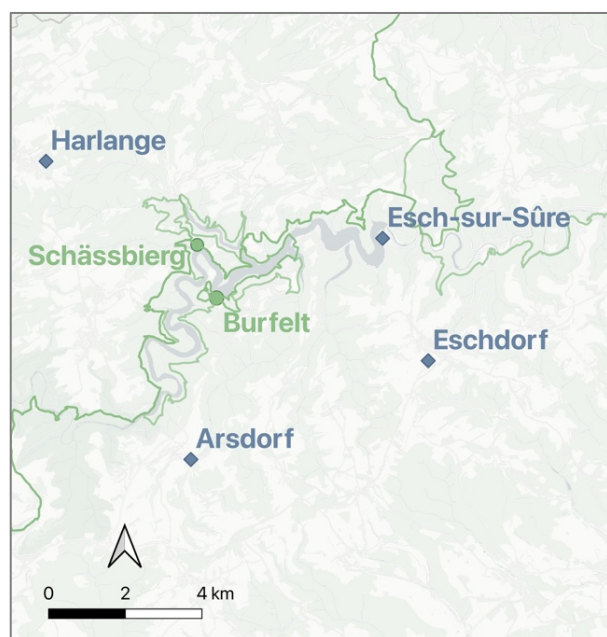
GR57 – Vallée de l'Ourthe (B) – Gilsdorf (L)

Huldange → Gilsdorf

📍 102 km 📈 2810 m 🕒 30:00 h

Difficulté : **Difficile**

Randonnée à Burfelt & au Schässbiertg



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Burfelt

3 Chemins de Randonnée

📍 49.8965 N, 5.8601 E

Compteur Schässbiertg

8 Chemins de Randonnée

📍 49.9091 N, 5.8538 E

Région Touristique **Oesling**

Stations Météorologiques utilisées :

Arsdorf	49.8589 N, 5.8487 E
Eschdorf	49.8800 N, 5.9361 E
Harlange	49.9300 N, 5.8000 E
Esch-sur-Sûre	49.9091 N, 5.9212 E

Burfelt :

Éislek Pad Insenborn

Insenborn 📍

📍 10,18 km 📈 230 m 🕒 3:06 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Visit-Eislek.lu

Sentier Local ES 1 - Burfelt

Burfelt 📍

📍 4,66 km 📈 150 m 🕒 1:35 h

Difficulté : **Facile**

Site Web : [Visit Luxembourg](http://Visit-Luxembourg)

Schässbiertg :

Sentier National Ardennes–Eifel

📍 144 km 📈 4363 m 🕒 28:44 h

Difficulté : **Difficile**

Burfelt & Schässbiertg :

Circuit du Lac (partie ouest)

Pont Misère 📍

📍 26,71 km 📈 650 m 🕒 8:20 h

Site Web : Visit-Eislek.lu

Éislek Pad Bavigne

Bavigne 📍

📍 9,92 km 📈 259 m 🕒 3:05 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Visit-Eislek.lu

ES 10

Lultzhausen → Insenborn

📍 8,64 km 📈 237 m 🕒 2:50 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Visit-Eislek.lu

LH 8

Bavigne 📍

📍 10,19 km 📈 240 m 🕒 3:05 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Visit-Eislek.lu

E3 (Espagne–Bohême)

Rombach → Schengen

📍 237 km 📈 6996 m

Difficulté : **Difficile**

Site Web : era-ewv-ferp.org

GR15 Ardennes–Eifel

📍 234 km 📈 4600 m 🕒 46:47 h

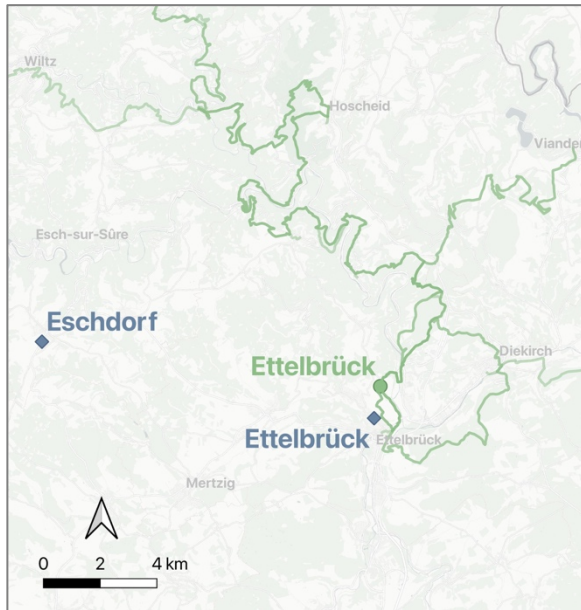
Difficulté : **Difficile**

Sentier National de la Haute-Sûre

📍 70,7 km 📈 2519 m 🕒 21:14 h

Difficulté : **Difficile**


Randonnée à Ettelbrück



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Ettelbrück

5 Chemins de Randonnée

 49.8617 N, 6.1011 E

Région Touristique **Oesling**




Stations Météorologiques utilisées :

Ettelbrück 49.8517 N, 6.0975 E

Eschdorf 49.8800 N, 5.9361 E

Escapardenne Lee Trail

Ettelbruck → Kautenbach




 52,40 km  1810 m  17:55 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Visit-Eislek.lu

Sentier Adrien Ries (partie nord)

Ettelbruck ↻




 21,04 km  430 m  6:10 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Visit-Eislek.lu

CFL-Bahnwanderweg 11

Diekirch ⇄ Ettelbruck




 11,62 km  230 m  3:20 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Visit-Eislek.lu

Sentier Victor Hugo




Ettelbruck → Vianden

 29,1 km  790 m  8:10 h

Difficulté : **Difficile**

Liberation Route Europe – Luxembourg

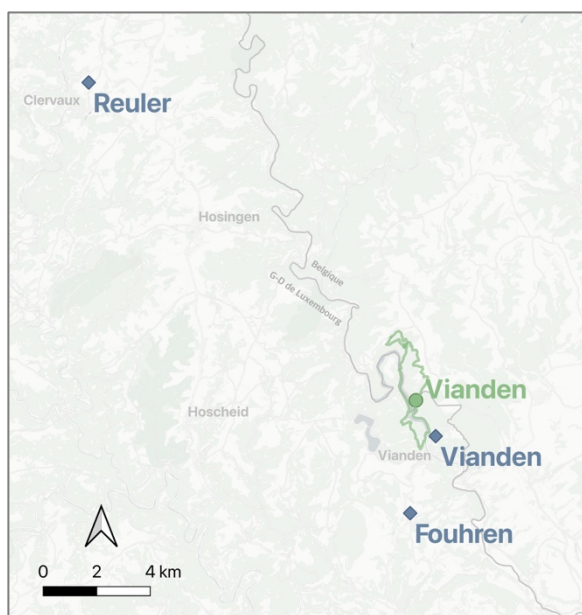
Schengen → Niederwampach

 253,24 km  5700 m  73:30 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Visit Luxembourg

Randonnée à Vianden



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Vianden

1 Chemin de Randonnée

📍 49.9531 N, 6.2011 E

Région Touristique **Oesling**

Stations Météorologiques utilisées :

Vianden	49.9400 N, 6.2100 E
Fouhren	49.9145 N, 6.1951 E
Reuler	50.0633 N, 6.0366 E

Nat'Our Route 5

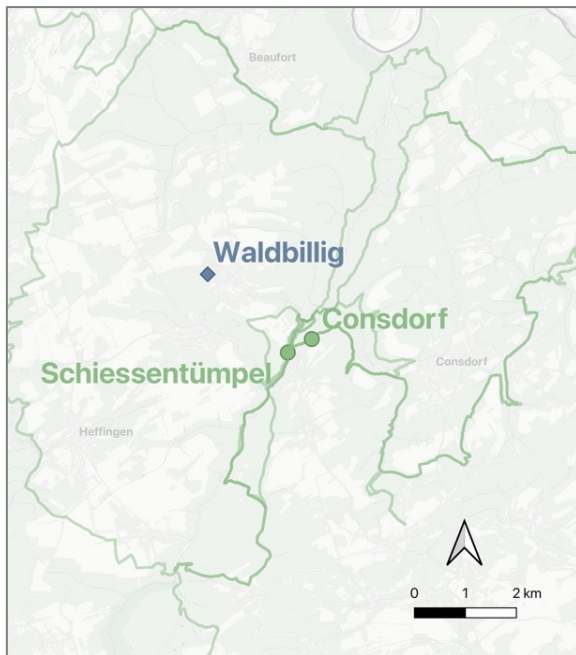
Vianden ↻

📍 12,55 km 📈 470 m 🕒 4:35 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Visit-Eislek.lu

Randonnée au Schiessentümpel & à Consdorf



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Schiessentümpel

4 Chemins de Randonnée

📍 49.7837 N, 6.2982 E

Compteur Consdorf

3 Chemins de Randonnée

📍 49.7859 N, 6.3049 E

Région Touristique **Müllerthal**

Stations Météorologiques utilisées :

Waldbillig 49.7980 N, 6.2773 E

Schiessentümpel :

Müllerthal Trail Route 3

Müllerthal 📍

📍 37,57 km 📈 686 m 🕒 11:05 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Mullerthal.lu

Sentier Local W6

Müllerthal 📍

📍 5,25 km 📈 101 m 🕒 01:35 h

Difficulté : **Facile**

Site Web : Mullerthal.lu

Schiessentümpel & Consdorf :

Sentier Local W7

Müllerthal 📍

📍 10,2 km 📈 237 m 🕒 3:20 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Mullerthal.lu

Liberation Route Europe

Schengen → Niederwampach

📍 253,24 km 📈 5700 m 🕒 73:30 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : [Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)

Consdorf :

Müllerthal Trail Route 2

Müllerthal 📍

📍 39,55 km 📈 947 m 🕒 12:50 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Mullerthal.lu

Auto-pédestre Consdorf

Müllerthal

Müllerthal 📍

📍 8,72 km 📈 169 m 🕒 4:00 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Mullerthal.lu

Randonnée à Beaufort



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Beaufort

13 Chemins de Randonnée

📍 49.8248 N, 6.2968 E

Région Touristique **Müllerthal**

Stations Météorologiques utilisées :

Waldbillig 49.7980 N, 6.2773 E

Müllerthal Trail Route 3

Müllerthal ↻

📍 37,57 km 📈 686 m 🕒 11:05 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Mullerthal.lu

NaturWanderPark delux : Felsenweg 2

Bollendorf ↻ / Beaufort ↻

📍 20,29 km 📈 708 m 🕒 06:00 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Mullerthal.lu

Circuit Auto-pédestre Beaufort

Beaufort ↻

📍 8,87 km 📈 129 m 🕒 2:35 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Mullerthal.lu

Liberation Route Europe

Schengen → Niederwampach

📍 253,24 km 📈 5700 m 🕒 73:30 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : [Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)

Sentier Local B1 Beaufort

Beaufort ↻

📍 10,58 km 📈 193 m 🕒 3:05 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Mullerthal.lu

Sentier Local B1 Beaufort

Beaufort ↻

📍 11,57 km 📈 182 m 🕒 3:15 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Mullerthal.lu

Geo-Pad Haupeschaach et Halerbaach

Beaufort ↻

📍 4,94 km 📈 114 m 🕒 2:00 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Mullerthal.lu

Événement : Beaufort FLMP IVV Wanderung

Beaufort ↻

📅 16 Août

📍 5 & 10 km

Site Web : FLMP.lu

Autres : GR15 Ardennes-Eifel
Sentier Maurice Cosyn
Echternach – Beaufort

E2-GR5 (Iverness GB – Nice FR)
E3 (Espagne-Bohême)

Randonnée à Heffingen



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Heffingen

4 Chemins de Randonnée

📍 49.7694 N, 6.2285 E

Région Touristique **Müllerthal**

Stations Météorologiques utilisées :

Godbrange 49.7363 N, 6.2356 E

Waldbillig 49.7980 N, 6.2773 E

Müllerthal Trail Route 3

Müllerthal ↻

📍 37,57 km 📈 686 m 🕒 11:05 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Mullerthal.lu

Sentier Local L3 Larochette

Larochette ↻

📍 11,71 km 📈 235 m 🕒 3:25 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Mullerthal.lu

Sentier Local H2 Heffingen

Heffingen ↻

📍 5,92 km 📈 97 m 🕒 1:35 h

Difficulté : **Facile**

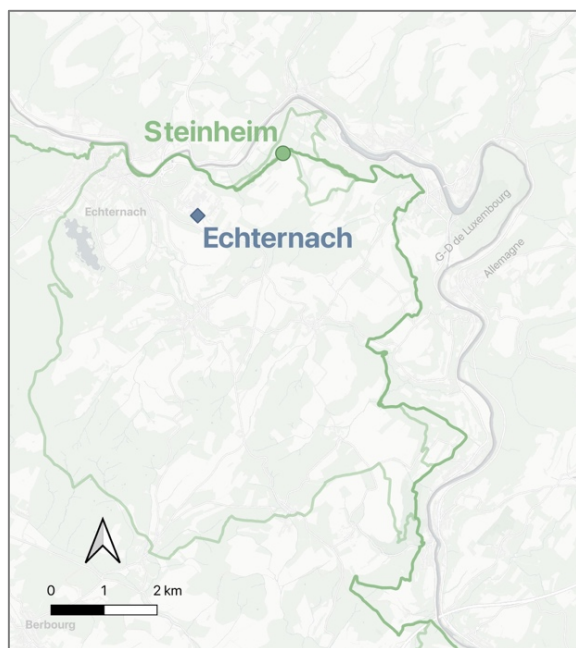
Site Web : Mullerthal.lu

Chemin Larochette – Echternach

Larochette → Echternach

📍 31,44 km 📈 724 m

Randonnée à Steinheim



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Steinheim

5 Chemins de Randonnée

📍 49.8130 N, 6.4664 E

Région Touristique **Müllerthal**

Stations Météorologiques utilisées :

Echternach 49.8031 N, 6.4433 E

Müllerthal Trail Route 1

Echternach ↻

📍 36,74 km 📈 745 m 🕒 10:25 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Mullerthal.lu

Sentier Local R8

Steinheim ↻

📍 8,71 km 📈 230 m 🕒 2:30 h

Difficulté : **Moyen**

Site Web : Mullerthal.lu

E3 Espagne – Bohême (partie Luxembourg)

📍 237,17 km 📈 6996 m

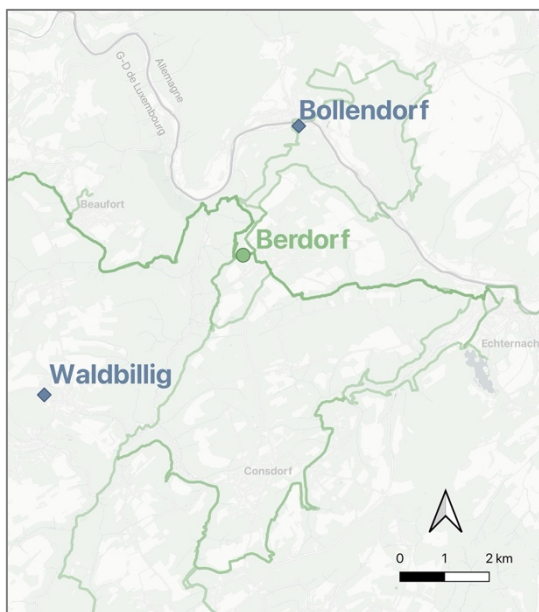
E2-GR5 Iverness GB – Nice FR (partie Luxembourg)

📍 203,49 km 📈 7047 m

Sentier de la Basse-Sûre

📍 26,88 km 📈 718 m

Randonnée à Berdorf



Catégorie d'Activité : **Randonnée**

Compteur Berdorf

9 Chemins de Randonnée

📍 49.8245 N, 6.3409 E

Région Touristique **Müllerthal**

Stations Météorologiques utilisées :

Bollendorf 49,8500 N, 6,3600 E

Waldbillig 49.7980 N, 6.2773 E

Müllerthal Trail Route 2

Müllerthal ↻

📍 39,55 km 📈 947 m 🕒 12:50 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Mullerthal.lu

Sentier Local B2 Berdorf

Berdorf ↻

📍 4,35 km 📈 52 m 🕒 1:20 h

Difficulté : **Facile**

Site Web : Mullerthal.lu

Liberation Route Europe

Schengen → Niederwampach

📍 253,24 km 📈 5700 m 🕒 73:30 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : [Visit Luxembourg](http://VisitLuxembourg)

Sentier Local B5 Berdorf

Berdorf ↻

📍 5,95 km 📈 80 m 🕒 1:40 h

Difficulté : **Facile**

Site Web : Mullerthal.lu

Chemin Echternach – Beaufort

Echternach → Beaufort

📍 18,77 km 📈 707 m

E3 Espagne – Bohême (partie Luxembourg)

📍 237,17 km 📈 6996 m

GR15 Ardennes – Eifel

📍 153,13 km 📈 4778 m

Sentier Maurice Cosyn

📍 31,92 km 📈 957 m

NaturWanderPark deluxe : Felsenweg 3

Ferschweiler ↻ / Berdorf ↻

📍 24,66 km 📈 530 m 🕒 06:30 h

Difficulté : **Difficile**

Site Web : Mullerthal.lu

10.4. Annexes – Autres

Annexe 10.4.1. Tableau des classes climatiques de Köppen-Geiger et leurs critères de définition

Letter symbol			Description	Criterion ^a
1st	2nd	3rd		
A			Tropical	Not (B) & $T_{\text{cold}} \geq 18$
	f		- Rainforest	$P_{\text{dry}} \geq 60$
	m		- Monsoon	Not (Af) & $P_{\text{dry}} \geq 100 - \text{MAP}/25$
	w		- Savannah	Not (Af) & $P_{\text{dry}} < 100 - \text{MAP}/25$
B			Arid	$\text{MAP} < 10 \times P_{\text{threshold}}$
	W		- Desert	$\text{MAP} < 5 \times P_{\text{threshold}}$
	S		- Steppe	$\text{MAP} \geq 5 \times P_{\text{threshold}}$
		h	- Hot	$\text{MAT} \geq 18$
		k	- Cold	$\text{MAT} < 18$
C			Temperate	Not (B) & $T_{\text{hot}} > 10$ & $0 < T_{\text{cold}} < 18$
	s		- Dry summer	$P_{\text{sdry}} < 40$ & $P_{\text{sdry}} < P_{\text{wwet}}/3$
	w		- Dry winter	$P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$
	f		- Without dry season	Not (Cs) or (Cw)
		a	- Hot summer	$T_{\text{hot}} \geq 22$
		b	- Warm summer	Not (a) & $T_{\text{mon10}} \geq 4$
		c	- Cold summer	Not (a or b) & $1 \leq T_{\text{mon10}} < 4$
D			Cold	Not (B) & $T_{\text{hot}} > 10$ & $T_{\text{cold}} \leq 0$
	s		- Dry summer	$P_{\text{sdry}} < 40$ & $P_{\text{sdry}} < P_{\text{wwet}}/3$
	w		- Dry winter	$P_{\text{wdry}} < P_{\text{swet}}/10$
	f		- Without dry season	Not (Ds) or (Dw)
		a	- Hot summer	$T_{\text{hot}} \geq 22$
		b	- Warm summer	Not (a) & $T_{\text{mon10}} \geq 4$
		c	- Cold summer	Not (a, b, or d)
		d	- Very cold winter	Not (a or b) & $T_{\text{cold}} < -38$
E			Polar	Not (B) & $T_{\text{hot}} \leq 10$
	T		- Tundra	$T_{\text{hot}} > 0$
	F		- Frost	$T_{\text{hot}} \leq 0$

Ce tableau présente un aperçu des différentes classes climatiques selon la classification de Köppen-Geiger, ainsi que les critères utilisés pour les définir. Il s'agit d'une adaptation du tableau publié par Peel *et al.* (2007), reprise dans Beck *et al.* (2023).

Les variables utilisées sont les suivantes :

- **MAT** : température moyenne annuelle de l'air (°C)
- **Tcold** : température du mois le plus froid (°C)
- **Thot** : température du mois le plus chaud (°C)
- **Tmon10** : nombre de mois avec une température moyenne supérieure à 10 °C (sans unité)
- **MAP** : précipitations annuelles moyennes (mm/an)
- **Pdry** : précipitations du mois le plus sec (mm/mois)
- **Psdry** : précipitations du mois le plus sec en été (mm/mois)
- **Pwdry** : précipitations du mois le plus sec en hiver (mm/mois)
- **Pswet** : précipitations du mois le plus humide en été (mm/mois)
- **Pwwet** : précipitations du mois le plus humide en hiver (mm/mois)
- **Pthreshold** : seuil de précipitation défini comme suit :
 - $P_{threshold} = 2 \times MAT$ si plus de 70 % des précipitations annuelles tombent en hiver
 - $P_{threshold} = 2 \times MAT + 28$ si plus de 70 % des précipitations tombent en été
 - $P_{threshold} = 2 \times MAT + 14$ si aucune des deux saisons ne dépasse 70 %

Les saisons sont définies de manière thermique :

- L'**été** correspond à la période la plus chaude de six mois (avril à septembre dans l'hémisphère nord)
- L'**hiver** correspond à la période la plus froide de six mois (octobre à mars)

Annexe 10.4.2. Les indices de températures et de précipitations extrêmes recommandés par l'ETCCDI (Zhang *et al.*, 2011)

ID	Indicator Name	Indicator Definitions	Units
TXx	Max Tmax	Monthly maximum value of daily max temperature	°C
TNx	Max Tmin	Monthly maximum value of daily min temperature	°C
TXn	Min Tmax	Monthly minimum value of daily max temperature	°C
TNn	Min Tmin	Monthly minimum value of daily min temperature	°C
TN10p	Cool nights	Percentage of time when daily min temperature < 10th percentile	%
TX10p	Cool days	Percentage of time when daily max temperature < 10th percentile	%
TN90p	Warm nights	Percentage of time when daily min temperature > 90th percentile	%
TX90p	Warm days	Percentage of time when daily max temperature > 90th percentile	%
DTR	Diurnal temperature range	Monthly mean difference between daily max and min temperature	°C
GSL	Growing season length	Annual (1st Jan to 31st Dec in NH, 1st July to 30th June in SH) count between first span of at least 6 days with TG>5 °C and first span after July 1 (January 1 in SH) of 6 days with TG<5 °C	days
FD0	Frost days	Annual count when daily minimum temperature < 0 °C	days
SU25	Summer days	Annual count when daily max temperature > 25 °C	days
TR20	Tropical nights	Annual count when daily min temperature > 20 °C	days
WSDI	Warm spell duration indicator	Annual count when at least six consecutive days of max temperature > 90th percentile	days
CSDI	Cold spell duration indicator	Annual count when at least six consecutive days of min temperature < 10th percentile	days
RX1day	Max 1-day precipitation amount	Monthly maximum 1-day precipitation	mm
RX5day	Max 5-day precipitation amount	Monthly maximum consecutive 5-day precipitation	mm
SDII	Simple daily intensity index	The ratio of annual total precipitation to the number of wet days (≥ 1 mm)	mm/day
R10	Number of heavy precipitation days	Annual count when precipitation ≥ 10 mm	days
R20	Number of very heavy precipitation days	Annual count when precipitation ≥ 20 mm	days
CDD	Consecutive dry days	Maximum number of consecutive days when precipitation < 1 mm	days
CWD	Consecutive wet days	Maximum number of consecutive days when precipitation ≥ 1 mm	days
R95p	Very wet days	Annual total precipitation from days > 95th percentile	mm
R99p	Extremely wet days	Annual total precipitation from days > 99th percentile	mm
PRCPTOT	Annual total wet-day precipitation	Annual total precipitation from days ≥ 1 mm	mm

Precise definitions are given at http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDI/list_27_indices.html.

11. Bibliographie

ASTA (Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg – Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Viticulture, Administration des services techniques de l'agriculture). (2025). AgriMeteo, Administration des services techniques de l'agriculture (ASTA). <https://www.agrimeteo.lu/>. Consulté le 10 août 2025.

Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Tank, A. M. G. K., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Kumar, K. R., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., Taylor, M., New, M., Zhai, P., Rusticucci, M. & Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal Of Geophysical Research Atmospheres*, 111, D05109. <https://doi.org/10.1029/2005jd006290>.

Beck, H. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., Lutsko, N. J., Dufour, A., Zeng, Z., Jiang, X., Van Dijk, A. I. J. M., & Miralles, D. G. (2023). High-resolution (1 km) Köppen Geiger maps for 1901–2099 based on constrained CMIP6 projections. *Scientific Data*, 10, 724. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02549-6>.

Błażejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H. & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *Int J Biometeorol*, 56, 515–535. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>.

Błażejczyk, K., Broede, P., Fiala, D., Havenith, G., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., & Kunert, A. (2010). Principles of the New Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its Application to Bioclimatic Research in European Scale. *Miscellanea Geographica*, 14(1), 91–102. <https://doi.org/10.2478/mgrsd-2010-0009>.

Clarke, L., Edmonds, J., Jacoby, H., Pitcher, H., Reilly, J., & Richels, R. (2007). Scenarios of greenhouse gas emissions and atmospheric concentrations. In Kathmann, L. (ed.), *A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research*, Washington, DC., 2007, Washington, DC. : Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, 1–154. <https://core.ac.uk/download/pdf/17231294.pdf>. Consulté le 10 août 2025.

Davenport, A. G. (1960). Rationale for Determining Design Wind Velocities. *Journal Of The Structural Division*, 86(5), 39–68. <https://doi.org/10.1061/jsdeag.0000521>.

De Freitas, C. R. (2003). Tourism climatology : evaluating environmental information for decision making and business planning in the recreation and tourism sector. *International Journal Of Biometeorology*, 48(1), 45–54. <https://doi.org/10.1007/s00484-003-0177-z>.

Dogru, T., Suess, C., & Sirakaya-Turk, E. (2020). Why Do Some Countries Prosper More in Tourism than Others? Global Competitiveness of Tourism Development. *Journal of Hospitality & Tourism Research*, 45(1), 215–256. <https://doi.org/10.1177/1096348020911706>.

Droque, G., Mestre, O., Hoffmann, L., Iffly, J., & Pfister, L. (2005). Recent warming in a small region with semi-oceanic climate, 1949–1998 : what is the ground truth? *Theoretical And Applied Climatology*, 81, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0088-x>.

Frich, P., Alexander, L., Della-Marta, P., Gleason, B., Haylock, M., Tank, A. K., & Peterson, T. (2002). Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19, 193–212. <https://doi.org/10.3354/cr019193>.

Fujino, J., Nair, R., Kainuma, M., Masui, T., & Matsuoka, Y. (2006). Multi-gas Mitigation Analysis on Stabilization Scenarios Using Aim Global Model. *The Energy Journal*, 27, 343–353. <http://www.jstor.org/stable/23297089>. Consulté le 10 août 2025.

Goergen, K., Beersma, J., Hoffmann, L., & Junk, J. (2013). ENSEMBLES-based assessment of regional climate effects in Luxembourg and their impact on vegetation. *Climatic Change*, 119(3-4), 761–773. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0756-x>.

Hartmann, D. L., Klein Tank, A. M. G., Rusticucci, M., Alexander, L. V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F. J., Dlugokencky, E. J., Easterling, D. R., Kaplan, A., Soden, B. J., Thorne, P. W., Wild, M., & Zhai, P. M. (2013). Observations: Atmosphere and surface. In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (eds), *Climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press, 159–254. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Chapter02_FINAL.pdf. Consulté le 10 août 2025.

Hijioka, Y., Matsuoka, Y., Nishimoto, H., Masui, M. and Kainuma, M. (2008) Global GHG Emissions Scenarios under GHG Concentration Stabilization Targets. *Journal of Global Environmental Engineering*, 13, 97–108. <https://www.jstor.org/stable/23297089>.

Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Int J Biometeorol*, 43, 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>.

IPCC. (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., & Miller, H.L. (eds), *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 996 p. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>. Consulté le 10 août 2025.

IPCC. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. In Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., & Midgley, P.M. (eds), *A Special Report of Working Groups I and II of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge : Cambridge University Press, 582 p. www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation. Consulté le 10 août 2025.

IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. In Stocker, T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (eds), *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 1535 p. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. Consulté le 10 août 2025.

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. In Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. & White, L.L. (eds), *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press 1132 p. www.ipcc.ch/report/ar5/wg2. Consulté le 10 août 2025.

Järv, O., Aagesen, H. W., Väisänen, T., & Massinen, S. (2022). Revealing mobilities of people to understand cross-border regions: insights from Luxembourg using social media data. *European Planning Studies*, 31(8), 1754–1775. <https://doi.org/10.1080/09654313.2022.2108312>.

Junk, J., Goergen, K., & Krein, A. (2019). Future Heat Waves in Different European Capitals Based on Climate Change Indicators. *International Journal Of Environmental Research And Public Health*, 16(20), 3959. <https://doi.org/10.3390/ijerph16203959>.

Junk, J., Sulis, M., Trebs, I., & Torres-Matallana, J. A. (2024). Evaluating the Present and Future Heat Stress Conditions in the Grand Duchy of Luxembourg. *Atmosphere*, 15(1), 112. <https://doi.org/10.3390/atmos15010112>.

Junk, J., Lett, C., Trebs, I., Hipler, E., Torres-Matallana, J. A., Lichti, R., & Matzarakis, A. (2025). Quantifying the Effects of Climate Change on the Urban Heat Island Intensity in Luxembourg—Sustainable Adaptation and Mitigation Strategies Through Urban Design. *Atmosphere*, 16(4), 462. <https://doi.org/10.3390/atmos16040462>.

Karl, T.R., Nicholls, N. & Ghazi, A. (1999). Clivar/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary. *Climatic Change*, 42, 3–7. <https://doi.org/10.1023/A:1005491526870>.

Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M. & Soussana, J.-F. (2014). Europe. In Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R. & White, L.L. (eds), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 1267-1326.

https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap23_FINAL.pdf.
Consulté le 10 août 2025.

Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., Engelbrecht, F., Fischer, E., Fyfe, J. C., Jones, C., Maycock, A., Mutemi, J., Ndiaye, O., Panickal, S., & Zhou, T. (2021). Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information. In Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 553–672.
[doi:10.1017/9781009157896.006](https://doi.org/10.1017/9781009157896.006).

LFT (Luxembourg for Tourism). (2020). *BrandBook : Nouvelles Perspectives*. [Brochure], 83 p.
https://www.visitluxembourg.com/fileadmin/visitluxembourg/Pictures/Rapport_activite_2021/VL_BRANDBOOK_FR.pdf. Consulté le 10 août 2025.

Masterson, J. M., & Richardson, F. A. (1979). Humidex : a method of quantifying human discomfort due to excessive heat and humidity. Environment Canada, *Atmospheric Environment Service*, 45 p.
<https://publications.gc.ca/site/fra/9.865813/publication.html>. Consulté le 10 août 2025.

Matzarakis, A. (2006). Weather- and climate-related information for tourism. *Tourism And Hospitality Planning & Development*, 3, 99–115.
<https://doi.org/10.1080/14790530600938279>.

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2007). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *International Journal Of Biometeorology*, 51, 323–334. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0061-8>.

Matzarakis, A., Rammelberg, J., & Junk, J. (2013). Assessment of thermal bioclimate and tourism climate potential for central Europe—the example of Luxembourg. *Theoretical And Applied Climatology*, 114, 193–202. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0835-y>.

MECO (Ministère de l'Économie du Grand-Duché de Luxembourg). (2022). *Tourismusstrategie Lëtzebuerg : Mënschen, Regiounen an Ekonomie*. [Brochure]. Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg – Ministère de l'Économie, Direction générale du tourisme, 86 p. <https://mecco.gouvernement.lu/dam-assets/publications/strategie/tourismus-strategie.pdf>. Consulté le 10 août 2025.

MeteoLux. (2025) Normales et extrêmes. Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg. <https://www.meteolux.lu/fr/climat/normales-et-extremes/>. Consulté le 10 août 2025.

Mieczkowski, Z. (1985). The Tourism Climatic Index: A Method of Evaluating World Climates for Tourism. *Canadian Geographies / Géographies Canadiennes*, 29(3), 220–233. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0064.1985.tb00365.x>.

Ministère de la Santé. (2023). *Plan d'action en cas de grande chaleur – Plan canicule*. [Brochure]. Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg – Ministère de la Santé, Direction de la Santé, 6 p. <https://santeseclu.public.lu/dam-assets/fr/publications/p/plan-daction-canicule/plan-canicule-version-juin-2023.pdf>. Consulté le 10 août 2025.

Missenard, F.-A. (1933). Température effective d'une atmosphère Généralisation température résultante d'un milieu. In Eyrolles, L. (eds), *Encyclopédie Industrielle et Commerciale : Etude physiologique et technique de la ventilation*. Paris : Librairie de l'Enseignement Technique, 131–185.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Carter, T. R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B., Nakićenović, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant, J. P., & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>.

Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I., Emori, S., Erda, L., Hibbard, K., Jones, R., Kainuma, M., Kelleher, J., Lamarque, J.-F., Manning, M., Matthews, B., Meehl, J., Meyer, L., Mitchell, J., Nakićenović, N., O'Neill, B., Pichs, R., Riahi, K., Rose, S., Runci, P., Stouffer, R., van Vuuren, D., Weyant, J., Wilbanks, T., van Ypersele, J.-P. & Zurek, M. (2008). *Élaboration de nouveaux scénarios destinés à analyser les émissions, les changements climatiques, les incidences et les stratégies de parade*. Résumé technique. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, 26 p. <https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-ts-scenarios-fr.pdf>. Consulté le 10 août 2025.

Nairn, J., Fawcett, R., & Ray, D. (2009). Defining and predicting excessive heat events, a national system. *Australian Bureau of Meteorology*, 4 p.

Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., & Zhou, D. (2000). Special Report on Emissions Scenarios. In IPCC (eds), *A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 599 p. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/emissions_scenarios.pdf. Consulté le 10 août 2025.

Nicholls, N., Skinner, C., Loughnan, M., & Tapper, N. (2007). A simple heat alert system for Melbourne, Australia. *International Journal Of Biometeorology*, 52(5), 375–384. <https://doi.org/10.1007/s00484-007-0132-5>.

- Orlowsky, B. & Seneviratne, S.I. (2012). Global changes in extreme events: regional and seasonal dimension. *Climatic Change*, 110, 669–696. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0122-9>.
- Pattenden, S., Nikiforov, B. & Armstrong, B. G. (2003). Mortality and temperature in Sofia and London. *Journal Of Epidemiology & Community Health*, 57(8), 628–633. <https://doi.org/10.1136/jech.57.8.628>.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology And Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Perkins, S. E. (2011). Biases and Model Agreement in Projections of Climate Extremes over the Tropical Pacific. *Earth Interactions*, 15(24), 1–36. <https://doi.org/10.1175/2011ei395.1>.
- Perkins, S. E. & Alexander, L. V. (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal Of Climate*, 26(13), 4500–4517. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00383.1>.
- Perkins, S. E., Alexander, L. V., & Nairn, J. R. (2012). Increasing frequency, intensity and duration of observed global heatwaves and warm spells. *Geophysical Research Letters*, 39(20), L20714. <https://doi.org/10.1029/2012gl053361>.
- Peterson, T. C., Folland, C., Gruza, G., Hogg, W., Mokssit, A., & Plummer, N. (2001). Report of the activities of the Working Group on Climate Change Detection and related rapporteurs. Résumé technique. World Meteorological Organization, 146 p. <https://etccdi.pacificclimate.org/docs/wgccd.2001.pdf>. Consulté le 10 août 2025.
- Riahi, K., Grübler, A., & Nakićenović, N. (2006). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting And Social Change*, 74(7), 887–935. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.05.026>.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakićenović, N., & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1-2), 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>.
- Romanello, M., di Napoli, C., Green, C., Kennard, H., Lampard, P., Scamman, D., Walawender, M., Ali, Z., Ameli, N., Ayeb-Karlsson, S., Beggs, P. J., Belesova, K., Berrang-Ford, L., Bowen, K., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J., Cross, T. J., van Daalen, K. R., Dalin, C., Dasandi, N., Dasgupta, S., Davies, M., Dominguez-Salas, P., Dubrow, R., Ebi, K. L., Eckelman, M., Ekins, P., Freyberg, C., Gasparyan, O., Gordon-Strachan, G., Graham, H., Gunther, S. H., Hamilton, I., Hang, Y., Hänninen, R., Hartinger, S., He, K., Heidecke, J., Hess, J. J., Hsu, S.-C., Jamart, L., Jankin, S., Jay, O., Kelman, I., Kieseewetter, G., Kinney, P., Kniveton, D., Kouznetsov, R., Larosa, F., Lee, J. K. W., Lemke, B., Liu, Y., Liu, Z., Lott, M., Lotto Batista, M., Lowe, R., Odhiambo Sewe, M., Martinez-Urtaza, J., Maslin, M., McAllister, L., McMichael, C., Mi, Z., Milner, J., Minor, K., Minx, J. C., Mohajeri, N., Momen, N. C., Moradi-Lakeh, M., Morrissey, K., Munzert, S., Murray, K.

A., Neville, T., Nilsson, M., Obradovich, N., O'Hare, M. B., Oliveira, C., Oreszczyn, T., Otto, M., Owfi, F., Pearman, O., Pega, F., Pershing, A., Rabbaniha, M., Rickman, J., Robinson, E. J. Z., Rocklöv, J., Salas, R. N., Semenza, J. C., Sherman, J. D., Shumake-Guillemot, J., Silbert, G., Sofiev, M., Springmann, M., Stowell, J. D., Tabatabaei, M., Taylor, J., Thompson, R., Tonne, C., Treskova, M., Trinanes, J. A., Wagner, F., Warnecke, L., Whitcombe, H., Winning, M., Wyns, A., Yglesias-González, M., Zhang, S., Zhang, Y., Zhu, Q., Gong, P., Montgomery, H., & Costello, A. (2023). The 2023 report of the Lancet Countdown on health and climate change: The imperative for a health-centred response in a world facing irreversible harms. *The Lancet*, 402(10419), 2346–2394. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(23\)01859-7](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(23)01859-7).

Romanello, M., Walawender, M., Hsu, S.-C., Moskeland, A., Palmeiro-Silva, Y., Scamman, D., Ali, Z., Ameli, N., Angelova, D., Ayeb-Karlsson, S., Basart, S., Beagley, J., Beggs, P. J., Blanco-Villafuerte, L., Cai, W., Callaghan, M., Campbell-Lendrum, D., Chambers, J. D., Chicmana-Zapata, V., Chu, L., Cross, T. J., van Daalen, K. R., Dalin, C., Dasandi, N., Dasgupta, S., Davies, M., Dubrow, R., Eckelman, M. J., Ford, J. D., Freyberg, C., Gasparyan, O., Gordon-Strachan, G., Grubb, M., Gunther, S. H., Hamilton, I., Hang, Y., Hänninen, R., Hartinger, S., He, K., Heidecke, J., Hess, J. J., Jamart, L., Jankin, S., Jatkar, H., Jay, O., Kelman, I., Kennard, H., Kiesewetter, G., Kinney, P., Kniveton, D., Kouznetsov, R., Lampard, P., Lee, J. K. W., Lemke, B., Li, B., Liu, Y., Liu, Z., Lladrés-Brustenga, A., Lott, M., Lowe, R., Martinez-Urtaza, J., Maslin, M., McAllister, L., McMichael, C., Mi, Z., Milner, J., Minor, K., Minx, J., Mohajeri, N., Momen, N. C., Moradi-Lakeh, M., Morrissey, K., Munzert, S., Murray, K. A., Obradovich, N., O'Hare, M. B., Oliveira, C., Oreszczyn, T., Otto, M., Owfi, F., Pearman, O. L., Pega, F., Pershing, A. J., Pinho-Gomes, A.-C., Ponmattam, J., Rabbaniha, M., Rickman, J., Robinson, E., Rocklöv, J., Rojas-Rueda, D., Salas, R. N., Semenza, J. C., Sherman, J. D., Shumake-Guillemot, J., Singh, P., Sjödin, H., Slater, J., Sofiev, M., Sorensen, C., Springmann, M., Stalhandske, Z., Stowell, J. D., Tabatabaei, M., Taylor, J., Tong, D., Tonne, C., Treskova, M., Trinanes, J. A., Uppstu, A., Wagner, F., Warnecke, L., Whitcombe, H., Xian, P., Zavaleta-Cortijo, C., Zhang, C., Zhang, R., Zhang, S., Zhang, Y., Zhu, Q., Gong, P., Montgomery, H., & Costello, A. (2024). The 2024 report of the Lancet Countdown on health and climate change : facing record-breaking threats from delayed action. *The Lancet*, 404(10465), 1847–1896. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(24\)01822-1](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(24)01822-1).

Russo, S., Dosio, A., Graversen, R. G., Sillmann, J., Carrao, H., Dunbar, M. B., Singleton, A., Montagna, P., Barbola, P., & Vogt, J. V. (2014). Magnitude of extreme heat waves in present climate and their projection in a warming world. *Journal Of Geophysical Research Atmospheres*, 119, 12 500–12 512. <https://doi.org/10.1002/2014jd022098>.

Rutty, M., Scott, D., Matthews, L., Burrowes, R., Trotman, A., Mahon, R., & Charles, A. (2020). An Inter-Comparison of the Holiday Climate Index (HCI : Beach) and the Tourism Climate Index (TCI) to Explain Canadian Tourism Arrivals to the Caribbean. *Atmosphere*, 11(4), 412. <https://doi.org/10.3390/atmos11040412>.

Scott, D., Rutty, M., Amelung, B., & Tang, M. (2016). An Inter-Comparison of the Holiday Climate Index (HCI) and the Tourism Climate Index (TCI) in Europe. *Atmosphere*, 7(6), 80. <https://doi.org/10.3390/atmos7060080>.

Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Di Luca, A., Ghosh, S., Iskandar, I., Kossin, J., Lewis, S., Otto, F., Pinto, I., Satoh, M., Vicente-Serrano, S. M., Wehner, M., & Zhou, B. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., & Zhou, B. (eds), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, 1513–1766. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.

SIG-GR. (2024). *La Grande Région en 6 cartes – Die Großregion in 6 Karten*. [Brochure]. Maison de la Grande Région, 31 p. <https://www.sig-gr.eu/dam-assets/publications/brochures-sig-gr/gr-6-cartes-karten-sig-gr-gis-gr-web.pdf>. Consulté en août 2025.

Smid, M., Russo, S., Costa, A., Granell, C., & Pebesma, E. (2019). Ranking European capitals by exposure to heat waves and cold waves. *Urban Climate*, 27, 388–402. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.010>.

Statec. (2024). *Le tourisme en chiffres : édition 2024*. Gouvernement du Grand-Duché de Luxembourg. <https://statistiques.public.lu/fr/publications/series/en-chiffres/2024/tourisme-2024.html>. Consulté le 10 août 2025.

Tang, M. (2013). *Comparing the ‘Tourism Climate Index’ and ‘Holiday Climate Index’ in Major European Urban Destinations*. Thèse de master en sciences environnementales, Waterloo, University of Waterloo, inédit, 134 p. <http://hdl.handle.net/10012/7638>. Consulté le 10 août 2025.

Tebaldi, C., & Sansó, B. (2008). Joint Projections of Temperature and Precipitation Change from Multiple Climate Models : A Hierarchical Bayesian Approach. *Journal Of The Royal Statistical Society*, 172(1), 83–106. <https://doi.org/10.1111/j.1467-985X.2008.00545.x>.

Trigo, R. M., García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, I. F., & Valente, M. A. (2005). How exceptional was the early August 2003 heatwave in France ? *Geophysical Research Letters*, 32(10), L10701. <https://doi.org/10.1029/2005gl022410>.

Van Vuuren, D. P., Den Elzen, M. G. J., Lucas, P. L., Eickhout, B., Strengers, B. J., Van Ruijven, B., Wonink, S., & Van Houdt, R. (2007). Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. *Climatic Change*, 81, 119–159. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9172-9>.

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenović, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways : an overview. *Climatic Change*, 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

Wise, M., Calvin, K., Thomson, A., Clarke, L., Bond-Lamberty, B., Sands, R., Smith, S. J., Janetos, A., & Edmonds, J. (2009). Implications of Limiting CO₂ Concentrations for Land Use and Energy. *Science*, 324(5931), 1183–1186.
<https://doi.org/10.1126/science.1168475>.

WMO (World Meteorological Organization). (1990). *Commission for Instruments and Methods of Observation : Abridged final report of the tenth session* (WMO-No. 727). Résumé Technique. Bruxelles : World Meteorological Organization, 125 p.
<https://library.wmo.int/idurl/4/41767>. Consulté le 10 août 2025.

WTO (World Tourism Organization). (2024). *International Tourism Highlights, 2024 Edition*. Rapport Annuel. Madrid : UN Tourism, 27 p.
<https://doi.org/10.18111/9789284425808>.

WTTC (World Travel & Tourism Council). (2024). *World Economic Impact Report*. Rapport Annuel. WTTC. <https://researchhub.wttc.org/product/world-economic-impact-report>. Consulté le 10 août 2025.

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2(6), 851–870.
<https://doi.org/10.1002/wcc.147>.