INSPQ
INSTITUT NATIONAL
DE SANTÉ PUBLIQUE
DU QUÉBEC

Systèmes de détection et cartographie des pollens allergènes et des risques associés

ÉTAT DES CONNAISSANCES

MAI 2026

SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES

Québec

AUTEUR

Charles Prisca Samba, conseiller scientifique
Bureau d'information et d'études en santé des populations

SOUS LA COORDINATION SCIENTIFIQUE DE

Marie-Jo Ouimet, médecin spécialiste
Direction de la santé environnementale, au travail et de la toxicologie

COLLABORATION

Cassandra Lévesque-Vézina, conseillère scientifique
Jérôme Martinez, coordonnateur de l'Équipe Développement et courtage des connaissances
Patrick Poulin, conseiller scientifique spécialisé
Marie-Eve Dubuis, coordonnatrice de l'Équipe scientifique sur l'air
Direction de la santé environnementale, au travail et de la toxicologie

Geneviève Grenier, conseillère scientifique
Madalina Burtan, conseillère scientifique
Secrétariat général

RÉVISION

Alain Robichaud, météorologiste (recherche qualité de l'air)
Environnement et Changement climatique Canada

Bernard Clot, chef d'équipe Biométéorologie
Fiona Tummon, collaboratrice scientifique
MétéoSuisse

Les personnes qui ont révisé ce document ont été conviées à apporter des commentaires sur la version préfinale et en conséquence, n'en ont pas révisé ni endossé le contenu final.

L'auteur ainsi que les membres du comité scientifique et les personnes qui ont révisé le document ont dûment rempli leurs déclarations d'intérêts et aucune situation à risque de conflits d'intérêts réels, apparents ou potentiels n'a été relevée.

RELECTURE ET MISE EN PAGE

Aurélie Franco, agente administrative
Direction de la santé environnementale, au travail et de la toxicologie

Les reproductions à des fins d'étude privée ou de recherche sont autorisées en vertu de l'article 29 de la Loi sur le droit d'auteur. Toute autre utilisation doit faire l'objet d'une autorisation du gouvernement du Québec qui détient les droits exclusifs de propriété intellectuelle sur ce document. Cette autorisation peut être obtenue ou en écrivant un courriel à : droits.dauteur.inspq@inspq.qc.ca.

Les données contenues dans le document peuvent être citées, à condition d'en mentionner la source.

Dépôt légal – 2e trimestre 2026
Bibliothèque et Archives nationales du Québec
ISBN : 978-2-555-03847-9 (PDF)
DOI : https://doi.org/10.64490/MGTN6610

© Gouvernement du Québec (2026)

AVANT-PROPOS

L'Institut national de santé publique du Québec est le centre d'expertise et de référence en matière de santé publique au Québec. Sa mission est de soutenir le ministre de la Santé et des Services sociaux dans sa mission de santé publique. L'Institut a également comme mission, dans la mesure déterminée par le mandat que lui confie le ministre, de soutenir Santé Québec, la Régie régionale de la santé et des services sociaux du Nunavik, le Conseil cri de la santé et des services sociaux de la Baie James et les établissements, dans l'exercice de leur mission de santé publique.

La collection *État des connaissances* rassemble sous une même bannière une variété de productions scientifiques qui synthétisent et communiquent ce que la science nous dit sur une question donnée à l'aide de méthodes rigoureuses de recension et d'analyse des écrits scientifiques et autres informations pertinentes.

La présente synthèse des connaissances porte sur les systèmes de détection et la cartographie des pollens allergènes en suspension dans l'air ambiant. Elle s'adresse au personnel professionnel du réseau de la santé publique du Québec et ses partenaires, ainsi qu'aux acteurs et actrices des instances gouvernementales et non gouvernementales concernés par la pollution de l'air en pollens allergènes.

Ce projet est financé dans le cadre de l'action « Cartographier et diffuser les risques comme les îlots de chaleur, les pollens allergènes et les zoonoses » du Plan pour une économie verte 2030 (PEV 2030), laquelle vise à appuyer les différents acteurs et actrices et la population pour mieux prévoir les risques et les vulnérabilités en santé des populations, mieux planifier l'adaptation et mieux communiquer ces risques avec les parties prenantes, à l'aide de cartes accessibles à tous.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX ..... **VI**

LISTE DES FIGURES ..... **VII**

GLOSSAIRE ..... **VIII**

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES **1**

MESSAGES CLÉS **2**

RÉSUMÉ **4**

1 INTRODUCTION **8**

1.1 Le pollen et ses allergènes 8

1.2 Allergie et retombées sanitaires et économiques 8

1.3 Quantification de l'exposition aux pollens 9

1.4 Suivi des pollens allergènes au Québec 9

1.5 Objectifs du rapport 11

2 MÉTHODOLOGIE **12**

2.1 Stratégie de recherche 12

2.2 Critères de sélection 12

2.3 Tri et extraction des données 13

3 RÉSULTATS **16**

3.1 Méthodes de mesure et d'analyse des pollens allergènes 16

3.1.1 Méthodes manuelles de mesure de pollens 16

3.1.2 Méthode automatisée de mesure de pollens 19

3.2 Méthodes de cartographie de pollen 23

3.2.1 Cartographie des sources de pollens aéroportés 23

3.2.2 Cartographie des mesures de pollen dans l'air 32

3.3 Cartographie des risques d'allergie et des effets de santé liés aux pollens allergènes 39

4 DISCUSSION **42**

4.1 Méthode de détection de pollen allergène 42

4.1.1 Biais et limites des études sur les méthodes de détection de pollen 43

4.1.2 Portrait des méthodes d'échantillonnage et d'analyse des pollens allergènes au Québec 44

4.2 Cartographie de pollens 47
4.2.1 Cartographie de sources d'émission de pollen 47
4.2.2 Méthodes de cartographie du niveau de pollen dans l'air 54
4.3 Cartographie des risques d'allergie, des symptômes et de la sensibilisation allergique au pollen : une approche complémentaire 58
4.3.1 Biais et limites des études sur la cartographie des risques d'allergie, des symptômes et de la sensibilisation allergique au pollen 58
4.3.2 Portrait d'application au Québec des méthodes de cartographie des symptômes et de la sensibilisation allergique au pollen 59
4.4 Biais et limites générales de la présente revue de littérature 60
5 CONCLUSION 61
RÉFÉRENCES 63
ANNEXE 1 TABLEAUX ASSOCIÉS À LA STRATÉGIE DE RECHERCHE 74
ANNEXE 2 DÉTAILS SUR DES APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES 75
ANNEXE 3 GRILLE D'EXTRACTION 76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Bases de données consultées 12
Tableau 2 Critères de sélection pour les articles et documents retenus 14
Tableau 3 Propriétés physiques des capteurs qui fournissent des échantillons pour la détection des allergènes 18
Tableau 4 Nombre de capteurs et de systèmes de détection automatisée en Amérique du Nord 22
Tableau 5 Comparaison des dispositifs de mesure de pollens 46
Tableau 6 Comparaison des méthodes de cartographie de sources de pollen 51
Tableau 6 Comparaison des méthodes de cartographie de sources de pollen (suite) 52
Tableau 7 Comparaison des méthodes de cartographie des niveaux d'abondance pollinique 53

Tableau A1-1 Concepts et mots-clés 74
Tableau A3-1 Système de détection automatisée 76
Tableau A3-2 Cartographie de sources de pollen : approche ascendante 78
Tableau A3-3 Cartographie de sources de pollen : approche descendante 81
Tableau A3-4 Cartographie de sources de pollen : approche écologique 83
Tableau A3-5 Cartographie de sources de pollen : apport de la télédétection 87
Tableau A3-6 Cartographie de concentrations polliniques : modèle théorique 88
Tableau A3-7 Cartographie de concentrations polliniques : modèle empirique 92

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Calendrier des pollens allergènes au Québec 10
Figure 2 Organigramme PRISMA illustrant les résultats des étapes principales de la sélection des études 15
Figure 3 Distribution spatiale des stations de pollen en Amérique du Nord 22
Figure 4 Niveau d'infestation de l'herbe à poux le long du réseau routier de Saint-Jean-sur-Richelieu 25
Figure 5 Niveau du potentiel allergène des arbres de la ville de Montréal 26
Figure 6 Pourcentage d'infestation de l'ambroisie en Europe (10 km × 10 km) 27
Figure 7 Qualité de l'habitat de l'herbe à poux dans un contexte de changement climatique en Europe 28
Figure 8 Probabilité de présence de l'herbe à poux dans la ville de Detroit aux États-Unis sur une carte 16 m × 16 m 30
Figure 9 Début de la floraison d'essences de feuillus à travers le Royaume-Uni sur une carte de 1 km × 1 km 32
Figure 10 Distribution géographique des concentrations de pollen d'herbe à poux dans la RBP 35
Figure 11 Prévalence (en %) actuelle (période de référence) et future de la population générale sensibilisée à l'herbe à poux en Europe sur une carte de 50 km × 50 km 40
Figure 12 Correspondance des concentrations journalières de pollen et des niveaux de RAEP selon le degré d'envahissement du territoire par l'ambroisie 41
Figure 13 Région métropolitaine de recensement (RMR)/Agglomération de recensement (AR) et distribution géographique des stations d'échantillonnage de pollen répertoriées au Québec 47

GLOSSAIRE

Anémophile : mode de pollinisation par le vent.

Approche *Land Use Regression* : approche largement utilisée dans des études épidémiologiques pour quantifier l'exposition aux polluants atmosphériques, et qui offre une résolution spatiale fine. L'approche de type *Land Use Regression* quantifie, par le biais des modèles d'apprentissage automatique (forêts aléatoires) et d'analyse statistique (la régression multivariée), la relation mathématique entre les concentrations mesurées (observées) de pollen et les variables prédictives (ex. : l'utilisation des sols, les données météorologiques, la topographie, les mesures de la verdure, etc.). Les données de type environnemental associées aux variables prédictives sont générées à l'intérieur d'un cercle de rayon *r* autour de chaque station de mesure. Cette préparation des données est effectuée à l'aide d'un système d'information géographique.

Carte choroplèthe : carte thématique où les unités géographiques (ex. : régions) sont colorées ou remplies d'un motif qui représente une mesure statistique (ex. : concentration de pollen).

« Cokrigeage » : méthode qui consiste à estimer les valeurs de la variable principale (ex. : concentration journalière de pollen) à certains endroits où elles n'ont pas été mesurées. Le « cokrigeage », en plus d'utiliser les valeurs mesurées de la variable principale, intègre des variables indépendantes dont les mesures couvrent tout le territoire à l'étude. De façon générale, les variables indépendantes ou secondaires sont réputées être corrélées avec la variable principale. (https://www.publichealth.columbia.edu/research/population-health-methods/kriging-interpolation)

Compte pollinique : comptage du nombre de grains de pollen à partir d'échantillons fournis par des capteurs de mesure de pollen dans l'air.

Indice de thermicité compensé : indice bioclimatique permettant d'évaluer l'intensité du froid hivernal comme un facteur limitant le développement de nombreuses plantes. Cet indice prend en compte les excès de chaleur et de froid qui se produisent respectivement sur des territoires soumis aux climats hyperocéanique et hypercontinental afin de permettre la comparaison entre les territoires(1).

La logique floue : technique d'intelligence artificielle qui tente de se rapprocher du mode de raisonnement humain pour modéliser des phénomènes complexes ou incertains. Elle s'intéresse à la prédiction d'une variable catégorielle (ex. : présence ou absence de l'herbe à poux) et dont l'information de sortie est la probabilité qui peut s'exprimer par différentes valeurs intermédiaires situées entre deux extrêmes (un/zéro, oui/non, vrai/faux, etc.) (2,3).

Maxent : modèle de répartition des espèces basé sur l'apprentissage automatique. Ce modèle permet de prédire la probabilité de présence d'une plante sur un territoire.

Modèle météo-chimie : modèle de prévision météorologique et de la qualité de l'air aussi bien à l'échelle régionale, qu'urbaine.

MTCI : indice basé sur les données fournies par un spectromètre imageur à moyenne résolution (MERIS), autrefois à bord de la mission spatiale Envisat. Le MTCI est directement lié à la teneur en chlorophylle du couvert végétal(4).

Phénologie : étude de l'influence du climat (ex. : les changements saisonniers) sur l'occurrence de phénomènes annuels comme la feuillaison, la floraison, le gel, le dégel, etc.

Prélèvement cyclonique : échantillonnage consistant à recueillir sur un substrat les particules en suspension dans l'air dont les diamètres aérodynamiques ne dépassent pas le diamètre de coupure du capteur.

Prélèvement par impaction : échantillonnage consistant à piéger sur une plaque les particules en suspension selon leur inertie (fonction de la vitesse et de la masse des particules).

Sensibilisation : une première étape dans le développement d'une allergie. Elle se produit à la suite de l'exposition aux allergènes. Une personne sensibilisée produit des anticorps IgE, mais ne présente pas nécessairement de symptômes d'allergie.

Somme saisonnière de pollen : somme des concentrations polliniques quotidiennes pendant la saison pollinique.

Somme annuelle de pollen : somme des concentrations polliniques quotidiennes pendant toute l'année.

Système NEXRAD (*Next Generation Weather Radar*) : réseau de 160 radars météorologiques Doppler en bande S à haute résolution, exploités conjointement par le National Weather Service, la Federal Aviation Administration et l'U.S. Air Force. Le système NEXRAD détecte les précipitations et le vent, et ses données peuvent être traitées pour cartographier les schémas et les mouvements des précipitations (https://www.ncei.noaa.gov/products/radar/next-generation-weather-radar).

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AA	Apprentissage automatique
ART	*Aerosols and Reactive Trace gases*
AUC	*Area Under the Curve*
AUROC	*Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve*
CO_2	Dioxyde de carbone
DEL	Diode électroluminescente
GBIF	*Global Biodiversity Information Facility*
IAP	*Integral Annual Pollen*
INSPQ	Institut national de santé publique du Québec
LED	*Light Emitting Diode*
LUR	*Land Use Regression*
MDE	Modèles de distribution des espèces
MNE	Modèle numérique d'élévation
MSSS	Ministère de la Santé et des Services sociaux
NDVI	*Normalized Difference Vegetation Index*
OPALS	*Ogren Plant Allergy Scale*
PCR	*Polymerase Chain Reaction*
qPCR	Quantitative PCR
R	Coefficient de corrélation
R2	Coefficient de détermination
RCP	*Representative Concentration Pathways*
RNSA	Réseau national de surveillance aérobiologique
SILAM	*System for Integrated modeling of Atmospheric composition*
SAPMQA	Système adapté de prévision météorologique et de la qualité de l'air
UdeM	Université de Montréal

MESSAGES CLÉS

Cette publication porte sur les systèmes de détection et les méthodes de cartographie des pollens allergènes et des risques sanitaires associés. Les informations utiles au développement de ce document ont été colligées par l'entremise d'une revue de la littérature ayant permis d'identifier les articles et les documents ayant été publiés sur le sujet au cours de la période 2014 à 2023. Les constats généraux de cette revue sont présentés ci-dessous :

- Les réseaux de suivi de pollens allergènes opérant avec des capteurs de prélèvements manuels demeurent les plus répandus à travers le monde en raison du moindre coût d'acquisition de ces équipements et, surtout, de la disponibilité des protocoles standardisés décrivant les étapes de mesure et d'analyse des échantillons de pollens prélevés.
- L'intégration de capteurs dits automatiques dans des réseaux existants est en constante augmentation. En comparaison avec les capteurs de prélèvements manuels, leur utilisation et leur entretien nécessitent très peu d'intervention humaine, donc les coûts d'exploitation associés à un réseau opérant ce type de capteurs peuvent être plus aisément amortis sur le long terme. Bien que ces capteurs soient capables de fournir les données en temps quasi réel, ils ne sont pas encore en mesure d'identifier une grande variété de pollens allergènes dans l'air ambiant.
- La cartographie de la répartition géographique des plantes émettrices de pollen s'effectue à l'aide des approches dites ascendante, descendante ou écologique. Aucune approche n'est nécessairement meilleure ou mauvaise. Le choix de l'une d'entre elles peut dépendre du territoire d'étude ou des objectifs.
- L'approche ascendante est basée principalement sur l'inventaire de certaines espèces allergènes, lequel précise leur localisation géographique, leur potentiel allergène ainsi que la proportion du territoire qu'elles occupent sur une grille d'analyse spatiale donnée.
- L'approche descendante détermine, pour sa part, la densité de la plante dans une grille d'analyse spatiale donnée à partir de niveaux annuels d'abondance pollinique, de cartes des catégories d'utilisation du sol et d'avis experts concernant la distribution de la plante d'intérêt dans son habitat. Elle est moins pertinente pour les régions fortement dominées par des pollens transportés par le vent en provenance de sources lointaines (100 à 1 000 km).
- L'approche écologique prédit, quant à elle, la probabilité de présence et la qualité de l'habitat des espèces allergènes à l'aide des modèles statistiques (ou d'intelligence artificielle) ou théoriques.
- La cartographie de la variation spatiale des concentrations de pollen dans l'air s'effectue grâce à la modélisation statistique ou par le biais des systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air.

- Lorsqu'utilisés de concert, l'approche écologique et les modèles climatiques globaux ou régionaux, au sein desquels des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'expansion de graines de la plante sont exploités, sont en mesure de simuler, selon le climat projeté, l'expansion de l'aire géographique d'une espèce allergène ainsi que les concentrations de pollen dans l'air associées.
- Ensemble, les données de concentrations de pollen dans l'air, les observations cliniques, les données autorapportées concernant les prévalences et les symptômes de la rhinite allergique saisonnière constituent une assise documentaire indispensable pour cartographier les variations spatiales des risques sanitaires liés à l'exposition aux pollens allergènes.
- La prédiction personnalisée des symptômes de la rhinite allergique un jour à l'avance est possible à l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique, alimentés par les concentrations journalières (ou annuelles) mesurées ou prédites, ainsi que par la prévalence des symptômes propres à chaque patient ou patiente.

RÉSUMÉ

Mise en contexte

La hausse des concentrations de pollens allergènes dans l'air, causée notamment par les changements climatiques et l'accroissement des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, peut accroître le fardeau des maladies allergiques à l'échelle populationnelle. Les symptômes associés à la rhinite allergique sont d'ailleurs reconnus pour occasionner une détérioration de la qualité de vie des personnes touchées. De plus, les dépenses directes en lien avec le contrôle des allergies liées au pollen, couvertes par le système public de santé, ainsi que celles assumées par les individus pour l'achat des médicaments, sont en constante augmentation.

En réponse à cet important enjeu de santé publique, un mandat a été confié par le ministère de la Santé et des Service sociaux à l'Institut national de santé publique du Québec dans le cadre de l'action A1-010 du Plan pour une économie verte 2030 du gouvernement du Québec (ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs). C'est d'ailleurs dans la foulée de la réalisation de ce mandat qu'il a d'abord été jugé opportun d'assembler un corpus de connaissances solides et actualisées sur les systèmes de détection des pollens allergènes, de même que sur la cartographie de l'exposition aux pollens et des risques sanitaires associés. Ces connaissances serviront éventuellement à orienter le choix des outils et des méthodes à déployer dans le cadre du développement d'un réseau officiel de suivi des pollens allergènes dans l'air extérieur au Québec. L'objectif du présent ouvrage est donc de documenter les méthodes de détection et de cartographie de pollens allergènes ainsi que des risques sanitaires associés.

Méthodologie

Une revue de la littérature narrative systématisée a été effectuée pour répondre au mandat confié à l'Institut national de santé publique du Québec. La stratégie de recherche documentaire préconisée couvrait trois thématiques : 1) les méthodes de mesure et d'analyse des pollens allergènes; 2) les méthodes de cartographie et de diffusion de l'information concernant l'exposition humaine aux pollens allergènes et les risques sanitaires associés; 3) les réseaux de suivi continu de pollens allergènes. Enfin, les articles et les documents considérés devaient être rédigés en anglais ou en français et avoir été publiés entre 2014 et 2023.

Résultats

Les thèmes couverts par les 99 études retenues se déclinent comme suit : 43 études portaient sur les méthodes de mesure et d'analyse des pollens allergènes, 49 sur les méthodes de cartographie de sources de pollen, des concentrations polliniques et des risques sanitaires associés et sept sur les réseaux de suivi continu de pollen.

Méthodes manuelles de mesure et d'analyse des pollens

Les études ont révélé que deux types de capteurs de prélèvements manuels sont fréquemment utilisés dans les réseaux de suivi continu de pollen dépendamment du lieu géographique où ils opèrent de tels dispositifs : le capteur volumétrique de type Hirst (ex. : *Burkard Volumetric Spore Sampler)* en Europe et le capteur rotatif à impaction en Amérique du Nord. Alors que le capteur volumétrique de type Hirst offre une performance optimale en présence de vent de faible vitesse, le capteur rotatif à impaction de type Rotorod est jugé davantage performant en présence de vents de vitesse modérée. À la suite des prélèvements de pollens par ces types de capteurs, les échantillons sont examinés à l'aide d'un microscope optique par du personnel qualifié pour identifier et dénombrer les grains de pollen ainsi prélevés. Les comptes polliniques fournis par le capteur volumétrique de type Hirst (Burkard) et le capteur rotatif à impaction de type Rotorod diffèrent très peu pour la grande majorité de pollens d'arbres, de graminées et d'herbacées.

Les méthodes automatisées de mesure des pollens

Les capteurs dits automatiques intègrent la reconnaissance automatique des pollens par l'analyse d'images microscopiques et des propriétés spectrales ou optiques des grains de pollen. Ces méthodes ont l'avantage de rendre disponibles les données en temps quasi réel. Les capteurs dits automatiques intègrent dans leurs structures de production de données les étapes de mesure et d'analyse des échantillons, s'exécutant de façon séquentielle pour identifier et quantifier les pollens en suspension dans l'air.

Méthodes de cartographie des pollens

Les études retenues ont mis en évidence trois principales approches qui permettent de cartographier les sources émettrices de pollens aéroportés : approche ascendante, descendante et écologique. **L'approche ascendante** est basée sur l'inventaire des plantes émettrices de pollens allergènes, lequel précise leur localisation géographique ainsi que certaines informations spécifiques à l'espèce comme le potentiel allergène, la valeur du potentiel allergène ainsi que la proportion d'une espèce végétale présente dans une grille territoriale donnée. **L'approche descendante** combine les observations polliniques avec les catégories d'occupation du sol pour déterminer la densité de la plante dans une grille d'analyse spatiale donnée. Les études ont montré que la densité estimée et celle observée diffèrent peu. **L'approche écologique** est basée sur des modèles de distribution des espèces dits empiriques et théoriques. Elle consiste à prédire la qualité d'un milieu où les conditions climatiques ou environnementales sont propices au développement et à la persistance d'une plante. Les modèles de distribution des espèces dits empiriques combinent les observations de la présence de la plante en milieu naturel avec des variables environnementales. Une étude a montré que la bande verte de l'image satellitaire de très haute résolution spatiale avait un potentiel élevé de prédiction de la présence d'herbe à poux. Les modèles de distribution des espèces dits théoriques reposent sur des expressions théoriques décrivant le développement ou la persistance de la plante en fonction des facteurs environnementaux. Un des avantages des modèles de distribution des espèces dits théoriques est de simuler la distribution de la plante (ex. : ambroisie) dans un futur proche ou lointain.

La modélisation des concentrations de pollen dans l'air est réalisée par le biais des modèles empiriques et des systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air. **Les modèles empiriques** s'appuient sur les méthodes statistiques ou d'apprentissage automatique qui permettent d'inférer les concentrations ou les probabilités de concentration pollinique à partir d'observations polliniques antérieures et d'indicateurs dérivés de données météorologiques (ex. : température moyenne). Ces modèles sont assez robustes lorsque les observations polliniques affichent une moins forte variabilité interannuelle des concentrations de pollen, et surtout lorsque d'autres variables comme la distribution des espèces et les catégories d'utilisation du sol sont intégrées dans ces modèles.

Les systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air constituent une adaptation des systèmes de prévision numérique du temps visant à prédire les concentrations de pollens allergènes de l'air ambiant, au sein desquels sont intégrés les modèles d'émission des pollens cibles. Ces derniers visent plus spécifiquement à prévoir la production et la libération de pollen ainsi qu'à reconstituer son trajet de la source (ex. : plante) jusqu'au capteur de mesure. Les modèles d'émission pollinique prennent en compte les conditions météorologiques, les paramètres phénologiques et la cartographie détaillée de sources de pollens de la région d'intérêt. Les systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air sont ainsi en mesure de produire des cartes illustrant la variation spatio-temporelle de concentrations de pollens dans l'air en climat actuel et projeté.

La cartographie de la sensibilisation allergique au pollen

La sensibilisation allergique aux pollens allergènes constitue un facteur de risque important au regard des allergies saisonnières. Les cartes illustrant la distribution spatiale de la prévalence de la sensibilisation allergique à l'herbe à poux, sous les conditions climatiques actuelles ou futures, ont été générées en Europe. Une relation établie entre la prévalence annuelle des manifestations allergiques rapportée par la littérature et la concentration annuelle de pollen spécifiques à chaque site (ex. : pays) a permis de convertir les cartes des comptes polliniques annuels (prédits à l'aide des systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air) en cartes de répartition actuelle ou projetée de la prévalence de sensibilisation allergique et du nombre présumé de personnes sensibilisées à l'herbe à poux.

La prédiction personnalisée des symptômes de la rhinite allergique un jour à l'avance est possible à l'aide des algorithmes d'apprentissage automatique, alimentés par les concentrations journalières (ou annuelles) mesurées ou prédites ainsi que la prévalence de symptômes spécifiques à chaque patient ou patiente. Ce dernier est notamment déterminé à partir de l'analyse de la sévérité des symptômes journaliers autorapportés. Les alertes personnalisées sont diffusées par l'intermédiaire d'une application mobile auprès des personnes ayant rapporté leurs symptômes. Ce type de service a montré des résultats concluants en Lituanie et en Lettonie, et peut aider les personnes concernées à mieux planifier les mesures thérapeutiques.

Application au Québec

Au Québec, le suivi des pollens allergènes est principalement réalisé par une entreprise privée, au moyen de trois stations équipées par de capteurs de type Rotorod et installées dans les villes de Montréal, de Québec et de Sherbrooke. Il existe également des stations de pollens dédiées principalement à la recherche académique opérées par des instances universitaires. À ce jour, aucune station n'opère avec des capteurs dits automatiques. Ainsi, au regard de la configuration actuelle du réseau de suivi des pollens allergènes, il serait utile d'ajouter de nouvelles stations équipées de capteurs de prélèvements manuels dans certaines zones pour renforcer le maillage intégral du réseau à l'échelle de la province. Quant à la question du nombre de stations nécessaires pour couvrir la totalité de la province, celui-ci devrait minimalement rehausser la situation actuelle, mais des études complémentaires devraient être menées pour l'estimer plus précisément. L'utilisation des capteurs automatiques étant récente, leur intégration au réseau pourrait se faire progressivement après une campagne de validation de leur efficacité en contexte québécois.

Aucune approche méthodologique idéale n'émerge de cette revue au regard de la cartographie des sources de pollen, du niveau d'abondance pollinique ainsi que des risques sanitaires liés à l'exposition aux pollens. Bien que l'approche ascendante soit utilisée au Québec par les municipalités, l'application de l'approche écologique et des systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air, assumant une incertitude intrinsèque au regard des résultats modélisés, semblent répondre aux objectifs dans le cadre de l'action A1-010 du Plan pour une économie verte 2030 (PEV 2030).

Conclusion

Dans un contexte de changements climatiques, les données recueillies par l'exploitation des méthodes décrites dans ce rapport pourraient s'avérer utiles dans l'élaboration des mesures populationnelles de prévention et de contrôle des risques sanitaires liés aux pollens allergènes pour mieux orienter les messages et les interventions de santé publique.

1 INTRODUCTION

Les pollens allergènes dispersés dans l'air lors des saisons polliniques peuvent provoquer chez les personnes sensibilisées des réactions allergiques, telles que la rhinite allergique saisonnière (aussi appelée rhume des foins), la conjonctivite allergique ou l'asthme allergique (5). Ces maladies respiratoires chroniques, en particulier la rhinite saisonnière et l'asthme allergique, soulèvent un enjeu important de santé publique dans les pays industrialisés en raison du nombre croissant de personnes touchées. En effet, en dehors de la qualité de vie de ces dernières (ex. : l'absentéisme au travail) qui est altérée, les dépenses directes couvertes par le système de santé (ex. : hospitalisations pour l'asthme) ainsi que celles associées à l'achat des médicaments sont en constante augmentation et pourraient s'accroître davantage en raison des changements climatiques (6–10).

1.1 Le pollen et ses allergènes

Les allergènes de pollen sont constitués de protéines qui, une fois inhalées, sont libérées (à la suite de leur hydratation) dans les muqueuses respiratoires des individus exposés. En outre, les allergènes de pollen peuvent directement être libérés dans l'atmosphère sous la forme des particules de petite taille capables d'atteindre les voies respiratoires inférieures. La libération des allergènes est favorisée notamment par la rupture des grains de pollen (ex. : fissures sur la surface) en raison de conditions atmosphériques défavorables au maintien de leur intégrité (ex. : vitesse de vent, taux d'humidité élevée, pollution de l'air, etc.) (5,11).

Les allergènes de pollen peuvent demeurer dans l'air pendant une période prolongée et être transportés par le vent sur de longues distances (des centaines ou des milliers de kilomètres) (12,13).

Notons que ce sont les allergènes portés par les grains de pollen qui induisent le développement des symptômes allergiques. De ce fait, des groupes de recherche ont souligné l'importance d'échantillonner et d'analyser les allergènes de pollen afin de fournir des données de qualité à des fins de recherche (5,14,15).

1.2 Allergie et retombées sanitaires et économiques

Au Québec, le coût global associé aux allergies causées par l'exposition aux pollens d'herbe à poux pendant l'année 2005 était de 156 millions de dollars. Plus de la moitié du coût global était associée à l'absentéisme et à l'incapacité, à la consultation d'un professionnel ou professionnelle de la santé et aux achats de médicaments ainsi que de purificateur d'air intérieur du domicile (16–18). En raison des effets des changements climatiques, l'allergie au pollen de l'herbe à poux pourrait occasionner des dépenses de 359 et de 477 millions de dollars en 2065, respectivement pour le gouvernement et la société au Québec (18). Les symptômes de la rhinite allergique saisonnière sont à même de restreindre la qualité de vie et la productivité au travail ou à l'école des personnes touchées. En effet, les symptômes de rhinite allergique saisonnière peuvent causer de la fatigue, de l'irritabilité, des problèmes de sommeil et des problèmes de

concentration (19). En outre, selon les données autorapportées dans les enquêtes populationnelles (EQSP[1] de 2020-2021), la prévalence de la rhinite allergique saisonnière était de 20 % au Québec chez les 15 ans et plus. Plusieurs groupes de chercheurs ont rapporté que dans un contexte de changement climatique, marqué par la hausse des concentrations de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'air et des températures moyennes, de plus grandes quantités de pollens allergènes seront libérées dans l'atmosphère, ce qui pourrait contribuer à augmenter la prévalence et la sévérité des maladies allergiques (20–22).

1.3 Quantification de l'exposition aux pollens

La mesure des concentrations de pollens allergènes en suspension dans l'air constitue une démarche clé des interventions à caractère sanitaire, puisqu'elle peut outiller les professionnels et professionnelles de la santé et les personnes allergiques dans la gestion efficace des mesures préventives et thérapeutiques (23–26). Cette mesure est obtenue à partir d'un ensemble d'étapes ou de méthodes répondant aux normes et aux protocoles élaborés par les instituts de recherche de même que les organismes régionaux, nationaux ou internationaux de suivi de pollens. Parmi les étapes charnières de cette procédure, citons la collecte, l'identification, le classement, le comptage de grains de pollen ainsi que la prévision des concentrations de pollens dans l'atmosphère.

L'échantillonnage de pollens est effectué au moyen des capteurs installés généralement dans des stations qui peuvent être situées sur les toits des bâtiments, soit généralement entre deux et 30 mètres au-dessus du sol (27–29). L'identification, le classement ainsi que le dénombrement des grains de pollen à partir d'un échantillon fourni par des capteurs de prélèvements manuels, sont depuis longtemps réalisés par du personnel qualifié au moyen d'un microscope optique; démarche nécessitant parfois quelques jours d'analyse par échantillon avant de pouvoir obtenir l'information convoitée (30–32). Aussi, au cours de la décennie, la prolifération de technologies de détection de pollens et d'automatisation des analyses a été remarquable. Certaines technologies ont abouti au développement de capteurs dits automatiques, dont certains sont déjà intégrés dans différents réseaux de suivi de pollens à travers le monde (33,34). Les concentrations ou les comptes polliniques mesurés aux points d'observations (stations), ainsi que celles estimées par modélisation (ex. : numérique atmosphérique) et publiées notamment sous forme de cartes, permettent entre autres de mesurer les risques sanitaires actuels et futurs associés.

1.4 Suivi des pollens allergènes au Québec

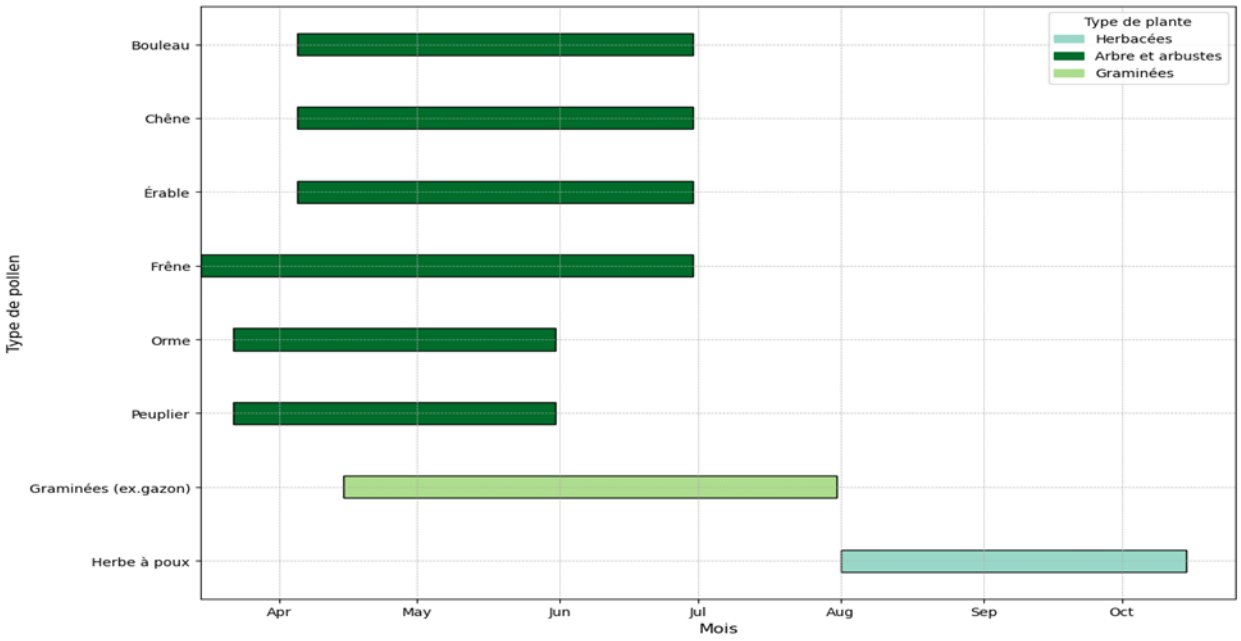
Au Québec, le suivi continu des pollens d'arbres, de graminées et d'herbacées est principalement réalisé par une entreprise privée, au moyen de trois stations installées dans les villes de Montréal, de Québec et de Sherbrooke. Les prévisions polliniques résultant de la modélisation des concentrations journalières de pollen sont ensuite diffusées au public à l'aide de différents canaux de communication (télévision, radio, médias sociaux) (35). Par ailleurs,

[1] Enquête québécoise sur la santé de la population.

notons qu'il existe également des stations de pollens dédiées principalement à la recherche académique opérées par des instances universitaires (ex. : Université de Montréal et Université Bishop's).

Les dates de début et de fin de la saison de pollen peuvent varier selon l'année et le lieu géographique, et ce, en fonction du type de pollens. De façon générale, la saison pollinique débute à la mi-mars et se prolonge jusqu'à la mi-octobre. La figure 1 illustre l'étendue de la saison pour les pollens d'herbacées, de graminées et d'arbres (8).

Figure 1 Calendrier des pollens allergènes au Québec



Notes : Les données ont été compilées en utilisant trois sources, notamment :

- https://allerg.qc.ca/Information_allergique/2_3a_pollen.html
- https://www.meteomedia.com/
- https://www.aerobiology.ca/fr/collection-site/ville-de-quebec-quebec

La probabilité de présence ou la localisation des sources de pollens allergènes ainsi que l'estimation du potentiel allergène des espèces végétales concernées sont une autre source d'information visant à étudier l'exposition de la population aux plantes allergènes sur le court, moyen et long terme (36–40). Au Québec, ces informations, ainsi que l'abondance de pollens dans l'air, ne couvrent que quelques grandes villes et certaines catégories d'utilisation du sol (ex. : le long des axes routiers) à l'intérieur des villes de petite taille (ex. : Saint-Jean-sur-Richelieu). De plus, en raison des changements climatiques, une expansion territoriale de plusieurs types de plantes produisant du pollen allergène a été observée (41). Cela dit, dans le cadre de l'action A1-010 du Plan pour une économie verte du gouvernement du Québec (ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs [MELCCFP]) visant à cartographier et à diffuser les risques comme les îlots de chaleur

(42), les pollens allergènes et les zoonoses, un mandat a été confié par le ministère de la Santé et des Service sociaux (MSSS) à l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) en 2022. C'est d'ailleurs dans la foulée de la réalisation de ce mandat qu'il a été jugé opportun d'assembler d'abord un corpus de connaissances solides et actualisées sur les systèmes de détection des pollens allergènes, de même que la cartographie de l'exposition aux pollens et des risques sanitaires associés.

1.5 Objectifs du rapport

Bien qu'en 2013, l'INSPQ ait publié un document sur l'état des connaissances des pollens allergènes, certaines thématiques (facteurs de risque liés aux allergies au pollen ou mesure et cartographie de risques d'allergie) n'ont pas été abordées de façon exhaustive. Afin d'assembler un recueil de connaissances solides et actualisées en lien avec les pollens allergènes, un autre état des connaissances portant sur les facteurs de risque environnementaux et individuels liés aux allergies aux pollens a été publié en septembre 2025.

Le présent rapport s'inscrit dans la même démarche. Ainsi, l'objectif principal est d'effectuer un état des connaissances sur les méthodes de détection et de cartographie des pollens allergènes ainsi que de leurs risques sur la santé.

Les thématiques de recherche abordées dans ce rapport sont :

- les méthodes d'échantillonnage et les technologies de détection des pollens allergènes;
- les approches méthodologiques de cartographie de l'exposition au pollen ainsi que des risques sanitaires associés.

Question de recherche

La principale question de recherche abordée dans cette revue est la suivante : « Quels sont les outils de suivi continu et de cartographie des pollens allergènes ainsi que des risques sanitaires associés et quelles expériences ou pratiques ressortent quant au suivi environnemental du pollen? »

La question principale peut ensuite se décliner en deux sous questions :

1. Quelles sont les méthodes de mesure et de cartographie des pollens allergènes ainsi que des risques d'allergies liés à l'exposition au pollen?
2. Quelles sont les bonnes pratiques documentées ailleurs dans le monde en ce qui a trait au suivi environnemental des pollens allergènes?

Ces connaissances serviront à orienter le choix des outils et des méthodes dans le cadre du développement d'un réseau officiel de suivi des pollens allergènes dans l'air extérieur au Québec.

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 Stratégie de recherche

La stratégie de recherche documentaire portait plus spécifiquement sur trois thématiques : 1) les méthodes de mesure et d'analyse des pollens allergènes; 2) les méthodes de cartographie et de diffusion de l'information concernant l'exposition humaine aux pollens allergènes et les risques sanitaires associés; 3) les meilleures pratiques concernant le suivi environnemental des pollens allergènes. Les trois concepts utilisés ainsi que les mots-clés en français (comme en anglais), liés à chaque concept sont présentés dans le tableau 1. La stratégie de recherche documentaire a été élaborée avec les services documentaires de l'INSPQ et les bases de données ont été interrogées du 21 au 27 novembre 2023. La liste des bases de données et les dates pendant lesquelles elles ont été consultées sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous. Parallèlement, la littérature grise a été scrutée afin d'identifier des documents pertinents complémentaires tels que les thèses de doctorat ou les rapports d'organismes gouvernementaux et non gouvernementaux.

Tableau 1 Bases de données consultées

Base de données	Date d'interrogation
Medline (OVID)	2023-11-24
Embase (OVID)	2023-11-27
Global Health (OVID)	2023-11-27
CINHAL (EBSCO)	2023-11-27
Environment Complete (EBSCO)	2023-11-27
GreenFILE (EBSCO)	2023-11-27
OpenDissertations (EBSCO)	2023-11-24
IEEE Xplore Digital Library	2023-11-17
Science Direct	2023-11-21

2.2 Critères de sélection

Les études repérées pour cette revue de littérature devaient répondre à un certain nombre de critères pour être retenues. Premièrement, ces études devaient aborder au moins un des trois thèmes suivants : 1) les méthodes de mesure de pollens allergènes; 2) la cartographie de l'exposition humaine aux pollens allergènes ainsi que des risques sanitaires associés; 3) le suivi environnemental du pollen à l'aide des réseaux de capteurs de pollens.

Spécifiquement, les études concernant le premier thème devaient traiter de l'échantillonnage des pollens allergènes de provenance extérieure par l'entremise d'un réseau de capteurs. De plus, les études devaient également aborder les analyses des échantillons de pollen directement prélevés à partir d'un capteur ou d'un réseau de capteurs.

Quant aux études concernant le deuxième thème, elles devaient traiter d'approches méthodologiques en lien avec la cartographie de sources de pollen, des niveaux de pollen dans l'air et des risques sanitaires associés. Les études présentant des cartes illustrant la variation spatiale d'abondance pollinique ou de source de pollens dans le corps du texte ou en annexe ont été privilégiées.

Les études faisant mention des éléments en lien avec la configuration du réseau de capteurs, aussi bien dans le corps du texte qu'en annexe, ont été retenues pour ce qui est du troisième thème.

Afin de ne pas manquer des études pertinentes, le territoire d'études des articles et des documents répertoriés pour ces trois thèmes devait être les régions avec des pays industrialisés, notamment l'Europe, l'Amérique du Nord et l'Asie (en particulier la Chine et le Japon). Enfin, les articles et les documents devaient être rédigés en anglais ou en français et avoir été publiés entre 2014 et 2023 (voir tableau 2 p. 14). Quelques articles additionnels publiés en 2024 ont été récupérés sur la plateforme Google en raison de la pertinence de leur contenu par rapport au sujet à l'étude.

Les études portant exclusivement sur la prévision pollinique effectuée à l'aide des modèles empiriques ou théoriques, sans incorporer les cartes illustrant la variation spatiale des prévisions polliniques ou de sources de pollens, ont été exclues. De plus, plusieurs autres études ont également été exclues, notamment celles qui portaient principalement sur les analyses des échantillons de grains de pollen à des fins d'immunothérapie et de diagnostic des allergies, les méthodes d'identification des spores fongiques, les méthodes d'identification des grains de pollen encore au stade expérimental, les capteurs mobiles et les méthodes de cartographie sans préciser la résolution spatiale des cartes.

2.3 Tri et extraction des données

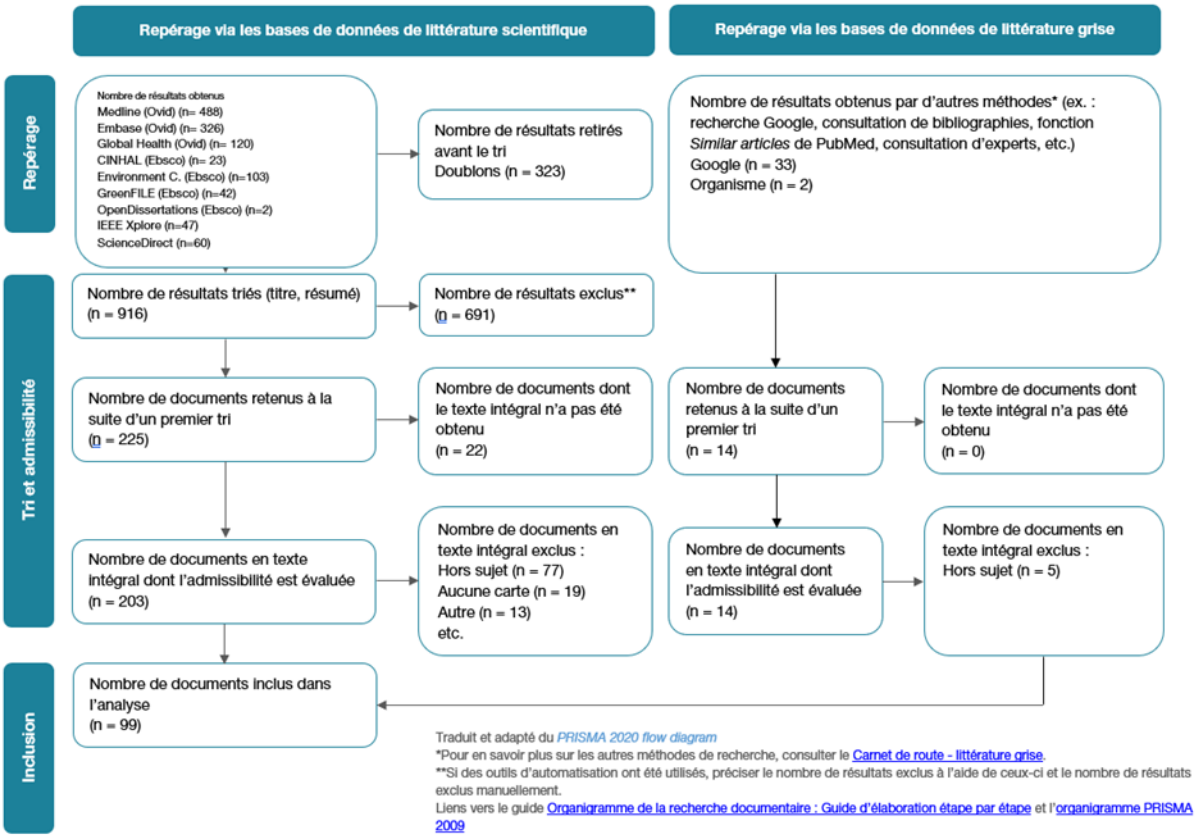
Le tri des articles et des documents a été réalisé par une personne. Le premier tri, basé sur la lecture des titres et des résumés des articles et des documents répertoriés, a été effectué dans un bassin de 916 études. Les études retenues à l'issue du premier tri ont ensuite été triées en procédant par une lecture complète des documents et des articles afin de s'assurer que ces derniers répondaient aux critères d'inclusion. Le deuxième tri était effectué en même temps que l'extraction de données à l'aide d'une grille d'extraction. La figure 2 (p. 15) montre, dans un diagramme PRISMA[2], les nombres d'études correspondant à chaque étape de tri ainsi que les raisons d'exclusion de certaines études.

[2] PRISMA : un organigramme de la recherche documentaire qui permet de présenter de façon schématique les étapes essentielles qui ont mené à l'exclusion et à l'inclusion d'un certain nombre d'études dans le cadre d'une recension des écrits (*Organigramme de la recherche documentaire* (santecom.qc.ca).

Tableau 2 Critères de sélection pour les articles et documents retenus

Critères d'inclusion	
Type d'étude	Études environnementales
Objets d'étude	• Méthodes de mesure et d'analyse des pollens allergènes • Méthodes de cartographie de l'exposition aux pollens et de risques sanitaires associés • Bonnes pratiques concernant le suivi environnemental continu des pollens allergènes
Langue	Français et Anglais
Période couverte	2014-2023
Zone d'étude	Amérique du Nord, Europe, Asie (Chine et Japon), Australie
Critères d'exclusion	
Type d'étude	Autres études
Type de publication	Article de colloque Éditoriaux Affiches scientifiques

Figure 2 Organigramme PRISMA illustrant les résultats des étapes principales de la sélection des études



Notes : « Hors sujet » : études ne répondant pas aux critères d'inclusion (ex. : études en lien avec les feux de forêt, abordant de façon très détaillée les aspects méthodologiques de cartographie) ; « Aucune carte » : études abordant les méthodes de cartographie sans illustrer la variation spatiale à travers les cartes ; « Autre » : études avec moins de rigueur scientifique (ex. : études avec des cartes ne respectant pas les règles de base de sémiologie[3] et de représentation cartographique).

[3] La sémiologie cartographique a pour but de transmettre des informations correctes et de produire une image cartographique facilement accessible au lecteur (réf. : https://www.union-habitat.org/sites/default/files/articles/pdf/2018-11/guide_insee.pdf).

3 RÉSULTATS

Les 99 études retenues dans le cadre de cette revue se répartissent comme suit : 43 études portant sur les méthodes de mesure et d'analyse des pollens allergènes, 49 études traitant des méthodes de cartographie et de diffusion de l'information et sept études concernant les réseaux de suivi continu de pollen allergène.

3.1 Méthodes de mesure et d'analyse des pollens allergènes

Parmi les 43 études traitant des méthodes de mesure et d'analyse des pollens allergènes, certaines décrivent les méthodes manuelles de mesure de pollen, incluant l'échantillonnage de pollens à l'aide des capteurs (cinq études primaires + un rapport) et les analyses effectuées sur un échantillon de grains de pollen (quatre études). Elles caractérisent également les méthodes automatisées qui permettent d'identifier et de dénombrer les grains de pollen, notamment les analyses en temps quasi réel sur un échantillon de pollen (17 études) et le principe de fonctionnement des capteurs dits automatiques (16 études).

3.1.1 Méthodes manuelles de mesure de pollens

Ces méthodes nécessitent une intervention humaine soutenue tant pendant l'étape d'échantillonnage de pollens que pendant l'étape d'identification et de dénombrement de grains de pollen (30–32).

3.1.1.1 Échantillonnage de pollens à l'aide des capteurs de prélèvements manuels

Deux types de capteurs de prélèvements manuels sont fréquemment utilisés dans les réseaux de suivi continu de pollen, dépendamment du lieu géographique : le capteur volumétrique de type Hirst (ex. : *Burkard volumetric spore sampler*) en Europe et le capteur rotatif à impaction en Amérique du Nord (34).

Capteur volumétrique de type Hirst

La vitesse d'aspiration de l'air du capteur volumétrique de type Hirst est de 10 L/min (équivalent à la respiration humaine au repos). Ce capteur, équipé d'un impacteur à fentes, peut échantillonner les grains de pollen pendant une semaine (sept jours) au maximum. Les grains de pollen aspirés par le capteur, à travers sa fente étroite, sont déposés sur la bande adhésive montée sur un tambour rotatif. Ce dernier est retiré à la fin de la période d'échantillonnage et découpé généralement en tranches de 48 mm, laquelle correspond à une journée d'échantillonnage (11,43). Le capteur volumétrique de type Hirst offre une performance optimale en présence de vent de faible vitesse (5,4 km/h) et de particules dont la taille varie entre 3,7 et 10 µm. Cependant, son efficacité diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent. Le taux de capture de pollens est d'environ 80 % et diminue pour les particules dont la taille est inférieure à 3,7 ou à 5 µm (micromètres) selon les études (11,44–46).

Capteur rotatif à impaction

En Amérique du Nord (soit aux États-Unis et au Canada), les capteurs rotatifs à impaction, notamment ceux de type bras rotatifs de la marque Rotorod ou GRIPST, sont souvent employés dans les stations de pollen (34). La tête de prélèvement du capteur rotatif à impaction est constituée de deux tiges enduites d'un adhésif qui effectuent des mouvements circulaires à une vitesse d'environ 80 km/h tout en piégeant les grains de pollen en suspension dans l'air. Le volume d'air échantillonné par le capteur varie en fonction de la taille des particules, de la vitesse de rotation et de la durée d'exposition des tiges, ce qui influence la quantité des particules piégées.

Le mode d'échantillonnage par intervalle de temps permet à ce type de capteur d'échantillonner au-delà de 24 heures.

Le capteur rotatif à impaction de type Rotorod a un taux de capture des particules d'environ 80 %, diminuant considérablement pour les particules de diamètre inférieur à 10 µm. De plus, ce capteur est jugé davantage performant en présence de vent de vitesse modérée (entre 10,8 et 21,6 km/h) et de particules de taille supérieure à 10 µm (11,44–46).

Les auteurs ayant comparé les performances de ces deux capteurs installés côte à côte ont noté que les comptes polliniques journaliers associés aux pollens d'arbres, de graminées et d'herbacées, fourni par le capteur volumétrique de type Hirst (Burkard) et le capteur rotatif à impaction de type Rotorod étaient corrélés positivement ($P < 0,001$). Il a été cependant noté que le capteur volumétrique de type Hirst (Burkard) échantillonne davantage les grains de pollen de la famille des urticacées que le capteur rotatif à impaction de type Rotorod en raison de la taille de ce type de pollen (environ 14 µm). Pour ce type de pollen et le pollen total, la différence absolue entre les nombres de grains de pollen fournis par les deux capteurs est minime pour affecter substantiellement l'interprétation du clinicien (44). Autrement dit, les nombres de grains de pollens fournis par les deux capteurs de prélèvements manuels sont similaires pour la grande majorité des pollens.

Le capteur volumétrique de type Hirst et le capteur rotatif à impaction de type Rotorod sont largement utilisés à travers le monde en raison des coûts d'acquisition moins élevés et surtout de la disponibilité des protocoles standardisés entourant les méthodes de mesure et d'analyse des échantillons de pollens. Ces protocoles ont d'ailleurs été élaborés au fil du temps par les organismes régionaux, nationaux ou continentaux responsables de la surveillance des pollens (41).

Capteurs des allergènes de pollens

Il existe des capteurs prélevant des fragments de pollens et des allergènes en suspension dans l'air par l'entremise de techniques de prélèvement cyclonique ou par impaction. Excepté les capteurs autofabriqués, deux types de capteurs fournissent des échantillons destinés à la détection des allergènes : le capteur à faible volume en raison de son débit d'aspiration de l'air relativement faible (16 L/min -Burkard Manufacturing Co., Ltd.) (54) et le capteur à volume élevé

en raison de son débit d'aspiration de l'air de 800 L/min(13,55,56). Le tableau 3 ci-dessous montre les caractéristiques de ces deux capteurs. La conception des capteurs ainsi que les procédures d'échantillonnage et d'extraction des allergènes peuvent influencer les valeurs des indicateurs en lien avec les allergènes.

Tableau 3 Propriétés physiques des capteurs qui fournissent des échantillons pour la détection des allergènes

	Capteur à faible volume	Capteur à volume élevé
Débit d'aspiration de l'air (en L/min)	16	800
Technique de prélèvement	Cyclone	Impaction en cascade
Efficacité maximale d'échantillonnage (en %)	90	S. O.
Diamètre aérodynamique (en µm)	0,82 et 0, 75	Supérieur à 10 Entre 2,5 et 10 Inférieur à 2,5
Nombre d'étages de séparation des particules	1	De 2 à 3
Durée d'échantillonnage (en heure)	24	S. O.

3.1.1.2 Analyses manuelles effectuées sur un échantillon de pollen

Les analyses effectuées sur un échantillon de pollen sont l'identification, le classement et le dénombrement des grains de pollen, ainsi que le calcul des concentrations de pollens (ou des allergènes de pollens) dans l'air.

Analyse par microscopie optique

À la fin de l'échantillonnage, les tiges et chaque tranche, respectivement pour les capteurs de type Rotorod et de type Hirst, sont soigneusement examinées en laboratoire afin de procéder à l'identification et au décompte de grains de pollen (converti en nombre de grains de pollen par m^3) (11,41,47,48). Les échantillons de pollen sont examinés au moyen d'un microscope optique par du personnel qualifié. Les caractéristiques morphologiques sur lesquelles sont basés l'identification et le classement des grains sont notamment la taille, la forme et la texture de ceux-ci. Les détails techniques concernant la portion de l'échantillon de grain de pollen à analyser ou d'autres opérations (ex. : comptage, identification des grains de pollen ainsi que la conversion du nombre de grains de pollen en nombre de grains de pollen par mètre cube) sont généralement consignés à l'aide de protocoles standardisés.

Immunoessais : immuno-enzymatique (ELISA)

L'ELISA (de l'anglais Enzyme-Linked Immunosorbent Assay) est un des tests de laboratoire qui permet de détecter les allergènes dans un échantillon de pollens compatibles fournis par des

capteurs décrits à la section 3.1.1.1 (p. 15) (capteurs des allergènes). Il faut noter que cette analyse peut aussi être automatisée.

Un groupe de chercheurs a noté que, lors de la saison pollinique, l'air extérieur présentait occasionnellement un nombre élevé de pollens d'oliviers, mais une faible concentration de son allergène, et *vice versa* (57). Les autres groupes de chercheurs sont arrivés aux mêmes constatations pour les pollens de bouleau (avec son allergène Bet v2, d'aulne (avec son allergène Aln g1), de graminées et d'herbe à poux (avec son allergène Amb a 1) (14,58,59). En revanche, un groupe de chercheurs a conclu que les concentrations de pollen de graminées et d'oliviers peuvent aider à expliquer les concentrations de leurs allergènes en raison de la concordance entre les deux mesures effectuées pendant trois années consécutives (2012-2014) dans la ville de Cordoue en Espagne (60). **Les résultats des études ayant comparé les concentrations de pollens et de leurs allergènes respectifs sont plus mitigés.**

3.1.2 Méthode automatisée de mesure de pollens

Le prélèvement, la mesure et l'analyse des pollens sont effectués de façon automatisée afin de rendre l'information pollinique accessible au public en temps quasi-réel (49,50). Il existe des capteurs dits automatiques qui intègrent l'ensemble des étapes nécessaires à la production de cette information. Toutefois, certaines analyses ne sont pas encore intégrées à ces capteurs. Elles peuvent être réalisées séparément à partir d'un échantillon de pollens prélevé à l'aide d'un capteur manuel, afin d'automatiser les processus d'identification et de quantification des pollens.

3.1.2.1 Capteurs dits automatiques ou systèmes de détection automatisée

Les capteurs automatiques ou systèmes de détection automatisée piègent par impaction ou mesurent en plein vol les grains de pollen tout en procédant, en même temps, de façon automatisée, à leur identification, au calcul de leur abondance dans l'air ainsi qu'à la diffusion des données en temps quasi réel (61,62). Deux types de systèmes de détection automatisée de pollens peuvent être distingués selon le type de technologie utilisée pour la reconnaissance des pollens, soit les systèmes de détection automatisée basés sur la reconnaissance d'images microscopiques décrivant la morphologie des grains de pollen; soit ceux basés sur la reconnaissance des signatures optiques (signaux de fluorescence émis et de diffusion de la lumière) propre à chaque taxon de pollen (11). Bien que chaque capteur puisse disposer d'une gamme de modèles, cette revue s'est penchée uniquement sur leur principe de fonctionnement de base. Les informations pertinentes concernant ces types de capteurs sont consignées dans le tableau A4-1 en annexe 1.

Systèmes de détection automatisée basés sur la reconnaissance d'images décrivant la morphologie propre à chaque taxon de pollen

Ces systèmes de détection automatisée intègrent tout à la fois un microscope optique équipé d'une caméra pour la prise d'images microscopiques, un système de traitement d'images et de

stockage dans une base de données, ainsi que des algorithmes d'identification d'images (celles prises par le système et celles contenues dans une banque d'images étiquetées par un expert). Pour cette sous-catégorie, sept études de type environnemental ont été retenues : cinq études primaires et deux études secondaires (étude de revue). Parmi les systèmes de détection automatisée sur la base de cette technologie, citons par exemple (voir tableau A3-1 en annexe 3) :

- BAA500 : l'état de la Bavière en Allemagne comptabilise le plus grand nombre des systèmes de détection automatisée de ce type (environ huit capteurs pour une superficie de 70 551,57 km^2) dans son réseau de suivi de pollen, lequel est dénommé *Electronic Pollen Information Network* (ePIN) (33).
- APS (Automated Pollen Sensor) : très largement utilisé en Amérique du Nord (principalement dans les juridictions américaines) (34). L'algorithme d'identification de grains de pollen a été entraîné avec certains pollens présents en Amérique du Nord (ex. : bouleau, aulne) (31,63).

Systèmes de détection automatisée basés sur la reconnaissance d'images décrivant les signatures spectrales propres à chaque taxon de pollen

La technique d'analyse sur laquelle s'appuie ce type de système est appelée cytométrie en flux. En effet, ce système mesure en plein vol la morphologie (ex. : taille) ou la fluorescence des particules en suspension dans l'air ambiant à l'aide d'une source laser[4] ou toute autre source de lumière (DEL). Ces capteurs automatiques ont été entraînés pour reconnaître différents types de pollens (ex. : bouleau verruqueux (Betula pendula) et l'herbe à poux (Ambrosia artemisiifolia) (32,64–69).

Pour cette sous-catégorie, 11 études primaires de type environnemental ont été retenues.

Parmi les systèmes de détection automatisée développés sur la base de ces technologies et utilisés dans des stations de suivi à travers le monde, citons notamment :

- Rapid-E successeur de PA-300 : ce système de détection automatisée d'une résolution temporelle minimale d'une minute, développé par Plair SA, est utilisé dans un réseau prototype appelé RealForAll, situé entre la Serbie et la Croatie. Les données sont disponibles à travers des applications mobiles destinées aux utilisateurs finaux (67,68);
- Poleno : ce système de détection automatisée développé par Swisens AG – Switzerland, utilisé dans le réseau de mesure de pollens déployé en Suisse;
- WIBS (*Wideband Integrated Bioaerosol Sensor*) : ce système de détection automatisée a été développé à l'Université de Hertfordshire au Royaume-Uni. Il est sous licence auprès de l'entreprise Droplet Measurement Technologies.

Les systèmes de détection automatisée ont été entraînés pour reconnaître plusieurs types de pollens. Toutefois, leurs performances, en ce qui concerne l'identification des grains de pollen,

[4] Un laser est un dispositif d'émission de rayonnement lumineux dans une seule direction avec une longueur d'onde très spécifique.

peuvent varier en fonction des types de pollen ou des types d'algorithmes d'identification. De plus, la diversité pollinique (différents types de pollen) d'un territoire peut également affecter la performance des algorithmes d'identification, surtout s'ils n'ont pas été entraînés avec un grand nombre de types de pollens présents sur ce territoire.

Les coûts d'acquisition et d'implantation des systèmes de détection automatisée sont encore élevés, comparés à ceux des capteurs de prélèvements manuels. Toutefois, les coûts du personnel exploitant un réseau équipé de systèmes de détection automatisée sont moins dispendieux que ceux d'un réseau à capteurs manuels. Les coûts annuels tendent même à diminuer rapidement (moins de 10 ans), selon les juridictions, après la mise en place d'un réseau équipé de système de détection automatisée (70).

Le tableau 4 et la figure 3 montrent respectivement le nombre et la distribution géographique de capteurs et de systèmes de détection encore opérationnels à ce jour en Amérique du Nord. La base de données utilisée provient de la Worldwide Map of Pollen Monitoring Stations et a été consultée le 12 mars 2025.

3.1.2.2 Autres analyses automatisées réalisées sur un échantillon de pollens

En plus des analyses déjà intégrées aux capteurs dits automatiques, telles que la reconnaissance automatique basée sur des images décrivant la morphologie et la signature optique (signaux de fluorescence émis ou de diffusion de la lumière) propre à chaque taxon de pollen, des analyses moléculaires peuvent également être effectuées sur un échantillon de pollen.

L'automatisation des procédures d'identification et de quantification de pollens est effectuée à l'aide des méthodes empruntées à la biologie moléculaire, comme la réaction en chaîne par polymérase (*Polymerase Chain Reaction*; PCR) en temps réel et le *metabarcoding* (49,50).

Approche de PCR en temps réel

La PCR en temps réel consiste à détecter les différences dans les séquences d'ADN des pollens associées à diverses espèces végétales afin de pouvoir identifier les grains de pollen jusqu'au niveau de l'espèce et de dénombrer la quantité d'ADN présent dans un échantillon (44,45). La PCR quantitative (qPCR) est l'une des techniques de la PCR en temps réel qui permet la quantification d'ADN initial de l'échantillon de grain de pollen.

La qPCR est susceptible de fournir, dans un délai de 2,5 heures suivant la procédure d'échantillonnage, des comptes polliniques qui sont statistiquement similaires à ceux déterminés par la microscopie optique. Les échantillons de pollens compatibles à cette analyse sont généralement fournis par des capteurs volumétriques de type Hirst ou par des capteurs autofabriqués (50).

Approche de *metabarcoding*

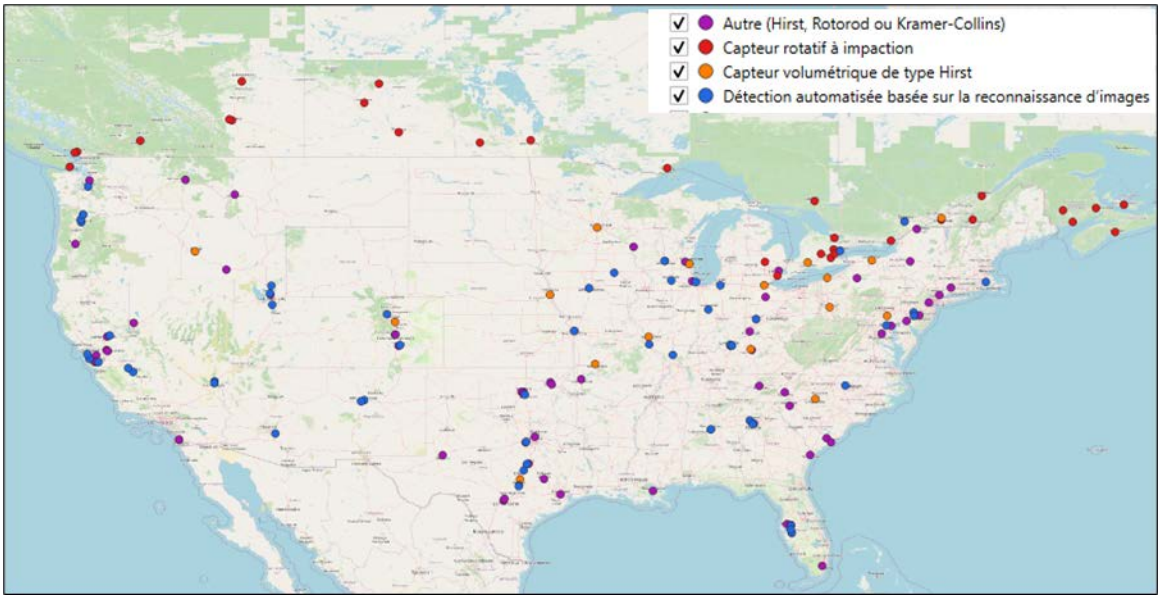
Cette méthode consiste à discriminer et à quantifier les grains de pollen en se basant spécifiquement sur une séquence hypervariable d'un court fragment d'ADN (51,52). Cette

méthode permet de distinguer spatialement et temporellement des stations de mesure de pollen sur la base de la composition taxonomique des échantillons de pollen. Cette distinction entre les stations de mesure est rendue possible grâce à l'amélioration de la résolution taxonomique des pollens de l'air (jusqu'au niveau de l'espèce) (53). Un groupe de recherche ayant expérimenté cette approche à partir d'échantillons de pollens relevant de trois taxons polliniques (Cupressacées [*Cupressaceae*], Taxacées [*Taxaceae*], Urticacées [*Urticaceae*] et Aulnes [*Alnus*]), a démontré que cette approche présente une capacité de détection des plantes (au niveau de l'espèce et du genre) supérieure à celle de la microscopie optique (53).

Tableau 4 Nombre de capteurs et de systèmes de détection automatisée en Amérique du Nord

	Canada	États-Unis
Capteur de prélèvements manuels	**35**	**83**
Burkard (capteur volumétrique de type Hirst)	2	17
GRIPST-2009 (capteur rotatif à impaction)	33	
Hirst (Burkard) and/or Rotorod and/or Kramer-Collins		66
Système de détection automatisée	**2**	**57**
APS-330 (détection automatisée basée sur la reconnaissance d'images)	2	57

Figure 3 Distribution spatiale des stations de pollen en Amérique du Nord



Source : La base de données utilisée provient de la Worldwide Map of Pollen Monitoring Stations et a été consultée le 12 mars 2025.

La marge d'erreur associée aux concentrations polliniques fournies par les systèmes de détection automatisée est faible par rapport à celles fournies par les capteurs manuels

Dans le cadre de la campagne EUMETNET AutoPollen-COST ADOPT, il avait été noté que les mesures fournies par plusieurs systèmes de détection automatisée étaient meilleures que celles fournies par certains modèles de capteurs de type Hirst. En outre, les chercheurs ont recommandé l'élaboration de protocoles standardisés encadrant les bonnes pratiques en matière d'utilisation des systèmes de détection automatisée de pollen dans le but de fournir des données ou des informations exactes et précises, tout en facilitant la comparaison de données entre régions ou pays.

3.2 Méthodes de cartographie de pollen

Les études retenues décrivent un éventail de méthodes de cartographie de sources de pollens ainsi que de leur abondance dans l'air. Au total, 49 études ont été retenues : 31 portaient sur les sources de pollens (ex. : présence ou localisation des plantes allergènes) et 18 étaient axées sur l'abondance de pollen dans l'atmosphère.

3.2.1 Cartographie des sources de pollens aéroportés

Les études, toutes de type environnemental, ont été réparties en trois groupes en tenant compte des approches méthodologiques : approches ascendante (neuf études primaires et deux rapports de recherche), descendante (cinq études primaires) et écologique (14 études primaires et un document de la littérature grise).

3.2.1.1 Approche dite ascendante (*Bottom-Up Approach*)

L'approche dite ascendante est basée sur l'inventaire des plantes émettrices de pollens allergènes, lequel précise leur localisation géographique ainsi que certaines informations spécifiques à l'espèce, comme le potentiel allergène (PA), la valeur du potentiel allergène (VPA) ainsi que la proportion d'une espèce végétale donnée présente dans une grille territoriale donnée. Cet inventaire est souvent réalisé à l'aide de plusieurs sources de données telles que les bases de données nationales et municipales sur les arbres (71,72), les données publiées dans les rapports des institutions locales de santé publique (72,73), les données d'observations directes de présence de la plante (72–75), les bases de données en provenance des jardins botaniques (73), les informations extraites d'images de télédétection (76), de même que les données provenant des plateformes en ligne (ex. : plateforme de signalement de l'herbe à poux). Des groupes de chercheurs ont produit des cartes uniquement basées sur l'occurrence de l'herbe à poux à l'intérieur des quadrats[5] (77) ou des petites zones rectangulaires de même taille découpant le territoire (73). Gentili *et al*. (73) ont observé que les environnements bâtis et

[5] Un quadrat est une surface de forme carrée ou rectangulaire utilisée pour l'échantillonnage des plantes sur le terrain.

naturels les plus souvent colonisés par l'herbe à poux étaient les accotements des routes, les bordures de chemins de fer et des rivières ainsi que les zones agricoles.

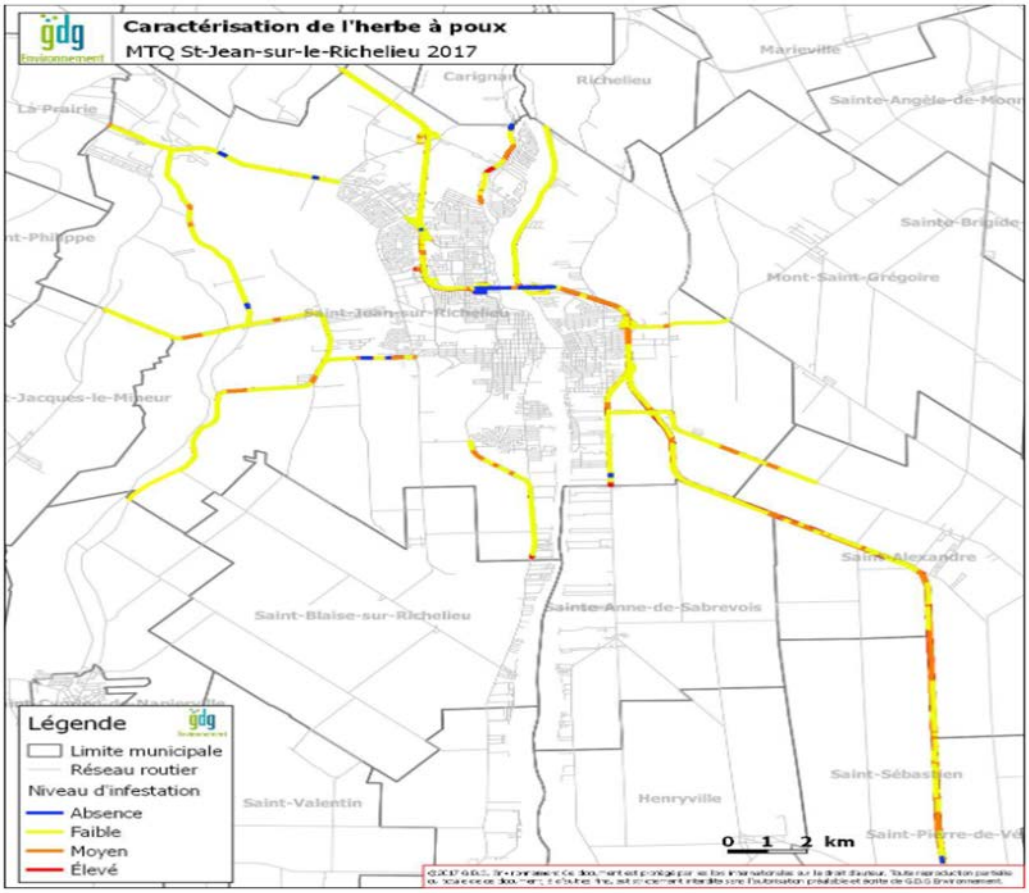
Au Québec, ce type de cartographie a permis de révéler que le niveau d'infestation sévère de l'herbe à poux (26 plants et plus par mètre carré d'infestation) était passé de 45,6 % en 2016 à 23,1 % en 2017 sur l'ensemble du réseau routier supérieur de Saint-Jean-sur-Richelieu (voir la figure 4 p. 25). Il semblerait que ces statistiques soient le résultat d'un traitement à l'herbicide de contact qui avait préalablement été administré sur les plants de l'herbe à poux (77). Un autre groupe de chercheurs a utilisé les catégories d'utilisation du sol pour produire une carte illustrant le taux de couverture des graminées au Royaume-Uni (36).

Toutes les études retenues (six études) traitant de l'allergénicité des plantes dans un milieu urbain s'intéressaient principalement aux espèces d'arbres. Deux courants ont émergé dans l'évaluation de l'allergénicité. Le premier courant abordait la définition du potentiel allergène (ou allergisant) (PA) des espèces d'arbres et sa distribution géographique. Le PA est rendu disponible par le biais de différentes sources, notamment les systèmes de classification du PA des plantes (ex. : OPALS), les organisations régionales de santé publique (ex. : INSPQ) et de gestion des réseaux de capteurs de pollen (ex. : RNSA). De façon générale, ces organismes calculent indépendamment le PA des plantes à partir d'un certain nombre de paramètres mesurables (ex. : la quantité totale de pollen produite) ou théoriques (ex. : le PA des grains de pollen). La cartographie du PA pour différentes espèces d'arbres a été réalisée pour cinq grandes villes, incluant Montréal, Vancouver, Paris, New York et Barcelone (voir la figure 5 p. 26 pour la ville de Montréal). Les auteurs ont relevé que le PA des arbres étudiés variait d'une source à une autre (à Montréal, selon le PA défini par l'OPALS, 74 % d'arbres présentaient un PA très élevé, soit trois fois plus que le nombre d'arbres rangés dans cette catégorie par l'INSPQ (72)). Dans la même optique, d'autres groupes de chercheurs (71,78) ont couplé le PA avec d'autres informations associées à la plante, notamment la durée de la période de pollinisation et le type de pollinisation (ex. : anémophile), afin de produire un indicateur nommé valeur du potentiel allergène (VPA). Les VPA associées à chaque plante peuvent être interpolées pour produire des cartes illustrant des points chauds d'allergénicité des plantes. Ce type de cartographie a été développé dans la ville de Valence en Espagne (71). Pour leur part, Pecero-Casimiro *et al.* (76), ont cartographié l'allergénicité des plantes ornementales à l'aide de l'indice AIROT (voir tableau A3-2 en annexe 3). Cet indice combine à la fois la localisation, les paramètres morphologiques (ex. : hauteur) et biologiques (ex. : maturité) des arbres ainsi que les caractéristiques de l'environnement bâti (ex. : le design urbain). Les cartes illustrant la variation spatiale des platanes ont été produites pour plusieurs villes d'Espagne (76).

Par ailleurs, le deuxième courant traitait de l'allergénicité des parcs et des espaces verts. Les auteurs de ces études ont utilisé des indices construits sur la base des paramètres biologiques (ex. : durée de la période de pollinisation) et des paramètres biométriques ayant un impact substantiel sur le volume d'émission de pollens allergènes (ex. : diamètre et hauteur de la canopée). Parmi ces indices, citons l'indice d'allergénicité des zones vertes en milieu urbain (*Index of Urban Green Zones Allergenicity Index*– I_{ugza}) (78,79) et l'index de source (IS) (80). Les

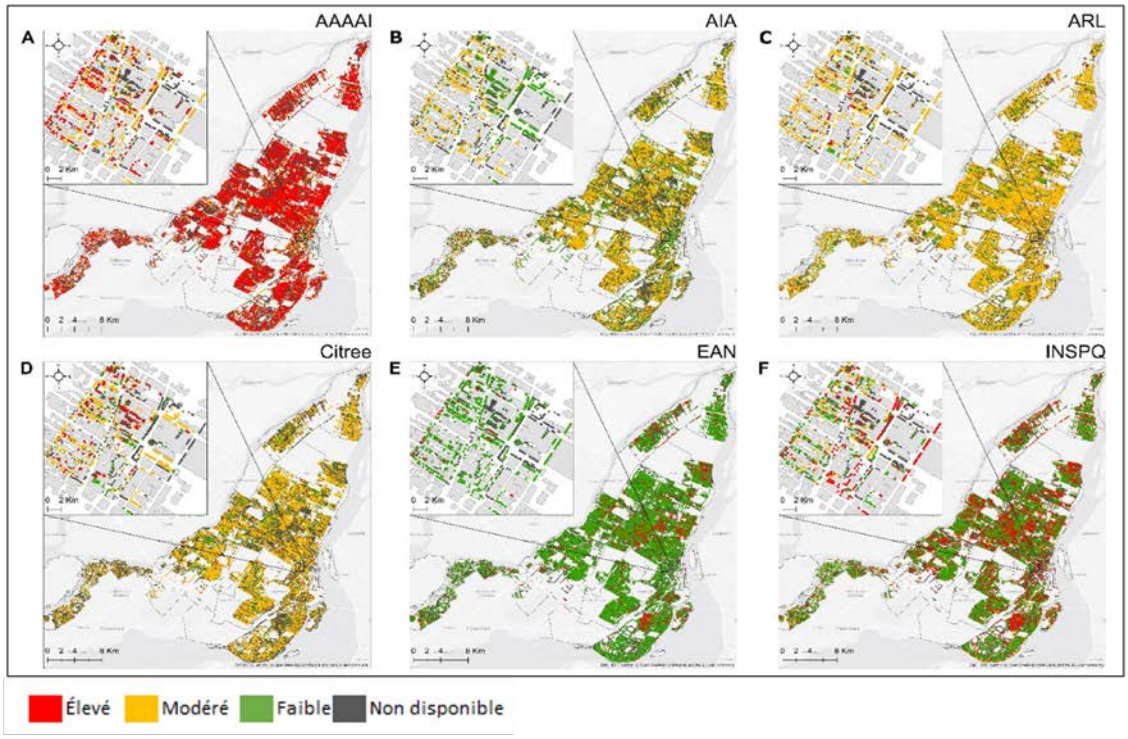
cartes illustrant la variation spatiale de l'indice d'allergénicité ont été produites pour plusieurs villes d'Espagne (78). Les détails concernant cette approche sont présentés dans le tableau A3-2 en annexe 3.

Figure 4 Niveau d'infestation de l'herbe à poux le long du réseau routier de Saint-Jean-sur-Richelieu



Source : extrait du rapport de GDG Environnement Ltée (2017), présenté au ministère des Transports du Québec.

Figure 5 Niveau du potentiel allergène des arbres de la ville de Montréal



Notes : Le PA est déterminé à l'aide de six sources de données sur l'allergénicité des arbres : (A) the American Academy of Allergy, Asthma & Immunology (AAAAI); (B) The Vegetation Guidance by the Italian Association of Aerobiology (AIA); (C) Canada's Aerobiology Research Laboratories (ARL); (D) the Citree's library; (E) the European Aeroallergen Network (EAN); (F) Institut national de santé publique du Québec (INSPQ).
Source : extrait de Sousa-Silva *et al.* (2021) avec une légende adaptée.

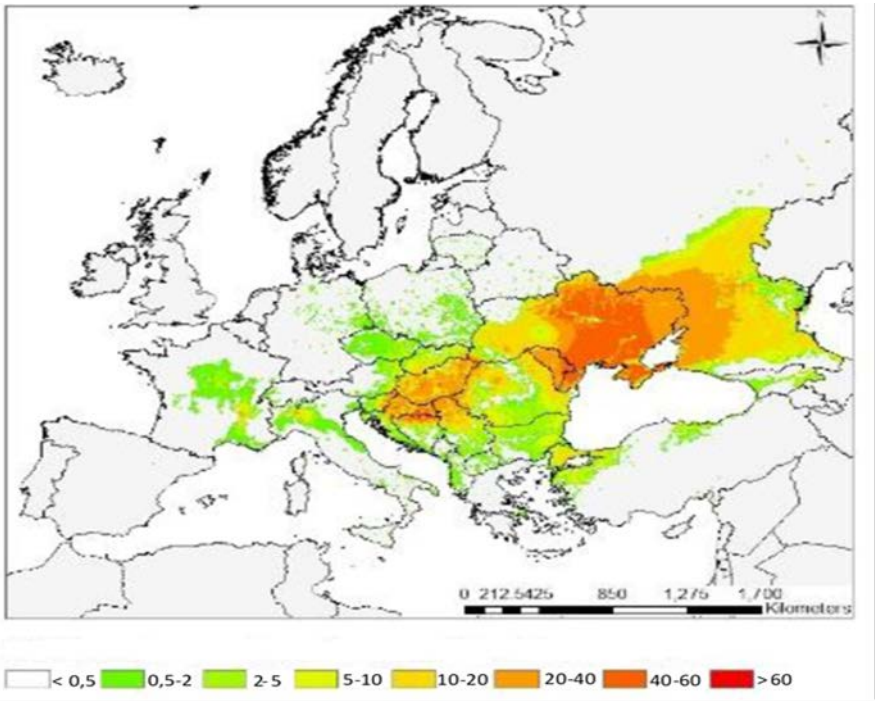
3.2.1.2 Approche dite descendante (*Top-Down Approach*)

L'approche descendante combine les indicateurs polliniques (ex. : somme annuelle de pollen) mesurés par des stations et les catégories d'utilisation du sol, afin de produire des cartes illustrant la distribution spatiale des niveaux d'infestation de la plante allergène dans une grille d'analyse spatiale donnée (36,81–89). Certains groupes de chercheurs intègrent d'autres informations comme l'infestation des habitats naturels (81,85,87,88), les données d'observation de la présence ou d'absence de la plante (85) et le modèle numérique d'élévation (MNE)[6] (85,88). C'est une approche de rétroanalyse, puisque les émissions de la plante sont déterminées principalement en utilisant les comptes polliniques. Celle-ci a été largement utilisée pour produire les cartes d'infestation de l'ambroisie en Europe. Le nombre de stations de mesures de pollen rapporté dans la majorité des études (85–88) était supérieur à 20. Cette approche a permis de cartographier le pourcentage d'infestation de la plante à l'échelle géographique des pays (Italie, Royaume-Uni, Autriche, France) (36,85,86,88) et du continent (Europe) (87) (voir la figure 6 p. 27). Les mesures statistiques de performance du modèle indiquaient des résultats

[6] Ce modèle représente la variation spatiale du niveau de terrain et d'élévation de la canopée ainsi que des bâtiments.

satisfaisants (R^2 = 0,49 et R = 0,74) dans l'étude de Skjøth *et al*. (87). En plus, l'erreur absolue était inférieure à 20 % pour la majorité des stations. Les auteurs ont avancé que les erreurs absolues plus larges pour le reste des stations étaient principalement reliées aux aires géographiques avec le moins de stations (87). Les intrants des modèles et d'autres informations pertinentes peuvent être consultés dans le tableau A3-3 en annexe 3.

Figure 6 Pourcentage d'infestation de l'ambroisie en Europe (10 km × 10 km)



Source : extrait de Skjøth *et al*. (2019) avec une légende retouchée.

3.2.1.3 Approche écologique

Cette approche est basée sur des modèles de distribution des espèces (MDE) qui consistent à prédire la qualité d'un milieu où les conditions climatiques ou environnementales sont propices au développement et à la persistance d'une plante (40). Les études retenues traitant de cette thématique s'organisent autour de deux dimensions : d'un côté, des études qui s'appuient sur les MDE basés sur les processus (ex. : interaction entre facteurs environnementaux et réponse phénologique de la plante); de l'autre, celles qui traitent des MDE basés sur les méthodes statistiques.

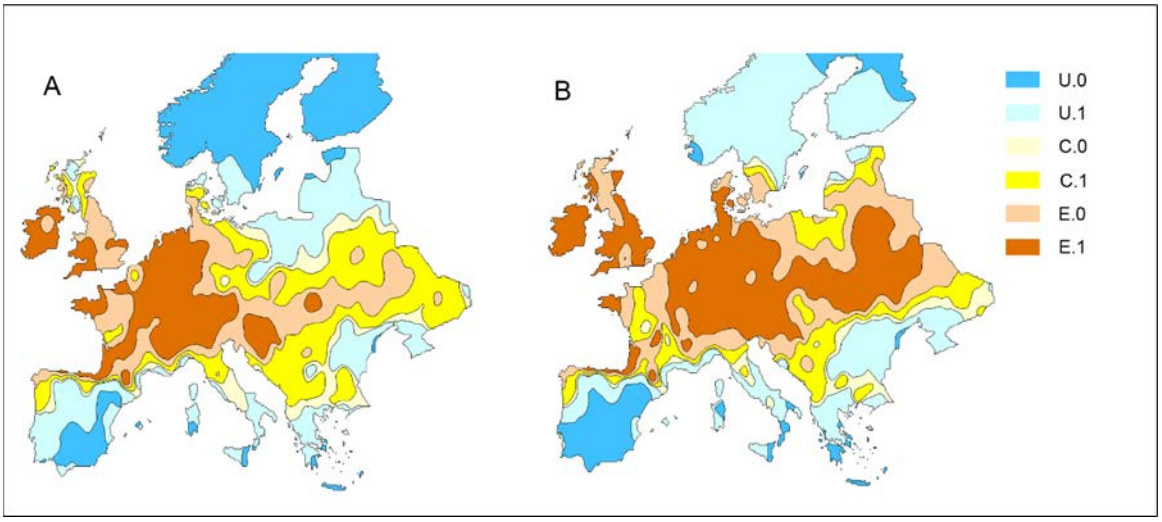
MDE basés sur les processus

Les MDE basés sur les processus utilisent des expressions théoriques mathématiques décrivant l'interaction des facteurs environnementaux sur les traits fonctionnels (ex. : phénologie) de la plante qui affectent la population d'une espèce et donc sa distribution géographique (90). Ces modèles, relativement complexes, dont certains paramètres sont déterminés de façon

expérimentale et publiés dans la littérature, ont été développés pour plusieurs espèces d'ambroisie. Deux modèles ont été répertoriés dans cette revue : le premier est une adaptation à l'ambroisie du modèle écologique SIRIUS, qui prend en compte la phénologie, le changement de la durée de la saison et la proportion des aires d'habitats propices à l'ambroisie (39,91,92). Le deuxième est un modèle prédictif (*forward*) de croissance de l'herbe à poux en fonction de la température et de la photopériode (90).

La qualité climatique ou l'Indice climatique de qualité de l'habitat (*Habitat Suitability Index*)[7], principale donnée de sortie de ces deux modèles, était transformée en probabilité de présence de la plante en l'associant à d'autres données, comme la proportion de la surface d'utilisation du sol propice à la croissance de la plante (ex. : l'ambrosie) (92). La probabilité de présence où la qualité de l'habitat de l'herbe à poux était cartographiée sous forme de cartes matricielles ou choroplèthes (c'est-à-dire, chaque unité géographique était représentée par une couleur indiquant la qualité de l'habitat(91). Les cartes choroplèthes n'apparaissent que dans une étude (voir la figure 7), et les auteurs n'ont pas fourni suffisamment de détails sur la façon dont cette carte a été créée (91).

Figure 7 Qualité de l'habitat de l'herbe à poux dans un contexte de changement climatique en Europe



Notes : U.0 : « Pas favorable »; U.1 : « Peu favorable »; C.0 : « Occasionnelle – Moins probable »; C.1 : « Occasionnelle »; E.0 : « Établie »; E.1 : « Bien établie ». Le modèle climatique global HadCM3 a été utilisé selon le scénario d'émission A1B : (A) pour un futur proche (2010-2030) et (B) pour un futur lointain (2050-2070)
Source : extrait de Storkey *et al.* (91).

[7] Une qualité climatique forte favorise la croissance et la persistance de la plante dans un environnement tandis qu'une qualité climatique faible favorise la destruction de la plante.

Un des avantages de ces modèles est de simuler la distribution de la plante (ex. : ambroisie) dans un futur proche ou lointain en utilisant les modèles climatiques globaux ou régionaux au sein desquels des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont exploités. La majorité des modèles de simulation répertoriés dans la présente revue de littérature ont été développés dans le contexte régional européen et comprennent HIRHAM (90) et le modèle climatique global HadCM3 (91). Un autre avantage est de permettre l'utilisation des comptes polliniques afin d'affiner les paramètres du modèle de simulation de la plante (ambroisie) (39,82). Chapman *et al*. (90) ont utilisé le modèle climatique régional HIRHAM afin de simuler l'expansion potentielle de l'aire géographique de l'herbe à poux en Europe selon le scénario d'émission SRES A2[8] pour l'horizon temporel 2076–2095. Les intrants des modèles peuvent être consultés dans le tableau A3-4 en annexe 3.

MDE basés sur les méthodes statistiques et d'apprentissage automatique

Les MDE basés sur les méthodes statistiques et d'apprentissage automatique permettent de prédire la probabilité de présence ou d'absence d'une espèce, à l'aide des modèles statistiques ou d'apprentissage automatique, à partir de données d'observations de la présence de la plante en milieu naturel (93) (ex. : données GBIF9), des données climatiques (ex. : température moyenne), des informations obtenues par télédétection (ex. NDVI10) (93), des catégories d'occupation du sol (ex. : arbres, bâtiments) (93) et des données socioéconomiques (ex. : revenu des ménages, population totale). Parmi les modèles statistiques recensés dans la littérature, citons le modèle Maxent (37,40,82,94), le modèle linéaire généralisé (Generalized Linear Models; GLM ») (82), les modèles de régression boostée généralisés (Generalized Boosted Regression Models; GBM) (82) et la régression logistique (93). Il faut noter que pour les cinq études qui correspondent à cette sous-catégorie, les modèles ciblaient uniquement l'herbe à poux (espèce) ou l'ambroisie (genre).

La donnée de sortie de ces modèles était la qualité de l'habitat ou la probabilité de présence antérieure, actuelle et future de l'herbe à poux. Cet indicateur a été cartographié sous forme de carte matricielle à l'échelle des villes (93), des pays (82,94) ou des continents (37,40). Aussi, les modèles climatiques globaux (37,94), les modèles météo-chimie régionaux (82) et des scénarios d'émission (RCP 4.5 et 8.5) (40,94) ont été utilisés pour estimer la qualité de l'habitat futur de l'herbe à poux.

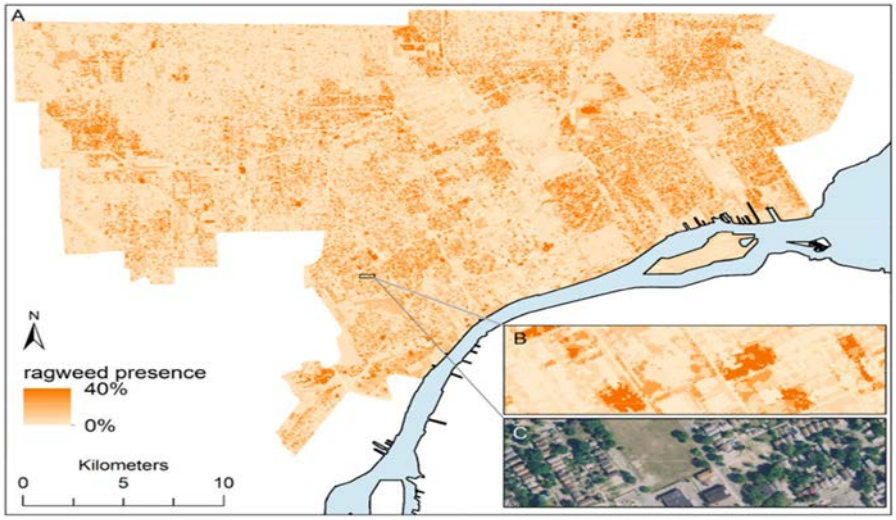
[8] Le scénario SRES A2 fait partie d'un ancien ensemble de scénarios du SRES, et réfère à un monde caractérisé par une croissance démographique, un développement économique et une régionalisation plus marqués.

[9] GBIF (Global biodiversity Information Facility) est un projet scientifique international, fondé en forme de consortium par l'OCDE en 2001, et qui a pour but de mettre à disposition toute l'information connue sur la biodiversité (données d'observation ou de collections sur les animaux, les plantes, les champignons, les bactéries et les archéens).

[10] NDVI ou Indice de végétation par différence normalisée (Normalized Difference Vegetation Index) est un indicateur qui quantifie la couverture végétale. NDVI = 1 : végétation dense; NDVI = 0 : pas de végétation.

Le AUC[11] du modèle dans l'étude de Case *et al*. (94) était de 0,765 et variait entre 0,774 et 0.837 dans l'étude de Rasmussen *et al*. (40), indiquant de bonnes performances des modèles. Celui-ci était en effet en mesure de discriminer les cellules de la grille propices ou non à la croissance d'ambroisie. Le AUROC[12] des données de test du modèle était de 0,85 dans l'étude de Katz et Batterman (93). Cette approche a été appliquée dans la ville du Michigan aux États-Unis (93) (voir la figure 8), en France (82), aux États-Unis (94), en Asie (37) et en Europe (40).

Figure 8 Probabilité de présence de l'herbe à poux dans la ville de Detroit aux États-Unis sur une carte 16 m × 16 m (A)



Notes : une petite portion de la ville zoomée (B); image satellite de la portion zoomée (C).
Source : extrait de Katz *et al*. (93).

3.2.1.4 Apport de la télédétection

Les données de télédétection (données fournies par des satellites, des avions ou des drones) sont également utilisées dans les approches décrites ci-dessus. De façon générale, elles sont couplées aux données d'occupation du sol ou d'observations de présence de la plante afin de cartographier la distribution géospatiale des plantes ainsi que les dates d'apparition des stades phénologiques de la plante (95,96). Liu *et al*. (96) ont appliqué un algorithme d'apprentissage automatique (apprentissage profond) sur les images provenant des satellites afin de générer une carte avec une résolution spatiale de 20 km × 20 km illustrant la distribution des graminées pour deux villes d'Australie. La précision du modèle était estimée à 87,25 %(96).

[11] AUC représente la mesure de séparabilité. Elle indique dans quelle mesure le modèle est capable de faire la distinction entre les classes. Elle varie entre 0 (séparation difficile) et 1 (séparation parfaite).

[12] AUROC est une mesure d'évaluation de la performance d'un modèle de classification binaire.

Au Québec, Ngom *et al.* (97) ont exploré l'utilisation combinée des données satellitaires à très haute résolution (1,8 m × 1,8 m ou 20 m × 20 m) et des données d'observations de présence de l'herbe à poux pour cartographier la probabilité de présence de l'herbe à poux dans les zones urbanisées du Québec. Les analyses statistiques (ex. : analyse de la variance) et la logique floue (*fuzzy-logic*)[13] ont été appliquées sur ces jeux de données afin de discriminer l'herbe à poux des autres espèces invasives. Les auteurs ont démontré que la bande verte (de longueur d'onde comprise entre 510 et 590 nm) de l'image satellite avait un potentiel élevé pour l'identification de l'herbe à poux (97).

En parallèle, l'imagerie satellitaire et le Lidar, couplés aux données d'observation de présence d'herbe à poux, ont également été utilisés dans la ville de Detroit aux États-Unis pour cartographier la présence de cette espèce à l'échelle géographique de la ville (figure 8 p. 30). Les auteurs ont noté que la densité de l'herbe à poux était fortement associée aux terrains comptant des bâtiments démolis ($\rho < 0{,}001$) (98). Les intrants des modèles peuvent être consultés dans le tableau A3-5 en annexe 3.

Par ailleurs, notons que, dans certaines régions géographiques comme la Grande-Bretagne, la différence de temps est seulement d'un jour entre le moment de la floraison du bouleau et celui de son début de débourrement[14]. Puisque les deux phases phénologiques sont parfaitement corrélées ($R = 0{,}97$), cela sous-entend que le débourrement des feuilles (éclosion des bourgeons des arbres) peut servir de proxy pour préciser le moment d'émission locale de pollen de bouleau (95). Ainsi, Khwarahm *et al.* (95) ont utilisé les données de séries temporelles MTCI[15] (2003-2007 et 2008-2010) couplées aux comptes polliniques et aux données d'occupation du sol pour déterminer la date de début de floraison des bouleaux et des graminées. Les auteurs ont généré deux cartes couvrant le territoire du Royaume-Uni à 1 km × 1 km de résolution spatiale, illustrant la variation spatiale de début de floraison pour les bouleaux et les graminées (voir la figure 9 p. 32). De façon générale, la date de début de la saison pollinique obtenue par l'entremise de méthodes DM, Σ75 et Σ125[16], en utilisant des comptes polliniques, était significativement corrélée avec celle déterminée au moyen de séries chronologiques MTC pour les graminées ($R = 0{,}71$; $\rho = 0{,}01$ pour DM; $R = 0{,}49$;$\rho = 0{,}05$ pour Σ75) et le bouleau ($R = 0{,}74$; $\rho = 0{,}01$ pour DM; $R = 0{,}74$; $\rho = 0{,}01$ pour Σ75l; $R = 0{,}72$; $\rho = 0{,}01$ pour Σ125) (95).

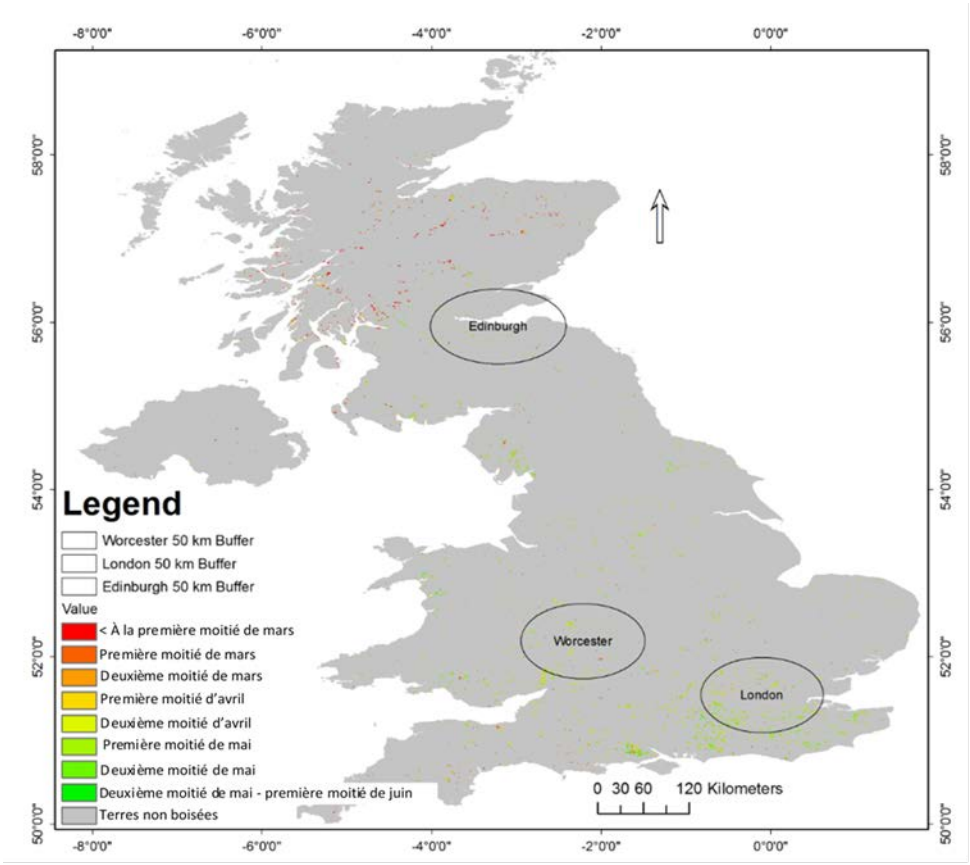
[13] Voir le glossaire.

[14] Débourrement : épanouissement des bourgeons des arbres, de la vigne.

[15] Voir le glossaire.

[16] Σ75 : la date où la somme des comptes polliniques journaliers depuis le début de l'année atteint 75 grains.
Σ125 : la date où la somme des comptes polliniques journaliers depuis le début de l'année atteint 125 grains.
DM (Derivative Method) : technique d'analyse des séries temporelles. La date de début de la saison pollinique correspond au premier point d'inflexion de la courbe illustrant les comptes polliniques en fonction du temps.

Figure 9 **Début de la floraison d'essences de feuillus à travers le Royaume-Uni sur une carte de 1 km × 1 km**



Source : extrait de Khwarahm *et al.* (95), avec des étiquettes de la légende traduites en français.

3.2.2 Cartographie des mesures de pollen dans l'air

Les études, toutes de type environnemental, ont été réparties en deux groupes selon les types de données ou les différentes méthodologies préconisées : celles-ci regroupent des études qui traitent des modèles empiriques (sept études primaires) et des modèles basés sur les processus météorologiques et physiques (six études primaires et un document de la littérature grise).

3.2.2.1 Modèles empiriques

Les modèles dits empiriques s'appuient exclusivement sur les données d'observations antérieures (ex. : concentration pollinique, température) afin de dégager une expression mathématique liant la concentration de pollens aux autres variables environnementales. Les modèles utilisés comprenaient la régression linéaire simple (10) ou généralisée (99) et l'apprentissage automatique (100,101). Dans d'autres études, des méthodes géostatistiques

(« cokrigeage »)[17] ont été utilisées afin d'estimer les concentrations polliniques des zones dépourvues de stations de mesure de pollens (102,103). Les données météorologiques et celles de mesure de pollens étaient archivées sur une longue période (plus de neuf ans) pour un nombre important d'études (100,101,104,105). En outre, le nombre de stations de mesure de pollen pour les zones d'étude, qui comprenaient tant des villes, des pays que des régions biogéographiques, variait entre 12 et 28 (10,99–102,105), à l'exception d'une étude qui n'a utilisée qu'une station de mesure de pollens (104).

Approche basée sur les modèles statistiques et d'apprentissage automatique (AA)

La régression linéaire a été utilisée au Royaume-Uni pour estimer les comptes polliniques hebdomadaires des espaces géographiques non couverts par des stations de mesure, à partir de comptes polliniques fournis par 17 stations de mesure ainsi que du nombre de gazouillis (tweets), extrait de la plateforme X (anciennement Twitter), dont les auteurs mentionnaient avoir éprouvé des symptômes de rhume des foins. Les comptes polliniques et les gazouillis étaient significativement associés (R2 = 0,858 et un RMSE = 0,100). Quoique le nombre limité de gazouillis constitue une des faiblesses de l'utilisation de ces données dans la surveillance des pollens allergènes, Cowie *et al*. (10) ont montré que les régions urbanisées présentant un nombre élevé de comptes polliniques semblaient correspondre à celles affichant un nombre élevé de gazouillis (10).

Nowosad *et al*. (105) ont pu proposer un modèle spatio-temporel basé sur les forêts aléatoires (*Random Forest*) pour inférer la probabilité de concentrations élevées de pollen de bouleau, de noisetier (*Corylus*) et d'aulne (*Alnus*) à partir d'indicateurs dérivés de données météorologiques. Les performances des modèles à prédire les niveaux élevés des concentrations journalières pour ces trois types de pollen étaient globalement bonnes, à l'exception de la dimension spatiale du modèle concernant le pollen de noisetier (pollen de bouleau : rappel [18](t) = 0,88, rappel (s) = 0,87; pollen de noisetier : rappel (t) = 0,61, rappel (s) = 0,49; pollen d'aulne : rappel (t) = 0,70, rappel (s) = 0,61). Ce modèle a été appliqué sur le territoire de la Pologne et de la zone de 200 km autour de ses frontières(105).

[17] Méthode qui consiste à estimer les valeurs de la variable principale (ex. : concentration journalière de pollen) à certains endroits où elles n'ont pas été mesurées. Le « cokrigeage », en plus d'utiliser les valeurs mesurées de la variable principale, intègre également des variables indépendantes dont les mesures couvrent tout le territoire à l'étude. De façon générale, les variables indépendantes ou secondaires sont réputées être corrélées avec la variable principale. Le « cokrigeage » améliore la précision des estimations.

[18] Rappel (t) est la proportion des jours pour lesquels les niveaux élevés des concentrations ont été correctement estimées sur l'ensemble de la saison. Rappel (s) est la proportion des sites ayant estimé correctement les niveaux élevés des concentrations sur l'ensemble des sites.

Aux États-Unis, des modèles d'apprentissage automatique (forêts aléatoires et réseaux de neurones), alimentés par des données du système NEXRAD (*Next Generation Weather Radar*)[19], ont été élaborés pour prédire et cartographier les concentrations journalières de pollen d'ambroisie sur un territoire de 300 km sur 300 km de superficie. Les deux modèles prédictifs avaient des coefficients de corrélation élevés (R = 0,98 pour les forêts aléatoires et R = 0,72 pour les réseaux de neurones) (104).

Un autre groupe de chercheurs a développé une cartographie des concentrations journalières prédictives (en avance jusqu'à trois jours) de pollen d'ambroisie sur la base de modèles d'apprentissage automatique (réseaux de neurones) pour la région biogéographique pannonienne[20]. Le modèle était alimenté par les concentrations de pollen d'ambroisie des trois derniers jours et les données météorologiques actuelles et antérieures pour chaque site de mesure. Les auteurs ont noté de bonnes performances du modèle (la moyenne de coefficient de Pearson[21] était de 0,61, celle de la corrélation de Spearman[22] était de 0,77 et celle du taux de Kendall[23] était de 0,69) pour 22 sites de mesures de pollen sur un total de 28. En outre, ils ont également obtenu de meilleures prévisions pour les niveaux élevés de concentration de pollen, surtout lorsque plusieurs variables météorologiques avaient été utilisées dans le modèle. Les concentrations journalières de pollen d'ambroisie étaient réparties en cinq classes : 0–9, 10–29, 30–99, 100–499 et supérieures à 500 grains/m^3 (voir la figure 10 p. 35). Les auteurs ont utilisé une échelle d'évaluation des symptômes[24] collectés avec la version hongroise du journal de symptôme de pollen et de rhume des foins pour définir ces classes(100).

[19] Voir glossaire.

[20] La région biogéographique pannonienne comprend l'ensemble de la Hongrie, de vastes régions de Croatie, de Serbie, de Slovaquie et de Slovénie, ainsi que des zones périphériques d'Autriche, de République tchèque, de Roumanie et d'Ukraine.

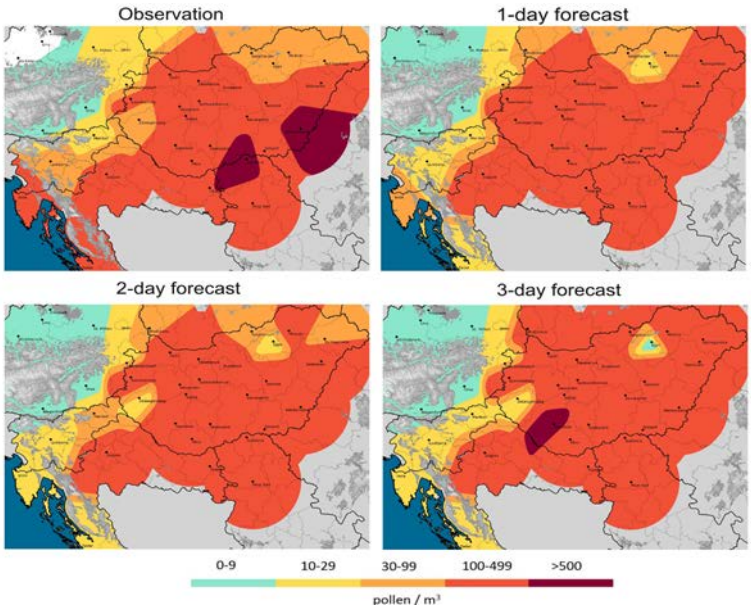
[21] Le coefficient de Pearson est une métrique reflétant la force et la direction d'une relation linéaire entre deux variables quantitatives (réf. : https://www.ultipa.com/fr/docs/graph-analytics-algorithms/pearson-correlation-coefficient).

[22] Le coefficient de Spearman est une statistique qui mesure la relation linéaire entre les rangs des deux variables.

[23] Le taux de Kendall est une statistique qui mesure l'association entre deux variables (réf. : https://fr.wikipedia.org/wiki/Tau_de_Kendall)

[24] Est un tableau de correspondance entre la somme des scores de symptômes autorapportés et les concentrations polliniques annuelles pour plusieurs types de pollen.

Figure 10 Distribution géographique des concentrations de pollen d'herbe à poux dans la RBP



Notes : région biogéographique pannonienne) en Pologne sur une carte de 20 km × 20 km.
Source : extrait de Csepe *et al.* (100) .

L'approche *Land Use Regression* (LUR), utilisant la régression linéaire généralisée, a été appliquée en Finlande dans la zone métropolitaine de Helsinki dans le but de cartographier la variabilité des concentrations moyennes de pollen de graminée pendant une période estivale de 10 jours en 2023. La régression linéaire généralisée était à même d'expliquer 79 % de la variation des concentrations moyennes polliniques. Ce pourcentage était de 47 % lorsque deux stations présentant de fortes concentrations polliniques avaient été retirées du modèle. Ainsi, les performances des modèles étaient sensibles aux nombres de stations de pollen utilisées dans le modèle. Les erreurs moyennes de prédiction étaient de 6,4 % et de 19,5 % pour les modèles construits sur la base de concentrations polliniques fournies respectivement par 16 et 14 stations (99).

Un autre groupe de chercheurs a appliqué l'approche LUR basée sur les forêts aléatoires pour produire des cartes de concentrations journalières de cinq types de pollens allergènes (le noisetier [*Corylus*], l'aulne [*Alnus*], le frêne [*Fraxinus excelsior*], le bouleau [*Betula*] et les graminées de la famille de Poacée) pour les années 2017 et 2018. Les (R^2)[25] des modèles dans l'ensemble variaient de 84 % pour le pollen d'aulne à 90 % pour le pollen de graminée. Aussi, les auteurs ont noté que le modèle surestimait les valeurs dans les plages de faibles concentrations

[25] Le coefficient de détermination linéaire de Pearson, noté R^2, est une mesure la qualité de la prédiction d'une régression linéaire.

tandis que les valeurs prédites (ou estimées) étaient proches des valeurs mesurées (réelles) dans les plages de concentrations élevées pour tous les modèles(101).

Interpolation géostatistique

Les concentrations polliniques des secteurs dépourvus de stations de mesure sont estimées à l'aide des techniques d'interpolation spatiale. Une des techniques est le « cokrigeage »[26]. Ce dernier intègre à la fois les mesures polliniques des stations proches et les variables dites secondaires qui sont réputées être linéairement corrélées avec la variable à prédire (concentration de pollen)[27] (102,103). À partir de la relation entre ces deux variables, il est possible d'améliorer l'estimation des concentrations polliniques dans des secteurs dépourvus de stations de mesure, mais couverts seulement par des données associées aux variables secondaires. Dans les études retenues, le nombre de stations de mesure de pollen était de 26 (102) et de sept (103) et la technique d'interpolation utilisée était le « cokrigeage ».

En Allemagne dans la région de Bavière, l'altitude au-dessus du niveau de la mer a été utilisée comme variable secondaire afin de cartographier les concentrations journalières de 14 types de pollen Aulne (*Alnus*), Ambroisie (*Ambrosia*), Armoise (*Artemisia*), bouleau (*Betula*), Charme (*Carpinus*), Cupressacées (*Cupressaceae*), frêne (*Fraxinus*), épicéa (*Picea*), pinus (*Pinus), Plantago,* poacées (*Poaceae*), peuplier (*Populus*), tilleul (*Tilia*) et Urticacées (*Urticaceae*). Les concentrations fournies par les capteurs avaient au préalable été ajustées en retirant l'effet des précipitations (qui ont tendance à diminuer les concentrations de pollen dans l'air ambiant). Les moyennes R^2 variaient entre 0,33 pour le pollen de tilleul (*Tilia*) et 0,70 pour le pollen de graminée (*Poaceae*). Les auteurs ont développé une plateforme de visualisation des concentrations journalières sous forme de cartes dynamiques sur le territoire de Bavière pendant la saison pollinique de 2015. La plateforme de visualisation est fonctionnelle à l'adresse suivante : https://oteros.shinyapps.io/Pollen_season_Bayern/ (consultée le 2 juillet 2024) (102).

Picornell *et al*. (103) ont utilisé l'indice de thermicité compensé[28] comme variable secondaire afin de cartographier les concentrations journalières de huit types de pollen (voir tableau A3-7 en annexe 3) dans la ville de Malaga en Espagne. Cette cartographie fait partie d'un système d'alerte destiné à informer la population des risques d'exposition aux pollens allergènes (103). La précision moyenne du modèle était supérieure à 0,60, et les taux de précision étaient de 0,82 et 0,19, respectivement pour les pollens de graminées et de cupressacées (*Cupressaceae*). Les cartes produites par ces modèles présentaient des zones géographiques et des résolutions spatiales diverses : les cartes avec des résolutions spatiales de (100 m × 100 m) à (1 km × 1 km) à l'échelle géographique des villes (99,102–104) et de 1 à plusieurs kilomètres à l'échelle géographique des pays, des régions et des grands ensembles régionaux (101,105). Les détails de ces modèles peuvent être consultés dans le tableau A3-7 en annexe 3.

[26] Voir le glossaire.
[27] Voir le glossaire.
[28] Voir le glossaire.

3.2.2.2 Modèles basés sur les processus

Les modèles basés sur les processus, encore appelés modèles théoriques ou mécanistes, s'appuient sur des hypothèses préétablies concernant l'émission, la libération et la dispersion du pollen ainsi que les réponses phénologiques ou la distribution des plantes en fonction des facteurs environnementaux. Ces modèles visent à prévoir la production et la libération de pollen ainsi qu'à reconstituer son trajet à partir de la source initiale (ex. : plante) jusqu'au capteur de mesure (90,106,107).

Modélisation numérique atmosphérique

La modélisation numérique atmosphérique des concentrations de pollen est effectuée à l'aide de systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air au sein desquels est intégré le modèle d'émission[29] pour le pollen cible. Le modèle d'émission pollinique permet d'estimer les émissions de pollen (saisonnières ou journalières) d'une plante en se basant sur le lien entre les conditions météorologiques, la densité des plantes, les paramètres phénologiques et la quantité de pollen libérée dans l'atmosphère, dérivée de données expérimentales (39,107). L'exactitude des concentrations polliniques fournies par les SAPMQA dépend en partie de la précision du modèle d'émissions polliniques. Ce dernier est sensible à la qualité de la cartographie de sources de pollen aéroporté (82). Plus cette cartographie est détaillée et actualisée, meilleurs sont les résultats de la simulation de l'abondance pollinique (concentration pollinique).

Les concentrations de pollen d'ambroisie ont été simulées sur des périodes de deux heures dans la province septentrionale de la Serbie (Voïvodine) à l'aide du système intégré de modélisation atmosphérique SILAM (*System for Integrated modeling of Atmospheric composition*). Les cartes ayant servi d'intrants du modèle d'émission pollinique ont été générées à l'aide de deux approches différentes : une approche descendante employant les données d'utilisation du sol ou de structure de la végétation et une approche écologique. Les auteurs ont noté que le système SILAM, utilisant les cartes de distribution de pollen d'ambroisie construites au moyen de la modélisation écologique, générait des concentrations journalières quantitativement similaires à celles mesurées (ou observées) ($R = 0,69$; $p < 0,01$). La corrélation était également forte ($R = 0,67$; $p < 0,01$) lorsque les cartes produites par l'approche descendante (basée sur les catégories d'occupation du sol) avaient été utilisées. Les cartes issues de l'approche descendante utilisant les données de structure de la végétation étaient celles qui avaient cependant une corrélation moins élevée ($R = 0,59$; $p < 0,01$) (83).

Un groupe de chercheurs a cartographié des indicateurs polliniques simulés à l'échelle géographique de l'Europe centrale avec une résolution spatiale de 12 km × 12 km. Les auteurs ont intégré le modèle d'émission du bouleau au système WRF-Chem afin de simuler la somme saisonnière de pollen, de même que les dates de début et de fin de la saison pollinique du bouleau pour les années 2015 et 2016. Ils ont noté que le système était en mesure d'estimer les concentrations de pollen de bouleau supérieures à 20 grains/m^3 avec une probabilité de

[29] Voir le glossaire.

détection[30] de 0,78 et un taux de succès de 0,75 pour la saison pollinique de 2015. La probabilité de détection et le taux de succès concernant l'estimation des concentrations supérieures à 90 grains/m^3 pour la même saison pollinique étaient respectivement de 0,75 et 0,57 (108).

Au Canada, Robichaud et Comtois (109) ont cartographié les concentrations moyennes mensuelles de pollen de bouleau avec une résolution spatiale de 10 km × 10 km pour l'année 2012. Les auteurs ont adapté le modèle d'émission pollinique pour le pollen du bouleau, développé en Europe par Helbig *et al.* (110). Ce modèle a été intégré au système régional météo-chimie GEM-MACH pour déterminer la distribution temporelle et spatiale des concentrations de pollen, de l'échelle locale à l'échelle régionale (R = 0,68 comparées aux concentrations mesurées, et 0,73 comparées aux concentrations modélisées par une autre approche) (109).

D'autres groupes de chercheurs ont utilisé le modèle chimie-transport CHIMERE et le modèle climatique régional RegCM4 pour produire des cartes illustrant les concentrations moyennes annuelles de l'herbe à poux à l'échelle de l'Europe avec une résolution spatiale de 50 km × 50 km pour la période de 1986 à 2005. De même, les auteurs ont intégré deux scénarios d'émissions (RCP 4.5 et RCP 8.5[31]) afin de produire des cartes illustrant la concentration de pollen en 2050 (92).

Un groupe de chercheurs, ayant simulé les concentrations journalières de l'herbe à poux (*Ambrosia artemisiifolia L.*) en France pour l'année 2012 à l'aide du système COSMO-ART[32], a noté que les concentrations simulées étaient très proches de celles observées lorsque les cartes générées à l'aide de l'approche descendante avaient été utilisées. En revanche, la performance du système diminuait lorsque les cartes construites à partir d'approches ascendante et écologique avaient été utilisées. Les auteurs ont expliqué ces faibles performances du système en évoquant le caractère prédictif et les limites des approches méthodologiques se rapportant aux hypothèses d'évaluation des conditions climatiques favorisant la croissance de l'herbe à poux (ex. : dispersion illimitée des pollens et la non-éradication de l'herbe à poux) (82). Les détails de ces modèles peuvent être consultés dans le tableau A3-6 en annexe 3.

---

30 La probabilité de détection est une mesure statistique qui permet d'évaluer la performance d'un modèle. Elle varie entre 0 (nulle) et 100 (très bonne).

31 RCP 4.5 : scénario à émissions mondiales modérées. Ce scénario comprend des mesures pour limiter (atténuer) les changements climatiques.
RCP 8.5 : scénario à fortes émissions mondiales. Ce scénario entraîne le réchauffement le plus prononcé (réf. : https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/changements-climatiques/centre-canadien-services-climatiques/essentiels/scenarios-modeles.html).

32 Dans la plateforme COSMO-ART, COSMO représente le modèle numérique de prévision météorologique, conçu à l'origine par le service météorologique allemand. L'extension ART (Aerosols and Reactive Trace gases) représente le modèle destiné à la dynamique des aérosols et à la chimie des gaz à l'état de traces (O_3, CO, NOx, SO_2, VOC).

3.3 Cartographie des risques d'allergie et des effets de santé liés aux pollens allergènes

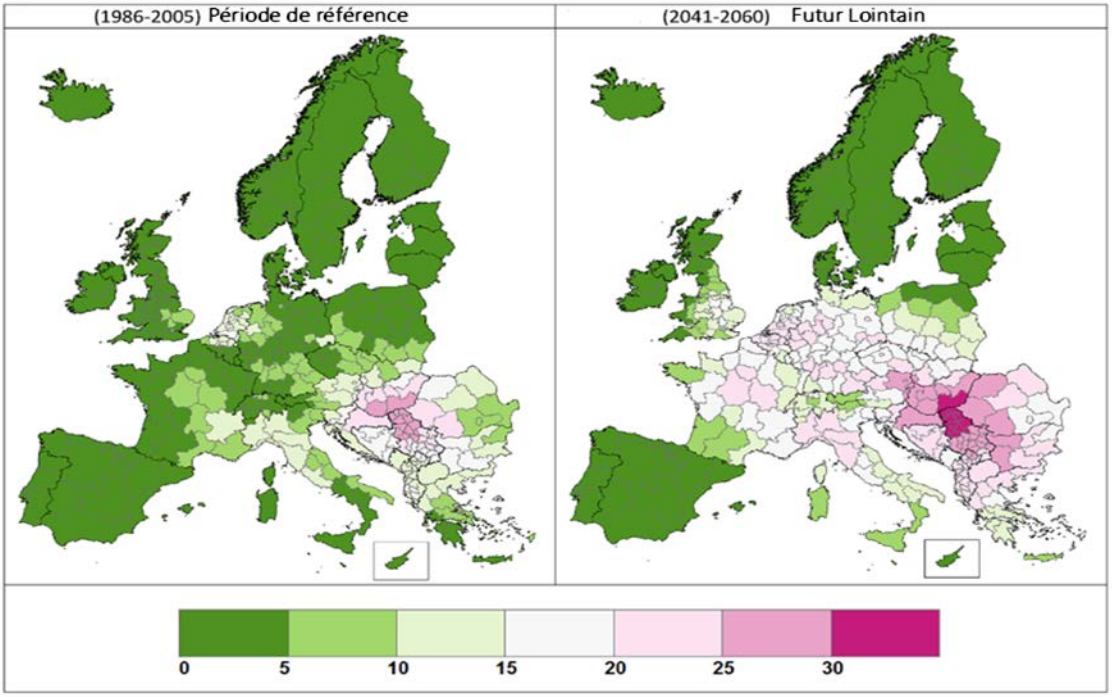
Lake *et al*. (111) ont quantifié l'impact potentiel des changements climatiques sur les allergies causées par le pollen aéroporté. Les auteurs ont d'abord estimé l'impact des changements climatiques sur l'aire géographique de l'herbe à poux par modélisation basée sur les processus décrits à la section 3.2.1.2 (p. 25). Cette information a été intégrée dans un modèle de chimie-transport CHIMERE et dans un modèle climatique régional RegCM4 pour simuler les concentrations polliniques actuelles (1986–2005) et futures (2041–2060) selon deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP 4.5, RCP 8.5) en Europe. Les auteurs ont quantifié l'impact potentiel des concentrations futures du pollen d'herbe à poux sur le taux de sensibilisation allergique, à l'aide de la relation exposition-risque (relation entre la prévalence de sensibilisation et le niveau de concentration pollinique-R2 = 38,4 %) associée à chaque site (ex. : pays) pour la période de référence (1986–2005). Les données sur la prévalence ayant servi à construire la courbe dose-réponse étaient extraites de la littérature. Les auteurs ont produit des cartes à 50 km × 50 km de résolution spatiale à l'échelle géographique de l'Europe pour illustrer la prévalence (en pourcentage) actuelle et future de la population sensibilisée (voir la figure 11 p. 40) à l'herbe à poux (111).

Un autre groupe de chercheurs a généré une cartographie de prévalence de la sensibilisation allergique à l'herbe à poux chez la population générale avec une résolution spatiale de 10 km × 10 km. La sensibilisation allergique à l'herbe à poux a été estimée pour toute l'Europe au moyen de l'interpolation spatiale, à partir de données sur la prévalence de l'allergie à l'herbe à poux associée à chaque site (ou zone géographique). Les données ont été colligées après la réalisation d'une revue de littérature ne ciblant que des études publiées après l'année 2000 et ayant fait mention des tests cutanés et biologiques effectués sur des populations européennes (112).

Le nombre présumé de personnes sensibilisées à l'herbe à poux est déterminé en multipliant les prévalences de sensibilisation allergique (chez la population générale) par la population locale de chaque maille de 10 km × 10 km (112,113).

En France, un indice multifactoriel dénoté risque allergique lié à l'exposition (RAEP) a été développé par le Réseau national de surveillance aérobiologique (RNSA) à partir de concentrations polliniques antérieures, de prévisions météorologiques ainsi que d'observations cliniques (ex. : la sévérité des symptômes, le nombre de patients et patientes présentant des symptômes d'allergie ayant consulté ou téléphoné au cours des sept derniers jours) et phénologiques (voir l'annexe M2 (p. 75) pour la méthode de calcul). Mentionnons que cet indice est spécifique à une famille de pollen.

Figure 11 **Prévalence (en %) actuelle (période de référence) et future de la population générale sensibilisée à l'herbe à poux en Europe sur une carte de 50 km × 50 km**



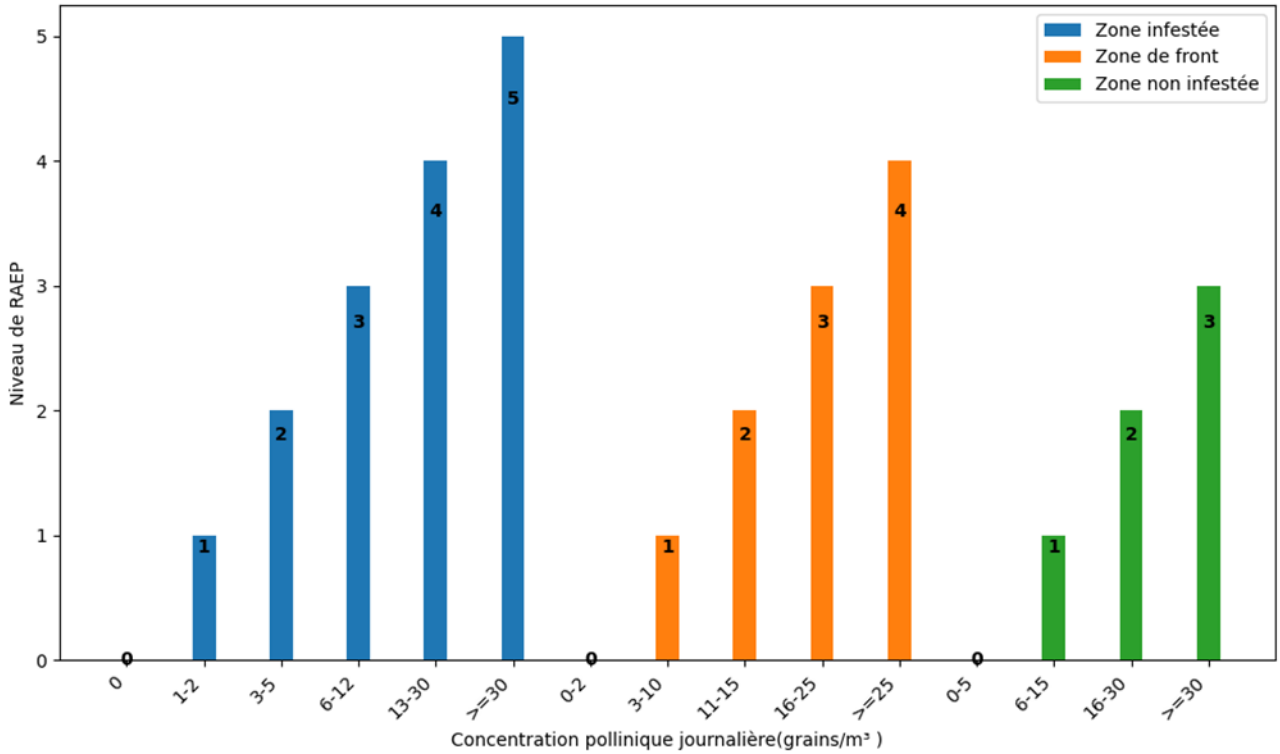
Source : adapté de Lake *et al.*, 2017 (111).

Le RAEP est cartographié avec des mailles de 3 km × 3 km pour toute la France. D'autres cartes sont produites à l'échelle communale en agrégeant les mailles de 3 km × 3 km. Le RAEP peut être catégorisé jusqu'à cinq niveaux : 0 = aucun risque; 1 = très faible risque; 2 = faible risque; 3 = risque moyen; 4 = risque élevé; 5 = risque très élevé. Les personnes allergiques peuvent présenter des symptômes lorsque le niveau de risque sanitaire (le RAEP) est supérieur ou égal à 3 (113). Une correspondance peut être établie entre les concentrations journalières de pollen et les niveaux de RAEP. Cette correspondance varie en fonction du degré d'envahissement du territoire à l'étude par l'ambroisie. La figure 12 (p. 41) présente le lien entre les concentrations journalières de pollen d'ambroisie et les niveaux de RAEP lié au pollen d'ambroisie selon le degré d'envahissement du territoire.

Un autre groupe de recherche a réussi à prédire les symptômes de la rhinite allergique un jour à l'avance pour un groupe de patients et patientes dans les régions de Vienne et de Basse-Autriche, à l'aide des algorithmes d'apprentissage automatique, à partir de deux bases de données. La première base de données, Pollen Hay Fever Diary (PHD), est un système qui recueille les symptômes journaliers autorapportés. Dans le système, un score basé sur la sévérité des symptômes est attribué à chaque patient et patiente. La deuxième base de données comprend les concentrations journalières ou annuelles mesurées et prédites au moyen des SAPMQA. Les chercheurs ont atteint un R = 0,71 ±0,17 (moyenne ± écart type) pour un

échantillon de 219 utilisateurs ayant contribué majoritairement au PHD et un R = 0,66 ± 0,18 pour un échantillon de 393 utilisateurs, avec des contributions mineures au PHD (114).

Figure 12 Correspondance des concentrations journalières de pollen et des niveaux de RAEP selon le degré d'envahissement du territoire par l'ambroisie



Notes : La zone de front se trouve à la limite de la zone infestée et les plants d'ambroisie peuvent s'y développer. Les données ayant servi à construire ce graphique ont été extraites du rapport de l'Anses (113).

4 DISCUSSION

4.1 Méthode de détection de pollen allergène

Un grand nombre d'études (n = 43) portant sur les méthodes de détection de pollens allergènes ont été identifiées par le biais de cette revue. En analysant les résultats extraits de ces études, quelques observations et tendances émergent. Les systèmes de détection automatisée semblent susciter l'intérêt des acteurs et actrices œuvrant dans le suivi de pollens en raison principalement de leur capacité de fournir de l'information en temps quasi réel (jusqu'à moins de 3 h entre la capture de grain de pollen et la diffusion de l'information). Toutefois, même si une tendance baissière des coûts d'acquisition des capteurs automatiques a été observée ces dernières années, ils demeurent assez élevés. La comparaison concernant les méthodes de détection de pollens allergènes est présentée dans le tableau 5 (p. 46).

Vers les méthodes de détection automatisée afin de réduire le temps d'analyse et de fournir des données en temps quasi réel

Un nombre important des stations de suivi de pollens à travers le monde opèrent encore avec des méthodes manuelles (capteurs de prélèvements et analyse d'échantillon de pollen). Ces méthodes, encore appelées « étalon d'or », continuent de jouer un rôle déterminant dans le monitorage des pollens allergènes. Les mesures qui en découlent (ex. : concentration de pollen dans l'air) peuvent servir également de standard de comparaison pour les mesures prises par des systèmes employant des méthodes automatiques de détection de pollens. Cependant, étant donné que les mesures fournies par les capteurs manuels ne semblent pas exemptes de biais (115), de nouvelles méthodes standardisées de validation des mesures fournies par les capteurs automatiques sont déjà utilisées par des instituts de recherche (116).

Les analyses manuelles de détection de pollen permettent une identification des grains de pollen généralement au niveau du genre et de la famille et peu souvent au niveau de l'espèce(11).

Les organisations scientifiques de recherche sur le pollen ou les organisations régionales, nationales et continentales responsables des réseaux de suivi de pollens ont mis en place des protocoles standardisés dans le but de fournir des données ou des informations précises et reproductibles, facilitant la comparaison de données entre régions ou pays. Ces protocoles décrivent divers aspects du suivi environnemental du pollen, notamment la collecte et l'analyse des échantillons de pollens (41,117,118). Malgré l'instauration de protocoles standardisés et la grande popularité des capteurs manuels en raison de la facilité d'utilisation, des coûts d'acquisition et d'entretien relativement raisonnables, plusieurs auteurs ont relevé quelques limites des méthodes manuelles de détection de pollens. Une des limites est que ces dernières ne permettent pas de rapporter les concentrations de pollen en quasi-temps réel, principalement en raison des contraintes intrinsèquement liées aux capteurs (ex. : faible taux d'échantillonnage (31,64), ainsi que la disponibilité de données avec un retard pouvant aller

jusqu'à neuf jours en raison du rythme d'échantillonnage (relevé hebdomadaire) et du dénombrement manuel de pollens qui demeure une expérience chronophage (30,31,45,65,119).

Afin d'apporter des améliorations dans le suivi environnemental des pollens, des systèmes de détection automatisée basés sur des technologies novatrices telles que l'holographie numérique, la vision par ordinateur et l'apprentissage machine ont vu le jour et sont de plus en plus présents dans plusieurs réseaux de suivi de pollen à travers le monde. À ce jour, le Japon, pays précurseur des méthodes automatisées, comptabilise dans son réseau de suivi environ 120 capteurs KH-3000. Une des raisons avancées du succès de la détection automatisée du pollen dans ce pays est le fait que la diversité de pollens surveillés (la diversité botanique n'est pas moindre) est limitée, facilitant ainsi l'identification automatisée des grains de pollen par ordinateur (34).

4.1.1 Biais et limites des études sur les méthodes de détection de pollen

Les études qui comparent les capteurs de mesure de pollen comportent quelques limites. En effet, étant donné que la concentration de pollen dans l'air est influencée principalement par les conditions météorologiques, il n'est pas rare que certains types de pollen soient détectés en faibles concentrations. L'interprétation qui en découlerait pourrait être différente si ces types de pollens avaient été détectés avec des concentrations élevées. L'influence des conditions météorologiques sur la concentration de pollen n'est pas toujours évaluée dans ces études (15).

Dans les études comparant la performance des capteurs de prélèvement manuel à celle des systèmes de détection automatisée, la procédure de dénombrement de grains de pollens effectué à partir d'un échantillon fourni par le capteur manuel de type Hirst n'est pas entièrement réalisée en « aveugle ». Autrement dit, l'analyste peut ajuster les dates de début et de fin de saison et exclure les pics de concentration de pollens en dehors de la saison pollinique habituelle, en se basant sur sa connaissance de la phénologie locale et des caractéristiques des saisons propres à chaque taxon de pollen. De leur côté, les systèmes de détection automatisée peuvent mesurer ces pics de concentration (31). La deuxième limite est l'utilisation du capteur de type Hirst comme dispositif de référence, malgré certaines incertitudes rapportées (115).

Enfin, bien que le réglage du taux d'aspiration de l'air puisse aider à résoudre le problème de surcharge des particules, quelques incertitudes sont souvent pointées du doigt en ce qui concerne les systèmes de détection automatisée. En effet, ils sont moins efficaces pour identifier le pollen total en présence de poussière, de grains de pollen collés les uns sur les autres ou d'autres bioaérosols (30,31,120).

4.1.2 Portrait des méthodes d'échantillonnage et d'analyse des pollens allergènes au Québec

Capteur de prélèvements manuels et système de détection automatisée

Au Québec, les stations de détection de pollen encore opérationnelles à ce jour opèrent avec des méthodes manuelles. Elles sont constituées majoritairement des capteurs rotatifs à impaction de type GRIPST. À la lumière des résultats de cette revue de littérature, ce capteur de prélèvements manuels serait très efficace en présence des vitesses de vent enregistrées au Québec, dont la moyenne horaire varie entre 13, 0 km/h (au 1er mars) et 10,5 km/h (au 1er octobre)[33]. Laboratoires de recherche d'aérobiologie (Aerobiology Reseach Laboratories), une entreprise privée basée à Ottawa, en assure la gestion et compte en totalité 30 stations à travers le Canada, dont trois sont installées au Québec dans les villes de Sherbrooke, de Québec et de Montréal. Les données récentes ou archivées sur les concentrations polliniques journalières de plusieurs types de pollens d'arbres (bouleau, aulne, chêne, frêne et peuplier) de graminées et d'herbacées (herbe à poux), ainsi que les prévisions polliniques, sont mises à disposition d'un réseau de partenaires. Ce dernier inclut des médias (pour diffusion auprès du grand public), des professionnels et professionnelles de recherche, des allergologues et des entreprises pharmaceutiques. La microscopie optique est la méthode d'analyse des échantillons de pollens la plus largement utilisée dans le réseau québécois.

Les stations avec les capteurs dédiés à la détection des allergènes de pollen, bien qu'encore rares au Québec, pourraient s'avérer utiles dans le futur dans un contexte de changements climatiques. Les données fournies par ces stations pourraient permettre la modélisation des niveaux d'allergène de pollen dans l'air et aider à élucider la nature des synergies complexes entre le pollen, son allergène, les polluants de l'air et le changement climatique.

En outre, l'utilisation des systèmes de détection automatisée de pollens étant récente, il serait judicieux de procéder dans un avenir proche à une campagne de validation d'au moins un système de détection automatisée dans chacune des villes suivantes : Montréal, Québec et Sherbrooke. Les campagnes de validation des systèmes de détection automatisée de pollen sont à ce jour menées notamment aux États-Unis et en Norvège.

Quant au possible choix de capteur de prélèvements manuels, celui-ci dépendra du type de pollen à surveiller, des conditions environnementales des sites (ex. : vitesse des vents) ainsi que des coûts d'acquisition, d'utilisation et d'entretien.

[33] https://fr.weatherspark.com/s/26469/2/M%C3%A9t%C3%A9o-moyenne-en-automne-%C3%A0-Qu%C3%A9bec-Canada#Figures-WindSpeed

Configuration du réseau de suivi de pollen

Au Québec, la distance entre les stations d'échantillonnage des pollens atteint des centaines de kilomètres, puisque ces dernières ont uniquement été installées dans les trois régions municipales de recensement (RMR)[34] les plus peuplées. Cette configuration pourrait être convenable s'il y a peu de variabilité des concentrations de pollen dans l'air entre les stations en raison d'un couvert végétal et de conditions physiographiques relativement uniformes (121). Or, ailleurs dans le monde, des groupes de recherche ont relevé que certaines régions peuvent présenter un profil pollinique non homogène caractérisé par des variations spatiales de concentrations de pollen dans l'air très marquées entre les stations espacées de quelques kilomètres seulement (122,123). Les variations de concentration de pollen, qui sont parfois très localisées, peuvent être mesurées grâce à un réseau très dense de stations de mesure (composé de stations espacées d'à peine quelques dizaines de kilomètres). En théorie, plus le réseau de stations est dense, plus ses opérateurs sont aptes à mesurer la variabilité des concentrations de pollen de l'air ambiant avec précision et plus la résolution temporelle et spatiale des analyses produites est élevée. Toutefois, les coûts associés au déploiement et au maintien d'un tel réseau peuvent s'avérer importants. Par conséquent, il s'avère nécessaire de considérer de façon combinée la distribution de la population, les analyses de variation des concentrations de pollen dans l'air ainsi que d'autres critères (ex. : la station doit être capable de détecter les pollens dès le début de la saison) afin d'optimiser la configuration d'un réseau de suivi pollinique.

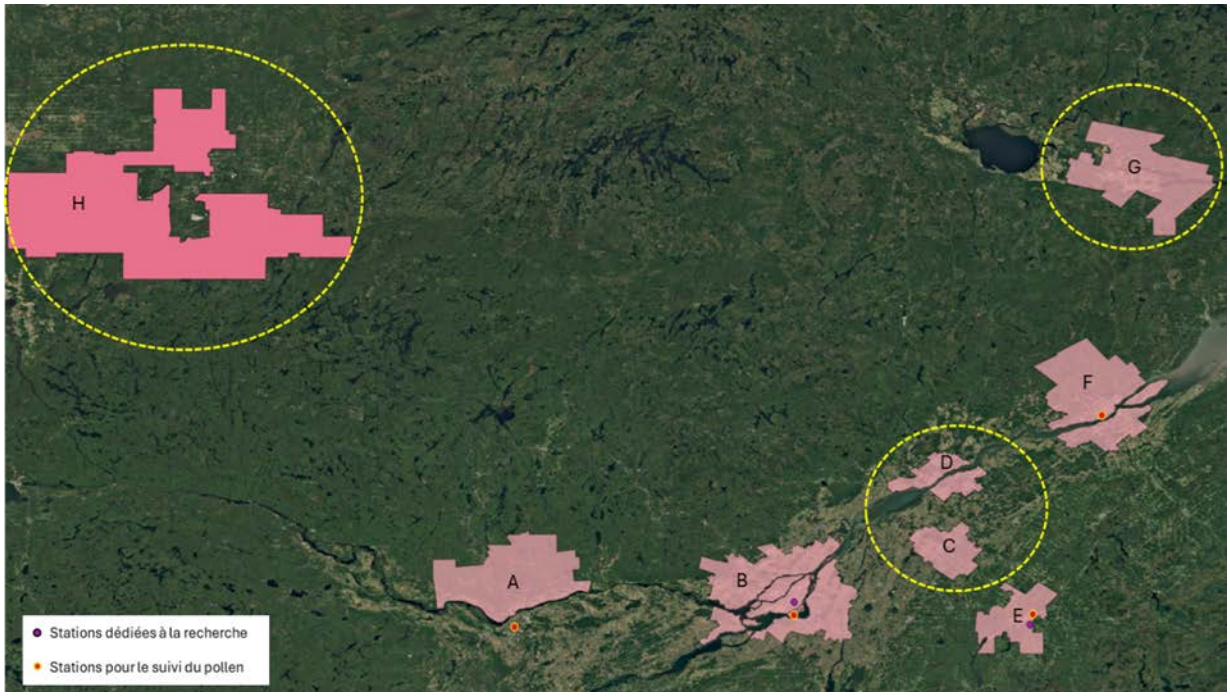
In fine, il semble encore trop tôt pour déterminer le nombre de stations nécessaires pour couvrir la totalité du territoire de la province en raison de la disponibilité limitée de données. Néanmoins, dans le but d'informer le grand public, les professionnels et professionnelles de la santé (ex. : allergologues) et les autorités locales, il semble raisonnable que les zones encerclées en jaune sur la carte (figure 13 p. 47) soient munies d'au moins une station de pollen en raison de leur démographie plus élevée qu'ailleurs en province (plus de 100 000 habitants). Cette configuration peut servir de point de départ en attendant les résultats des travaux ultérieurs consacrés au suivi du pollen en milieu urbain. Il est à noter que la zone d'influence de la station de mesure d'Ottawa peut s'étendre jusqu'à la RMR d'Ottawa-Gatineau (A), c'est pourquoi elle n'est pas encerclée en jaune.

[34] Une région métropolitaine de recensement (RMR) ou une agglomération de recensement (AR) est formée d'une ou de plusieurs municipalités adjacentes situées autour d'un centre de population (aussi appelé le noyau). Une RMR doit avoir une population totale d'au moins 100 000 habitants.

Tableau 5 Comparaison des dispositifs de mesure de pollens

	Capteur volumétrique de type Hirst	Capteur rotatif à impaction de type Rotorod	Système de détection automatisée
Méthode d'échantillonnage de grains de pollen	Manuel	Manuel	Automatique
Vitesse de capture	10 L/min	S. O.	De 0,3 à 100 L/min
Résolution temporelle	Jusqu'à moins de 9 jours	Jusqu'à moins de 9 jours	Jusqu'à moins de 3 h
Taille de grains de pollen	> 3,7 µm ou 5 µm	> 10 µm	0,5 à 100 µm
Efficacité	Efficace en présence de vent de faible vitesse (5,4 km/h)	Efficace en présence de vent de vitesse modérée (entre 10,8 et 21,6 km/h)	S. O.
Marque	Burkard et Lanzoni	Rotorod et GRIPST	Plusieurs (ex. : BAA500, APS-400, Swisens-Poleno, Jupiter
Concentration de pollen d'urticacée dans l'air	Échantillonne plus les grains de pollen de la famille des urticacées	Échantillonne moins les grains de pollen de la famille des urticacées	S. O.
Identification de taxons de pollen	Peut identifier des nouveaux taxons de pollen	Peut identifier des nouveaux taxons de pollen	Encore incapable d'identifier de nouveaux taxons de pollen
Coût d'acquisition (capteur + équipement de laboratoire	Moins élevé	Moins élevé	Élevé, mais tend à baisser
Efficacité de détection	Capable d'identifier plusieurs types de pollen	Capable d'identifier plusieurs types de pollen	Seulement les types de pollen pour lesquels il a été entraîné
Coût d'entretien sur le long terme	Élevé	Élevé	Moins élevé

Figure 13 **Région métropolitaine de recensement (RMR)/Agglomération de recensement (AR) et distribution géographique des stations d'échantillonnage de pollen répertoriées au Québec**



Notes : A : RMR d'Ottawa-Gatineau avec une population de 1 488 307 habitants; B : RMR de Montréal avec une population de 4 291 732 habitants; C : RMR de Drummondville avec une population de 101 610 habitants; D : RMR de Trois-Rivières avec une population de 161 489 habitants; E : RMR de Sherbrooke avec une population de 227 398 habitants; F : RMR de Québec avec une population de 839 311 habitants; G : RMR de Saguenay avec une population de 161 567 habitants; H : agglomération de recensement de Val-d'Or, Amos, et Rouyn-Noranda avec une population combinée de 95 223 habitants.
Source : issue de l'INSPQ.

4.2 Cartographie de pollens

4.2.1 Cartographie de sources d'émission de pollen

Les approches méthodologiques pour cartographier la répartition, la présence ou l'absence de plantes allergènes, inspirées de la littérature, ont été principalement développées pour l'herbe à poux en raison de son pollen très allergisant.

L'approche ascendante a été utilisée pour cartographier de nombreuses sortes de plantes (arbres, herbacées et graminées).

Les modèles associés à l'approche écologique permettent de quantifier l'impact des changements climatiques sur l'expansion géographique d'une plante. D'ailleurs, les deux MDE basés sur les processus mentionnés plus haut ont été utilisés en Europe pour mesurer l'impact

du changement climatique sur la propagation de l'herbe à poux. Ils sont en mesure d'estimer avec une bonne précision les niches réalisées[35] de l'espèce. Par ailleurs, les modèles basés sur des méthodes statistiques ou d'apprentissage automatique sont en mesure de distinguer les probabilités de présence et d'absence de l'herbe à poux avec une précision élevée.

Aucune approche n'est nécessairement meilleure ou mauvaise. Le choix de l'une d'entre elles peut dépendre du territoire d'application ou des objectifs. Les performances des approches sont beaucoup influencées par le territoire d'étude et même des sites au sein d'une même région.

En météorologie et en aérobiologie, les cartes numériques de sources de pollen aéroporté peuvent servir d'intrants dans les modèles de simulation des indicateurs de pollen (ex. : concentration pollinique) (36,82,124). Dans ce cas précis, une étude réalisée dans le contexte européen a montré que les cartes numériques fournies par l'approche descendante, utilisées comme données d'intrant des SAPMQA, étaient meilleures que celles fournies par les approches ascendante et écologique (82).

En aménagement urbain, les cartes des sources de pollen aéroporté, notamment celles affichant le potentiel allergène des arbres, peuvent contribuer à la planification urbaine, incluant les parcs et les espaces verts (71,72,74,76,78,81,125,126).

En écologie environnementale, les cartes des sources de pollen aéroporté, notamment celles produites par le biais d'approches ascendante et écologique, permettent une gestion stricte des terres afin de minimiser l'infestation de ces dernières par les plantes allergènes (73,127).

De plus, les cartes produites par l'approche descendante peuvent guider le choix des emplacements des capteurs de pollen (95).

Les méthodes orientées vers les sources de pollens allergènes ne cartographient pas l'exposition directe aux pollens en suspension dans l'air. Toutefois, tout comme les méthodes de cartographie des concentrations polliniques, elles ont des applications diverses en santé publique : elles peuvent soutenir les stratégies d'adaptation en réponse aux changements climatiques (40,90,106,111,128), contribuer, à titre d'intrant, aux études épidémiologiques visant à documenter l'exposition de la population aux plantes ou pollens allergènes sur les court, moyen et long termes (36–40,99,101,106,113,129) et, finalement, servir d'outils aux professionnels et professionnelles de la santé et aux personnes allergiques dans la prévention des allergies causées par les pollens allergènes (36,72,100,102,103,108,125,130,131).

[35] La niche réalisée regroupe les conditions disponibles pour une espèce en intégrant les niches des autres espèces du milieu (réf. : https://www.observatoire-poissons-seine-normandie.fr/lexique).

4.2.1.1 Biais et limites des études sur la cartographie de sources de pollen

Les informations fournies par l'approche ascendante ne sont pas constamment disponibles et certaines variables sont parfois manquantes (absence des statistiques telles que le nombre de plantes, le pourcentage d'une espèce de plante par rapport à l'ensemble des plantes). De plus, la mise à jour de ces informations sur une base régulière (ex. : annuelle) demeure un autre enjeu limitant leur usage comme données d'intrants des modèles (72,82).

Les limites méthodologiques associées à l'approche descendante relèvent des hypothèses sur la quantité de plantes et de pollens libérés dans un rayon donné (en kilomètre) à partir de la station de mesure de pollens. Il est supposé que la quantité de pollens mesurée à la station représente la quantité des plantes et de pollens libérés dans l'air dans un rayon donné. Ces hypothèses limitent l'emploi de cette approche dans des régions présentant des variations topographiques marquées, ou des régions fortement dominées par des pollens issus d'un transport sur plusieurs kilomètres (de 100 à 1 000 km). D'autres limites associées à cette approche sont le manque de détails et de précision relatifs aux catégories d'utilisation du sol et la non-disponibilité des données polliniques mesurées (82,86).

Les MDE basés sur les processus peuvent devenir très complexes, nécessitant une grande quantité de paramètres, mesurés expérimentalement, ainsi que des données empiriques de météorologie et de phénologie afin d'ajuster les modèles (91).

Une des limites des MDE basés sur des méthodes statistiques ou d'apprentissage automatique est de considérer que la distribution observée de la plante a atteint sa stabilité dans son environnement (90,91). Une étude a rapporté que l'herbe à poux pouvait se développer dans un environnement réputé défavorable en raison de son adaptation à ce nouvel environnement (39). Autrement dit, les MDE basés sur des méthodes statistiques ou d'apprentissage automatique partent du principe que l'herbe à poux se développe dans un environnement favorable et meurt dans un environnement défavorable. Une autre limite est de ne pas prendre en compte l'influence des activités humaines (éradication de l'herbe à poux) et les caractéristiques du sol (ex. : drainage) sur la densité de couvert de la plante (82). Le tableau 6 (p. 51) compare les méthodes de cartographie de sources de pollens.

4.2.1.2 Portrait de l'application au Québec des méthodes de cartographie des sources de pollen

L'approche ascendante a été déjà appliquée au Québec pour cartographier le niveau d'infestation de l'herbe à poux le long du réseau routier supérieur pour la ville de Saint-Jean-sur-Richelieu (77) ou sur certaines catégories d'utilisation du sol (ex. : terrains commerciaux) des territoires de Beauport, de Pierrefonds-Roxboro et de la municipalité de Granby. À ces territoires s'ajoute la ville de Montréal, pour laquelle le potentiel allergène d'espèces d'arbres a été cartographié. En revanche, les approches descendante et écologique demeurent sous-exploitées en raison notamment du nombre limité de stations de mesure de pollens (trois stations sont

opérationnelles au Québec) et d'une sous-utilisation des données de signalement de la présence des plantes allergènes comme l'herbe à poux.

Au Québec, plus de 90 % des pollens de bouleau mesurés sur l'Île-de-Montréal proviennent de la région des Laurentides (entre 400 et 500 km de la station de mesure) et seulement 1 % est d'origine locale (109). Il existe des études dans la littérature qui soulignent le transport de l'herbe à poux sur de longues distances ailleurs dans le monde (132,133). En tenant compte de cette réalité, l'étude sur l'origine du pollen des autres plantes allergènes (locale ou en provenance d'une source lointaine) apparaît comme une démarche judicieuse avant de considérer l'utilisation de l'approche descendante dans le contexte géographique québécois.

De plus, l'approche écologique s'appuyant sur les processus internes ou externes à la plante semble présenter peu d'intérêt pour les petites aires géographiques comme les villes. En revanche, elle peut s'appliquer sur une étendue plus vaste (ex. : la province du Québec) pour modéliser les espèces d'ambroisie dont l'aire de répartition s'est déplacée sous l'effet des changements climatiques. Dans cette optique, il serait alors essentiel que les modèles existants soient adaptés au contexte biogéographique québécois, voire canadien.

Tableau 6 Comparaison des méthodes de cartographie de sources de pollen

Approche	Ascendante (*Bottom-Up*)	Descendante (*Top-Down*)	MDE basés sur les processus	MDE basés sur les méthodes statistiques et A.A.	Apport de la télédétection
Définition	Inventaire des plantes émettrices de pollens allergènes	Utilise la somme annuelle de pollen des comptes polliniques	Modèle théorique[36]	Modèles[37] statistiques ou d'apprentissage automatique	Utilise principalement les données collectées par satellite, par avion ou drone
Type de plante	Arbres, graminées, herbacées (plants d'herbe à poux)	Graminées, plants d'herbe à poux	Plants d'herbe à poux	Plants d'herbe à poux	Arbres, graminées
Indicateur à cartographier	• Localisation des plantes • Potentiel allergène (PA) • Autres[38]	Niveau d'infestation (en %)	• Indice climatique de qualité de l'habitat • Probabilité de présence de l'herbe à poux • Niches réalisées	Probabilité de présence ou d'absence de l'herbe à poux	• Localisation géographique • Nombre ou proportion de la plante par grille • Probabilité de présence de l'herbe à poux
Scénarios climatiques	Non	Non	Oui	Oui	Non

[36] Modèle théorique décrivant l'interaction des facteurs environnementaux sur les traits fonctionnels (ex. : phénologie) de la plante.

[37] Utilise des modèles statistiques ou d'apprentissage automatique pour prédire la probabilité de présence ou d'absence d'une plante.

[38] Valeur du potentiel allergène (VPA), indice d'allergénicité des zones vertes en milieu urbain (indice AIROT) et nombre de plantes dans chaque grille.

Tableau 6 Comparaison des méthodes de cartographie de sources de pollen (suite)

Approche	Ascendante (*Bottom-Up*)	Descendante (*Top-Down*)	MDE basés sur les processus	MDE basés sur les méthodes statistiques et A.A.	Apport de la télédétection
Limites	• Variables parfois manquantes (ex. : nombre de plantes) • Enjeux de mise à jour des informations sur une base régulière	• Moins pertinente pour les régions fortement dominées par des pollens d'origine non locale[39] • Nécessite un réseau dense de stations de mesure	• Complexité des modèles nécessitant une grande quantité de paramètres mesurés expérimentalement	• Stabilité des processus[40] • Non prise en compte d'autres facteurs[41]	• Problème de confusion spectrale concernant les plants d'herbe à poux
Application (Québec)	A déjà été utilisée au Québec	Avant de l'appliquer, il faut s'assurer d'abord que le pollen cible est d'origine locale pour la région à l'étude	Développer des modèles ou adapter des modèles existants	Collecter les données de présence ou d'absence de l'herbe à poux	A été déjà testée au Québec (Montréal)

[39] Les pollens issus d'un transport sur plusieurs kilomètres.

[40] Considère que les processus d'interaction de la plante vis-à-vis de différents environnements demeurent les mêmes.

[41] L'influence des activités humaines et des caractéristiques du sol sur la densité de la plante ne sont pas prises en compte.

Tableau 7 Comparaison des méthodes de cartographie des niveaux d'abondance pollinique

Approche	Modèles empiriques	Modèles basés sur les processus
Définition	Exclusivement basés sur l'utilisation des données d'observations antérieures (ex. : concentration pollinique, température)	S'appuient sur des hypothèses préétablies concernant la libération, l'émission et la dispersion du pollen, ainsi que les réponses phénologiques ou la distribution des plantes en fonction des facteurs environnementaux
Type de modèle	• Régression linéaire • Apprentissage automatique (AA) • *Land Use Regression* • Interpolation géostatistique	• Modélisation numérique atmosphérique
Type de plante	Arbres, graminées, herbacées (plants d'herbe à poux)	Arbres, graminées, herbacées (plants d'herbe à poux)
Indicateur à cartographier	• Concentrations polliniques dans l'air • Probabilité de forte concentration pollinique dans l'air	• Concentrations polliniques dans l'air
Scénarios climatiques	Non	Oui
Limites	• Nécessitent une grande quantité de données d'entrée pour leur entraînement • Moins efficaces pour les jours avec des concentrations atypiques pour lesquelles ils n'ont pas été entraînés	• Prévisions des concentrations futures non validées à l'aide des valeurs réelles fournies par des capteurs • Ne sont pas souvent utilisés pour produire des variations spatiales fines à l'échelle géographique des villes
Application (Québec)	Utilisés par des firmes privées	• Pas encore utilisés de façon opérationnelle • Recherches académiques ont montré la pertinence pour le pollen de bouleau

L'utilisation des modèles de distribution des espèces (MDE) basés sur des méthodes statistiques ou d'apprentissage automatique est encore récente au Québec. En effet, les données provenant des plateformes en ligne (ex. : plateforme de signalement de l'herbe à poux), la disponibilité des données d'utilisation du sol et climatiques, ouvrent des perspectives intéressantes quant à l'exploration de ces MDE. Ils permettent à la fois de dresser un portait actuel concernant la distribution géographique de la probabilité de présence de la plante allergène et de prévoir son évolution dans le temps par l'intermédiaire des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Il existe dans plusieurs pays des plateformes dédiées au signalement de la présence de l'herbe à poux, dans lesquelles les photos des plants d'herbes à poux, prises souvent par le grand public, sont validées manuellement ou de façon automatisée. En l'absence d'une plateforme comparable au Québec, il semble pertinent d'avoir recours à la plateforme iNaturalist[42]. Cette dernière regorge des données de signalement de la présence de plusieurs espèces de plantes à l'échelle planétaire.

Mentionnons également que dans ces modèles (MDE), les données environnementales les plus couramment utilisées comprennent la température, l'utilisation des sols et la végétation. Par ailleurs, d'autres types des données pourraient également être intégrés dans les MDE dans une optique d'amélioration des performances des modèles en climat actuel ou futur. Parmi ces types de données, citons notamment les concentrations de CO_2 (94) et celles en lien avec la modification de l'environnement introduite par l'homme (ex. : changement de l'occupation des sols) (40) et l'adaptation de l'herbe à poux dans des environnements connus défavorables (ex. : phénologie) (39,40).

4.2.2 Méthodes de cartographie du niveau de pollen dans l'air

L'abondance pollinique peut varier d'une station d'échantillonnage à une autre en raison des conditions environnementales propres à chaque localité, ainsi que des sources de pollens retrouvées à proximité des stations. En effet, des variations géographiques des concentrations de pollens dans l'air ont été relevées au sein d'une même zone urbaine (134,135), d'où l'intérêt croissant de construire des cartes illustrant ces variations.

4.2.2.1 Des modèles dits empiriques pour la cartographie des concentrations de pollen dans l'air

Les modèles s'appuyant sur les méthodes statistiques ou d'apprentissage automatique pour inférer les concentrations ou les probabilités d'observer certaines concentrations polliniques à partir d'indicateurs dérivés des données météorologiques sont assez robustes pour les jours avec des concentrations élevées de pollens (100,105). Un des modèles, soit celui développé par Csepe *et al*. (100), a permis de mettre au point un système d'alerte de concentration de pollen de l'herbe à poux destiné au public dans la région biogéographique pannonienne (RBP)[43] en

[42] iNaturalist est une plateforme en ligne de partage de l'information sur la biodiversité, basée sur la contribution des utilisateurs (réf. : https://inaturalist.ca/pages/what-is-it-fr).

[43] La région RBP comprend l'ensemble de la Hongrie, de vastes régions de la Croatie, de la Serbie, de la Slovaquie et de la Slovénie, ainsi que des zones périphériques d'Autriche, de République tchèque, de Roumanie et d'Ukraine.

Europe centrale. Dans ce système, les cartes sont conçues pour faciliter leur interprétation auprès du grand public en mettant un accent sur les catégories des concentrations de pollen et le code de couleur associé. D'autres types de données, notamment les données de réseau social X (10) et les données issues des images satellitaires (ex. : NDVI) (101) pourraient être intégrées dans les modèles. Par ailleurs, mentionnons que l'utilisation d'indicateurs dérivés d'images satellitaires améliore la performance et permet de capturer les variations spatiales de concentrations polliniques à l'échelle locale (ex. : ville) (99,101).

La cartographie de concentrations de pollen dans l'air ou de la probabilité de concentration élevée de pollen à une échelle locale peut faciliter l'évaluation rétrospective de l'exposition au pollen. Elle pourrait également être utilisée dans les études transversales comparant les prévalences des allergies au pollen selon le lieu de résidence ou d'autres sites d'intérêt (lieu de travail).

- Biais et limites des études sur la cartographie de l'abondance pollinique à l'aide de l'apprentissage automatique

Il convient de noter que même si les modèles basés sur l'apprentissage automatique semblent devenir la norme, ils nécessitent une grande quantité de données d'entrée (accumulées souvent pendant plusieurs années) pour leur entraînement et sont souvent moins efficaces à l'égard de la prédiction pollinique concernant les jours avec des concentrations atypiques pour lesquelles ils n'ont pas été entraînés (99,101).

Les modèles dits empiriques ne prennent pas en compte le transport de pollen sur de moyennes et longues distances. Cependant, plusieurs études ont rapporté que le pollen, une fois libéré par la plante, peut être transporté par le vent sur plusieurs kilomètres (quelques centaines de kilomètres) (83,108,124,136,137). Bien que le nombre de grains de pollen ainsi transportés soit faible par comparaison avec celui des grains déposés à proximité de la source, ces grains de pollen peuvent être altérés par les conditions environnementales (pollution de l'air, température et humidité élevée) au cours de leur transport aérien et, dans certains cas, devenir très allergisants (138). La non-prise en compte de ce phénomène dans les modèles, ainsi que d'autres variables telles que la variation spatio-temporelle des caractéristiques des saisons polliniques, le changement de la distribution de certaines plantes à proximité de la station de mesure, ou encore l'écart de distance entre la station météo et celle de mesure du pollen, sont susceptibles d'introduire des erreurs dans les résultats (100,105).

- Portrait d'application au Québec des méthodes de cartographie de l'abondance pollinique à l'aide de l'apprentissage automatique

Au Québec, les prévisions polliniques résultant de ce type de modélisation sont produites par une entreprise privée. Il est clair que le nombre de stations de mesure de pollens en service n'est actuellement pas suffisant pour produire des données probantes en utilisant une approche géostatistique. En revanche, dans la perspective de développer un système d'alerte pollinique

s'inspirant de celui développé dans la région biogéographique pannonienne, il serait judicieux que les données polliniques issues des stations de mesure de pollens des provinces voisines du Canada soient intégrées au modèle. De plus, avec la disponibilité des données environnementales (ex. : catégorie d'utilisation du sol, images satellitaires), le modèle spatio-temporel de prédiction des concentrations élevées de pollen, inspirés des travaux de Nowosad (105) pourrait être mis à profit, voire bonifié. Dans le même ordre d'idée, il serait important d'établir un tableau de correspondance entre la somme des scores de symptômes autorapportés et les concentrations polliniques annuelles pour plusieurs types de pollen. Ce type d'information permettrait de répartir les concentrations de pollen dans l'air en plusieurs catégories selon des seuils définis. Ainsi les modèles pourraient directement prédire l'intensité des symptômes selon les catégories définies plutôt que les concentrations de pollen.

En attendant l'adaptation des MDE dits théoriques pour d'autres taxons de pollen, comme l'herbe à poux, la prédiction de l'abondance pollinique en zones urbaines à l'aide de l'apprentissage automatique à partir de données environnementales représente une solution de remplacement intéressante.

4.2.2.2 Du système de modélisation de la dispersion atmosphérique (SMDA) à la cartographie des niveaux de pollen dans l'air

Les cartes de concentration de pollen dans l'air sont produites par l'entremise de systèmes de modélisation qui sont une adaptation aux pollens des systèmes de prévision météorologique et de la qualité de l'air existants (modèles globaux ou régionaux météo-chimie). Contrairement aux modèles empiriques, les systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air (SAPMQA) prennent en compte les conditions météorologiques, les phases phénologiques de la saison pollinique et la cartographie détaillée de sources de pollens de la région d'intérêt (39,83,92).

Les SAPMQA peuvent simuler la qualité de l'air en concentration pollinique future (trois à cinq jours à l'avance) à plusieurs échelles géographiques, et ce, selon la disponibilité des données des prévisions météorologiques (124). La simulation des concentrations polliniques à moyen et long terme, selon les scénarios d'émission de gaz à effet de serre, peut également être effectuée. Dans les SAPMQA, les données polliniques servent à valider les prédictions et à affiner les paramètres du modèle d'émission pollinique (82). Par ailleurs, les données fournies par les stations de pollen pourraient être intégrées directement dans les SAPMQA comme données d'entrée, puisqu'il a été démontré que leur intégration améliorait la performance des SAPMQA (139).

Il semblerait que l'application Pollen API de Google est basée sur cette approche et soit en mesure de prédire cinq jours à l'avance les concentrations polliniques journalières de plusieurs types de pollen dans plus de 65 pays, avec une résolution spatiale de 1 km × 1 km. Le modèle serait alimenté par plusieurs sources de données, notamment les catégories d'occupation du sol, les données climatiques, la production annuelle de pollen par plante et les indicateurs dérivés des images satellitaires (140).

La cartographie des concentrations de pollen dans l'air peut être analysée conjointement avec celle des concentrations des polluants atmosphériques afin d'identifier des aires géographiques à risque pour la santé.

Cette analyse conjointe est motivée par l'existence d'un phénomène assez bien documenté dans la littérature concernant la synergie entre le pollen et les polluants atmosphériques (138). En effet, sous certaines conditions météorologiques spécifiques (ex. : pollution de l'air), le pollen peut être contaminé par fixation des gaz atmosphériques ou par déposition de carbone noir sur sa surface. Ces polluants atmosphériques peuvent favoriser la rupture de la surface externe du pollen (exine) permettant ainsi la libération dans l'air des allergènes de petite taille. Ces derniers peuvent provoquer des réactions allergiques telles que l'asthme chez certaines personnes. Par ailleurs, les allergènes déposés sur les particules fines (PM2.5/ PM10) peuvent devenir plus dommageables pour la santé que n'importe quel polluant atmosphérique absorbé isolément par inhalation (138,141). Les aires géographiques dans lesquelles surviennent les interactions pollen-polluants sont généralement caractérisées à la fois par des concentrations élevées de pollen et des polluants atmosphériques. Ainsi, l'analyse conjointe de ces informations produites sous forme de cartes constitue une démarche judicieuse visant à identifier ces aires (ou secteurs).

- Biais et limites des études sur la cartographie de l'abondance pollinique à l'aide de la modélisation numérique atmosphérique

Une des limites mentionnées dans les études est que les prévisions des concentrations futures ne sont pas ajustées aux mesures fournies par les capteurs, celles-ci étant disponibles de façon différée, soit généralement une semaine après l'exposition lorsque des capteurs manuels sont utilisés (101). Une autre limite est que les SAPMQA ne sont pas souvent utilisés pour produire des variations spatiales fines à l'échelle géographique des villes (99) en raison de la résolution spatiale encore grossière (2,5 km × 2,5 km et plus) des modèles météorologiques utilisés dans les SAPMQA. Des incertitudes au regard des résultats modélisés ont aussi été soulignées (111). *In fine*, le coût en temps de calcul est assez élevé. Le tableau 7 (p. 53) compare les méthodes de cartographie des niveaux d'abondance de pollens.

- Portrait d'application au Québec des méthodes de cartographie d'abondance de pollen dans l'air par le biais de la modélisation numérique atmosphérique

Dans le contexte biogéographique canadien et plus particulièrement au Québec, les travaux de modélisation numérique de la concentration du pollen de bouleau ont été concluants dans un rayon de 500 km de la station de pollen de l'Université de Montréal. Autrement dit, les phases phénologiques du bouleau (la durée, la date de début et de fin de la saison pollinique), intrants du module d'émission pollinique, ne semblent valables que pour un rayon de 500 km à partir de la station de mesure (109). Cette observation souligne l'importance de développer un modèle phénologique propre à chaque région biogéographique (141). En effet, en l'absence de données d'observation de la phénologie des plantes, les différentes phases phénologiques pourraient être déterminées par modélisation statistique, en utilisant les données de télédétection et polliniques en provenance de la station de mesure la plus proche de la région à l'étude. Les travaux de Khwarahm *et al*. (95) décrits dans cette revue pourraient servir de référence à cet effet.

Le modèle d'émission pollinique est une des composantes essentielles de la modélisation numérique atmosphérique visant à prédire les variations spatio-temporelles de concentration de pollen à des niveaux géographiques différents. Si le modèle d'émission du pollen de bouleau, adapté dans le contexte régional québécois, a déjà fait l'objet de publications scientifiques, ceux d'autres pollens allergènes ne sont pas encore disponibles. Dans cette optique, les travaux de développement ou d'adaptation des modèles d'émission pollinique dans le contexte biogéographique devraient se poursuivre pour les autres taxons de pollen considérés comme allergisants (herbe à poux, chêne, etc.).

La réalisation effective de ce type de cartographie pourrait impliquer plusieurs intervenants possédant l'expertise nécessaire en modélisation numérique atmosphérique, notamment les universités et le service météorologique du Québec et du Canada.

4.3 Cartographie des risques d'allergie, des symptômes et de la sensibilisation allergique au pollen : une approche complémentaire

Cette cartographie a été appliquée en Europe et en France pour illustrer la distribution géospatiale actuelle ou future de la prévalence de la sensibilisation allergique à l'ambroisie. Cette prévalence, extraite de la littérature dans les deux études (111,112), est généralement déterminée à partir de plusieurs bases de données, notamment les enquêtes téléphoniques sur les allergies aux pollens, les données de remboursement des médicaments d'allergie et les tests cutanés (113). Ce type de cartographie, avec une résolution spatiale assez basse, se rattache à la surveillance syndromique des pollens allergènes. Les cartes qui en résultent peuvent être combinées avec celles fournies par des approches décrites précédemment afin d'identifier les aires géographiques à risque pour les allergies aux pollens.

Un des avantages du RAEP est de combiner à la fois les notions de risque, d'exposition et de vulnérabilité (142). Il a été développé pour informer quelques jours, voire semaines à l'avance, les personnes allergiques et les professionnels et professionnelles de la santé des risques pour la santé que présente une exposition au pollen allergène.

4.3.1 Biais et limites des études sur la cartographie des risques d'allergie, des symptômes et de la sensibilisation allergique au pollen

Une des limites de la modélisation des symptômes de la rhinite allergique est la nature des données autorapportées. En effet, certaines personnes peuvent présenter des symptômes de la rhinite allergique sans qu'ils soient causés par le pollen allergène. Aussi, le système Pollen Hay Fever Diary (PHD) présente une limite concernant l'évaluation des modèles de prédictions de symptômes pour les nouveaux utilisateurs. Ce problème sera résolu dans le futur en collectant de l'information sur l'historique des symptômes des nouveaux utilisateurs (114).

Les prévalences de sensibilisation actuelles et futures de la population présentent une forte incertitude en raison du faible nombre d'études et des divergences méthodologiques entre les

études dans lesquelles ont été extraites les données ayant servi à construire la courbe dose-réponse. Les mêmes coefficients dérivés de cette courbe sont appliqués à l'échelle de l'Europe sans tenir compte de potentielles variations des facteurs comme les prédispositions génétiques entre les populations des différents pays (111).

Le RAEP est un indice prévisionnel combinant des données de nature différente, notamment les comptes polliniques au cours de la semaine écoulée, les prévisions météorologiques, ainsi que l'observation clinique des patients et patientes et celle de la phénologie des plantes. L'information non quantitative, comme celle issue de l'observation clinique et inscrite sur les bulletins cliniques, représente la perception générale des médecins sentinelles en ce qui concerne la fréquence, le type et la gravité des symptômes d'allergies auprès de leurs patients et patientes pendant la semaine écoulée. De ce fait, il semble très difficile d'évaluer de façon objective la fiabilité d'une telle information. En outre, la capacité de prédiction du RAEP n'a pas encore été évaluée à ce jour. Il semble que le RAEP n'est pas exempt d'incertitudes qui, somme toute, touchent son opérationnalisation ainsi que sa diffusion au public (142).

4.3.2 Portrait d'application au Québec des méthodes de cartographie des symptômes et de la sensibilisation allergique au pollen

À ce jour, aucune carte illustrant la variation géographique de la sensibilisation aux pollens allergènes en climat actuel ou futur n'est disponible au Québec. La courbe dose-réponse devrait être construite en mettant l'accent sur les données issues du Canada ou du Québec de préférence. De plus, la création et l'implémentation d'un système de collecte et d'évaluation des symptômes pour les personnes allergiques permettrait de créer un référentiel nécessaire à la mise en place d'un système de surveillance syndromique. Les données récoltées pourraient être couplées avec celles des concentrations polliniques pour prédire les symptômes d'allergie au pollen pour chaque patient et patiente. La prédiction personnalisée des symptômes d'allergie au pollen a d'ailleurs montré des résultats concluants en Lituanie et en Lettonie (114).

Les populations touchées par les allergies liées aux pollens sont inégalement desservies en information pollinique par les stations de pollen en opération au Québec. Les stations de pollen ne couvrent que trois régions administratives et la cartographie des niveaux de pollen dans l'air n'est pas encore disponible. En outre, il faut noter l'absence des réseaux : 1) de médecins sentinelles afin de brosser de façon régulière un tableau plus global de la symptomatologie liée à la présence de pollen dans l'air; 2) d'observation de la phénologie des plantes pour rapporter les dates de floraison des plantes produisant des pollens allergènes. Toutes ces problématiques ne semblent pas plaider en faveur de l'opérationnalisation du RAEP ou tout autre indice de ce genre au Québec. Ces problématiques devraient être évaluées avant d'envisager son opérationnalisation au Québec.

4.4 Biais et limites générales de la présente revue de littérature

Malgré une stratégie de recherche fondée sur des mots-clés pertinents et des bases de données reconnues, certaines études ont pu ne pas être identifiées, notamment en raison de variations terminologiques, de limites d'indexation des bases consultées ou des critères de sélection appliqués. De plus, aucune évaluation de la qualité des études n'a été effectuée en raison du volume important d'études. Le tri des articles et des documents n'a pas été validé par une deuxième personne pour s'assurer qu'aucun biais n'ait été introduit. En outre, il est important de souligner que l'information synthétisée dans cette revue a été tirée d'études publiées dans des revues avec comité de pairs. Ces études, de type environnemental, visaient principalement à décrire les approches méthodologiques et non à établir des liens de causalité entre l'exposition aux pollens allergènes et les réactions allergiques. Enfin, bien qu'elles aient été menées par des équipes de recherche différentes, les résultats obtenus étaient souvent complémentaires et parfois convergents.

5 CONCLUSION

La réalisation de cette revue a permis de documenter les méthodes de détection et les approches méthodologiques de cartographie des pollens allergènes ainsi que de leurs risques et effets sur la santé. La procédure de calcul concernant l'abondance de pollen dans l'air est encore largement effectuée à l'aide des capteurs volumétriques de type Hirst et rotatifs à impaction, ainsi qu'à partir d'analyses manuelles d'échantillons de grains de pollen. En revanche, les systèmes de détection automatisée où les analyses d'échantillons de grain de pollen reposent sur les méthodes automatiques, bien que relativement coûteux en matière d'acquisition, pourraient bénéficier d'une atténuation des coûts d'exploitation à moyen terme. Cette diminution des coûts serait associée à la baisse en besoins de personnel qualifié pour procéder aux manipulations essentielles à des analyses polliniques de qualité. Les systèmes de détection automatisée sont d'ailleurs déjà opérationnels dans certains réseaux de suivi de pollen en Europe et en Asie.

Cette synthèse des connaissances a fait ressortir une panoplie d'approches qui pourraient être appliquées tant pour élaborer la cartographie des sources de pollens allergènes sur le territoire de la province que pour évaluer l'abondance de pollens. Certaines approches prennent en compte les effets du changement climatique et sont capables de prévoir l'impact à court, à moyen et à long terme des pollens allergènes sur la santé des populations.

Bien qu'aucune approche méthodologique idéale n'émerge de cette revue au regard de la cartographie de pollen, l'application de certaines d'entre elles pourrait s'avérer pertinente dans le contexte québécois, en raison notamment de la disponibilité des données et des objectifs dans le cadre de l'action A1-010 « Cartographie et diffusion du risque comme les îlots de chaleur, les pollens allergènes et les zoonoses » du Plan pour une économie verte 2030 (PEV 2030).

En ce qui a trait à la cartographie de sources de pollens allergènes, l'approche ascendante est l'unique approche appliquée au Québec pour cartographier la localisation des arbres et des herbacées. L'approche descendante, dépendant de la présence de capteurs, pourrait être envisagée s'il est démontré que le pollen a une origine locale dans la région d'intérêt.

Les modèles de répartition des espèces (MDE), basés sur les modèles statistiques et l'apprentissage automatique, semblent adaptés au contexte québécois en raison de la disponibilité des données. De plus, celles-ci pourraient permettre l'intégration des scénarios climatiques afin de générer des prévisions adaptées. Enfin, les MDE, basés sur les processus d'interaction entre la plante et son environnement, devraient d'abord être développés ou ajustés au contexte biogéographique québécois avant d'être utilisés pour modéliser les plants d'herbe à poux qui se sont adaptés dans un environnement peu propice à leur prolifération. Des travaux de recherche devraient être menés à cet effet afin d'évaluer la potentielle performance des MDE, basés sur les processus d'interaction entre la plante et son environnement.

En ce qui concerne la cartographie de l'abondance de pollen, les modèles empiriques mettant à profit des méthodes statistiques et l'intelligence artificielle peuvent s'avérer une option intéressante. Par ailleurs, la modélisation numérique atmosphérique semble présenter un intérêt marqué pour les réseaux de surveillance aérobiologique à travers le monde. Au Québec, il serait important pour une application effective que d'autres modèles d'émission polliniques, ingrédients essentiels de la modélisation numérique atmosphérique, soient développés ou adaptés pour les taxons de pollen autres que celui du bouleau. Aussi, des travaux de recherche devraient également être menés dans cette perspective afin, par exemple, d'évaluer la pertinence de la combinaison de ces deux modèles.

La cartographie des symptômes et de la sensibilisation allergique au pollen apparaît comme une approche complémentaire à la surveillance aérobiologique à considérer. L'applicabilité d'une telle approche pourrait être explorée au Québec afin d'offrir au public et aux professionnels et professionnelles de la santé un outil complémentaire de prévention des allergies causées par les pollens allergènes. Cependant, considérant la situation actuelle de suivi du pollen allergène au Québec, l'opérationnalisation et la cartographie d'un indice de risque d'allergie inspiré du RAEP est limitée par le manque de données requises.

Les données fournies par la modélisation des concentrations polliniques peuvent être couplées avec celles de prévalence de la rhinite allergique, de la qualité de l'air ainsi que des données autorapportées concernant des symptômes allergiques causés par les pollens afin d'estimer respectivement le taux de sensibilisation allergique de la population générale au pollen, d'identifier des aires géographiques à risques pour la santé liés à l'asthme et d'effectuer la prédiction personnalisée des symptômes d'allergie au pollen.

RÉFÉRENCES

1. Rivas-Martinez S, Rivas- S, Penas A. Worldwide bioclimatic classification system. Global Geobotany. 2011;1-634.

2. Mathivet V. L'Intelligence Artificielle pour les développeurs Concepts et implémentations en C# (2e édition). 2e éd. ENI; 2012. 485 p.

3. Office québécois de la langue française [En ligne]. Québec, Canada : OQLF; s. d. Logique floue. Disponible : https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8372783/logique-floue

4. Dash J, Curran PJ. Evaluation of the MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI). Advances in Space Research. 2007;39(1):100-4.

5. Grewling Ł, Ribeiro H, Antunes C, Apangu GP, Çelenk S, Costa A, et al. Outdoor airborne allergens: characterization, behavior and monitoring in Europe. Science of The Total Environment. 2023; 905:167042.

6. Bardoutsos A, Matzarapis G, Nikoletseas S, Spirakis PG, Tzamalis P. A Complementary Sensing Platform for a holistic approach to Allergic Rhinitis monitoring. Dans : 2021 17th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). 2021. p. 171-80.

7. Beggs PJ, Katelaris CH, Medek D, Johnston FH, Burton PK, Campbell B, *et al.* Differences in grass pollen allergen exposure across Australia. Australian and New Zealand journal of public health. 2015;39(1):51-5.

8. Institut national de santé publique du Québec [En ligne]. Québec, Canada : INSPQ; s. d. Pollens allergènes. Disponible : https://www.inspq.qc.ca/changements-climatiques/menaces/pollens-allergenes

9. Motruk II, Antomonov MY, Rodinkova VV, Aleksandrova OE, Yermishev OV. Allergenic weed pollen forecast under the mathematical modeling method implementation in Ukraine. Wiadomosci lekarskie (Warsaw, Poland: 1960). 2018;71(3):592-8.

10. Cowie S, Arthur R, Williams HTP. @choo: tracking pollen and hayfever in the UK using social media. Sensors. 2018;18(12):4434.

11. Suanno C, Aloisi I, Fernández-González D, Del Duca S. Monitoring techniques for pollen allergy risk assessment. Environmental Research. 2021;197:111109.

12. Celenk S. Detection of reactive allergens in long-distance transported pollen grains : evidence from Ambrosia. Atmospheric Environment. 2019;209:212-9.

13. Grewling L, Bogawski P, Jenerowicz D, Czarnecka-Operacz M, Sikoparija B, Skjoth CA, *et al.* Mesoscale atmospheric transport of ragweed pollen allergens from infected to uninfected areas. International journal of biometeorology. 2016;60(10):1493-500.

14. Tegart LJ, Johnston FH, Borchers Arriagada N, Workman A, Dickinson JL, Green BJ, *et al.* « Pollen potency » : the relationship between atmospheric pollen counts and allergen exposure. Aerobiologia. 2021;37(4):825-41.

15. Galan C, Plaza M, Alcazar P, Velasco-Jimenez M. Aeroallergens : a comparative study of two monitoring methods. Allergy : European Journal of Allergy and Clinical Immunology. 2017;72(Supplement 103):173.

16. Canuel M, Lebel G. Épidémiologie de la rhinite allergique au Québec d'après une enquête populationnelle de 2008. 2014;34(2).

17. Institut national de santé publique du Québec [En ligne]. Québec, Canada : INSPQ; s. d. Prévalence et coûts de santé de l'allergie au pollen de l'herbe à poux. Disponible : https://www.inspq.qc.ca/bise/prevalence-et-couts-de-sante-de-l-allergie-au-pollen-de-l-herbe-poux

18. Ouranos, Fonds Vert, Gouvernement du Québec. Évaluation des impacts des changements climatiques et de leurs coûts pour le Québec et l'État québécois [En ligne]. Québec, Canada : Gouvernement du Québec; 2015. Disponible : https://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/evatuation-impacts-cc-couts-qc-etat.pdf

19. Gouvernement du Québec [En ligne]. Québec, Canada : Gouvernement du Québec, s. d. Rhinite saisonnière (rhume des foins). Disponible : https://www.quebec.ca/sante/problemes-de-sante/a-z/rhinite-saisonniere-rhume-des-foins

20. Sierra-Heredia C, North M, Brook J, Daly C, Ellis A, Henderson D, et al. Aeroallergens in Canada : distribution, Public Health Impacts, and Opportunities for Prevention. IJERPH. 2018;15(8):1577.

21. D'Amato G, Pawankar R, Vitale C, Lanza M, Molino A, Stanziola A, *et al*. Climate Change and Air Pollution: effects on Respiratory Allergy. Allergy, Asthma & Immunology Research. 2016;8(5):391-5.

22. Demers-Bouffard D. Les aléas affectés par les changements climatiques : effets sur la santé, vulnérabilités et mesures d'adaptation [En ligne]. Québec, Canada : INSPQ; 2021. Disponible : https://www.inspq.qc.ca/publications/2771

23. Sukiene L, Sauliene I, Dubakiene R, Rudzeviciene O, Daunys G. Analysis of allergenic pollen data, focusing on a pollen load threshold statement. Aerobiologia. 2021;37(4):843-60.

24. Gonzalez-Alonso M, Arino AH. Digitally accessible knowledge about airborne pollen data in Spain. Aerobiologia. 2022;39(1):175-9.

25. Lo F, Bitz CM, Hess JJ. Development of a Random Forest model for forecasting allergenic pollen in North America. Science of The Total Environment. 2021;773:145590.

26. Pecero-Casimiro R, Maya-Manzano JM, Fernández-Rodríguez S, Tormo-Molina R, Silva-Palacios I, Monroy-Colín A, *et al*. Pollen calendars and regional gradients as information tools in the Extremadura pollen monitoring network (SW Spain). Aerobiologia. 2020;36(4):731-48.

27. Rodriguez D, Davila I, Sanchez E, Lorente F, Sanchez J. Comparison of Pollen Levels Between 2 Pollen Traps in Salamanca, Spain. Journal of investigational allergology & clinical immunology. 2016;26(2):116-7.

28. Oteros J, Pusch G, Weichenmeier I, Heimann U, Moller R, Roseler S, *et al.* Automatic and Online Pollen Monitoring. International archives of allergy and immunology. 2015;167(3):158-66.

29. Plaza MP, Kolek F, Leier-Wirtz V, Brunner JO, Traidl-Hoffmann C, Damialis A. Detecting Airborne Pollen Using an Automatic, Real-Time Monitoring System: Evidence from Two Sites. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022;19(4):2471.

30. Buters J, Clot B, Galán C, Gehrig R, Gilge S, Hentges F, *et al.* Automatic detection of airborne pollen : an overview. Aerobiologia. 2022;40:13-27. https://doi.org/10.1007/s10453-022-09750-x

31. Maya-Manzano JM, Tummon F, Abt R, Allan N, Bunderson L, Clot B, *et al.* Towards European automatic bioaerosol monitoring : Comparison of 9 automatic pollen observational instruments with classic Hirst-type traps. Science of The Total Environment. 2023;866:161220.

32. Sauvageat E, Zeder Y, Auderset K, Calpini B, Clot B, Crouzy B, *et al.* Real-time pollen monitoring using digital holography. Atmospheric Measurement Techniques. 2020;13(3):1539-50.

33. Oteros J, Weber A, Kutzora S, Rojo J, Heinze S, Herr C, *et al.* An operational robotic pollen monitoring network based on automatic image recognition. Environmental Research. 2020;191:110031.

34. Buters JTM, Antunes C, Galveias A, Bergmann KC, Thibaudon M, Galán C, *et al.* Pollen and spore monitoring in the world. Clinical and Translational Allergy. 2018;8(1):9.

35. Aerobiology Research Laboratories [En ligne]. Ontario, Canada : Aerobiology Research Laboratories; s. d. Services aux médias et réseaux sociaux. Disponible : https://www.aerobiology.ca/fr/services/services-aux-medias-et-reseaux-sociaux/

36. McInnes RN, Hemming D, Burgess P, Lyndsay D, Osborne NJ, Skjøth CA, et al. Mapping allergenic pollen vegetation in UK to study environmental exposure and human health. Science of The Total Environment. 2017;599-600:483-99.

37. Qin Z, Zhang JE, DiTommaso A, Diez JM, Zhao Y, Wang FG. Predicting the Potential Distribution of Three Allergenic Invasive Ambrosia (Ragweed) Species in Asia. Journal of Environmental Informatics. 2022;39(1):49-66.

38. Leiblein-Wild MC, Steinkamp J, Hickler T, Tackenberg O. Modelling the potential distribution, net primary production and phenology of common ragweed with a physiological model. Journal of Biogeography. 2016;43(3):544-54.

39. Liu L, Solmon F, Vautard R, Hamaoui-Laguel L, Torma CZ, Giorgi F. Ragweed pollen production and dispersion modelling within a regional climate system, calibration and application over Europe. Biogeosciences. 2016;13(9):2769-86.

40. Rasmussen K, Thyrring J, Muscarella R, Borchsenius F. Climate-change-induced range shifts of three allergenic ragweeds (Ambrosia L.) in Europe and their potential impact on human health. PeerJ. 2017;5(3104):e3104.

41. Demers I. État des connaissances sur le pollen et les allergies : les assises pour une gestion efficace [En ligne]. Québec, Canada : INSPQ; 2013. Disponible : https://www.inspq.qc.ca/publications/1678

42. Gouvernement du Québec. Plan pour une économie verte 2030 – Plan de mise en œuvre 2025-2030 [En ligne]. Québec; Canada : Gouvernement du Québec; 2025. Disponible : https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-mise-oeuvre-2025-2030.pdf

43. Hirst JM. An Automatic Volumetric Spore Trap. Annals of Applied Biology. 1952;39(2):257-65.

44. Crisp HC, Gomez RA, White KM, Quinn JM. A side-by-side comparison of Rotorod and Burkard pollen and spore collections. Annals of Allergy, Asthma & Immunology. 2013;111(2):118-25.

45. Geller-Bernstein C, Portnoy JM. The Clinical Utility of Pollen Counts. Clinical Reviews in Allergy and Immunology. 2019;57(3):340-9.

46. Frenz DA. Comparing pollen and spore counts collected with the Rotorod Sampler and Burkard spore trap. Annals of Allergy, Asthma & Immunology. 1999;83(5):341-9.

47. Lindsley W, Green BJ, Blachere FM, Martin SB, Law BF, Jensen PA, *et al.* Sampling and characterization of bioaerosols. CDC NIOSH; 2017. Disponible : https://www.cdc.gov/niosh/nmam/pdf/chapter-ba.pdf

48. GRIPST-2009-Rotation impactor sampler [En ligne]. Ontario, Canada : Aerobiology Research Laboratories; s. d. Disponible : https://www.aerobiology.ca/wp-content/uploads/2017/04/GRIPST-2009-Manual.pdf

49. Rittenour WR, Hamilton RG, Beezhold DH, Green BJ. Immunologic, spectrophotometric and nucleic acid based methods for the detection and quantification of airborne pollen. J Immunol Methods. 2012;383(0):47-53.

50. Muller-Germann I, Vogel B, Vogel H, Pauling A, Frohlich-Nowoisky J, Poschl U, *et al.* Quantitative DNA analyses for airborne birch pollen. PLoS ONE. 2015;10(10): e0140949.

51. Le Borgne H, Bouget C. La reconnaissance des espèces basée sur l'ADN : applications, perspectives et défis en milieu continental terrestre. Naturae. 2024;(3). Disponible: https://sciencepress.mnhn.fr/fr/periodiques/naturae/2024/3

52. Frisk CA, Adams-Groom B, Smith M. Isolating the species element in grass pollen allergy : a review. Science of the Total Environment. 2023;883:163661.

53. Polling M, Sin M, de Weger LA, Speksnijder AGCL, Koenders MJF, de Boer H, *et al.* DNA metabarcoding using nrITS2 provides highly qualitative and quantitative results for airborne pollen monitoring. The Science of the total environment. 2022;806(Pt 1):150468.

54. Plaza MP, Alcazar P, Galan C. Correlation between airborne Olea europaea pollen concentrations and levels of the major allergen Ole e 1 in Cordoba, Spain, 2012-2014. International journal of biometeorology. 2016;60(12):1841-7.

55. Celenk S. Detection of reactive allergens in long-distance transported pollen grains : evidence from Ambrosia. Atmospheric Environment. 2019;209:212-9.

56. Maya-Manzano JM, Oteros J, Rojo J, Traidl-Hoffmann C, Schmidt-Weber C, Buters J. Drivers of the release of the allergens Bet v 1 and Phl p 5 from birch and grass pollen. Environmental research. 2022;214(Pt 3):113987.

57. Moreno-Grau S, Aira MJ, Elvira-Rendueles B, Fernandez-Gonzalez M, Fernandez-Gonzalez D, Garcia-Sanchez A, *et al*. Assessment of the Olea pollen and its major allergen Ole e 1 concentrations in the bioearosol of two biogeographical areas. Atmospheric Environment. 2016;145:264-71.

58. Fernandez-Gonzalez M, Ribeiro H, Pereira JRS, Rodriguez-Rajo FJ, Abreu I. Assessment of the potential real pollen related allergenic load on the atmosphere of Porto city. The Science of the total environment. 2019; 668:333-41.

59. Fernandez-Gonzalez M, Alvarez-Lopez S, Gonzalez-Fernandez E, Jesus Aira M, Rodriguez-Rajo FJ. Cross-reactivity between the Betulaceae family and fallout in the real atmospheric aeroallergen load. The Science of the total environment. 2020; 715:136861.

60. Plaza MP, Alcazar P, Oteros J, Galan C. Atmospheric pollutants and their association with olive and grass aeroallergen concentrations in Cordoba (Spain). Environmental science and pollution research international. 2020;27(36):45447-59.

61. Levetin E, McLoud JD, Pityn P, Rorie AC. Air Sampling and Analysis of Aeroallergens: Current and Future Approaches. Curr Allergy Asthma Rep. 2023;23(5):223-36.

62. Huffman JA, Perring AE, Savage NJ, Clot B, Crouzy B, Tummon F, *et al*. Real-time sensing of bioaerosols: Review and current perspectives. Aerosol Science and Technology. 2020;54(5):465-95.

63. Jiang C, Wang W, Du L, Huang G, McConaghy C, Fineman S, *et al.* Field Evaluation of an Automated Pollen Sensor. Int J Environ Res Public Health. 2022;19(11):6444.

64. Erb S, Graf E, Zeder Y, Lionetti S, Berne A, Clot B, *et al*. Real-time pollen identification using holographic imaging and fluorescence measurements. Atmospheric Measurement Techniques. 2024;17(2):441-51.

65. Markey E, Hourihane Clancy J, Martínez-Bracero M, Neeson F, Sarda-Estève R, Baisnée D, *et al*. A Modified Spectroscopic Approach for the Real-Time Detection of Pollen and Fungal Spores at a Semi-Urban Site Using the WIBS-4+, Part I. Sensors (Basel). 2022;22(22):8747.

66. Crouzy B, Stella M, Konzelmann T, Calpini B, Clot B. All-optical automatic pollen identification : Towards an operational system. Atmospheric Environment. 2016; 140:202-12.

67. Tešendić D, Boberić Krstićev D, Matavulj P, Brdar S, Panić M, Minić V, *et al.* RealForAll : real-time system for automatic detection of airborne pollen. Enterprise Information Systems. 2022;16(5):1793391.

68. Chappuis C, Tummon F, Clot B, Konzelmann T, Calpini B, Crouzy B. Automatic pollen monitoring : first insights from hourly data. Aerobiologia. 2020;36(2):159-70.

69. M. Boldeanu, H. Cucu, C. Burileanu, L. Mărmureanu. Automatic Pollen Classification Using Convolutional Neural Networks. Dans : 2021 44th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). 2021. p. 130-3.

70. Tummon F, Adams-Groom B, Antunes CM, Bruffaerts N, Buters J, Cariñanos P, *et al.* The role of automatic pollen and fungal spore monitoring across major end-user domains. Aerobiologia. 2024;40(1):57-75.

71. Calatayud V, Cariñanos P. Mapping pollen allergenicity from urban trees in Valencia: a tool for green infrastructure planning. Environmental Research. 2024; 252:118823.

72. Sousa-Silva R, Smargiassi A, Kneeshaw D, Dupras J, Zinszer K, Paquette A. Strong variations in urban allergenicity riskscapes due to poor knowledge of tree pollen allergenic potential. Sci Rep. 2021;11(1):10196.

73. Gentili R, Gilardelli F, Bona E, Prosser F, Selvaggi A, Alessandrini A, *et al.* Distribution map of Ambrosia artemisiifolia L. (Asteraceae) in Italy. Plant Biosystems. 2017;151(3):381-6.

74. Bernard-Verdier M, Seitz B, Buchholz S, Kowarik I, Lasunción Mejía S, Jeschke JM. Grassland allergenicity increases with urbanisation and plant invasions. Ambio. 2022;51(11):2261-77.

75. Kervran G, Riffon J, Masson É, Drapeau JB, Plante C, Tremblay M. Exploration d'une méthodologie d'identification de terrains avec un potentiel de colonisation par l'herbe à poux : une approche cartographique. Québec, Canada : Direction régionale de santé publique de l'Agence de la santé et des services sociaux de la Capitale-Nationale; 2014.

76. Pecero-Casimiro R, Fernandez-Rodriguez S, Tormo-Molina R, Monroy-Colin A, Silva-Palacios I, Cortes-Perez JP, *et al*. Urban aerobiological risk mapping of ornamental trees using a new index based on LiDAR and Kriging: a case study of plane trees. Science of the Total Environment. 2019; 693:133576.

77. GDG Environnement Ltée. Rapport final : densité et cartographie de l'herbe à poux [En ligne]. Québec, Canada : GDG Environnement Ltée; 2017. Disponible : https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/acces-information-renseignements-personnels/documents-reglement-diffusion/demande-acces/Documents/2020/12/DA-2020-2021-00333-Annexe_DGGPREE.pdf

78. Cariñanos P, Casares-Porcel M, Díaz De La Guardia C, Aira MJ, Belmonte J, Boi M, *et al*. Assessing allergenicity in urban parks: a nature-based solution to reduce the impact on public health. Environmental Research. 2017; 155:219-27.

79. Cariñanos P, Casares-Porcel M, Quesada-Rubio JM. Estimating the allergenic potential of urban green spaces: a case-study in Granada, Spain. Landscape and Urban Planning. 2014; 123:134-44.

80. Pham-Thi N, Thibaudon M, Monnier S, Besancenot JP. L'air que nous respirons : influence des sources de pollen dans les espaces verts. Exemple de Lyon. Revue Française d'Allergologie. 2019;59(8):524-32.

81. Skjøth AC. Mapping ragweed presence in Europe using top-down and bottom-up approaches. 2018.

82. Zink K, Kaufmann P, Petitpierre B, Broennimann O, Guisan A, Gentilini E, *et al*. Numerical ragweed pollen forecasts using different source maps: a comparison for France. International journal of biometeorology. 2017;61(1):23-33.

83. Mimic G, Podrascanin Z, Lugonja P, Sikoparija B. The influence of source maps on SILAM performance in modeling ragweed pollen concentrations in the area of a major European source. International journal of biometeorology. 2021;65(6):917-28.

84. Skjøth CA, Smith M, Šikoparija B, Stach A, Myszkowska D, Kasprzyk I, *et al*. A method for producing airborne pollen source inventories: an example of Ambrosia (ragweed) on the Pannonian Plain. Agricultural and Forest Meteorology. 2010;150(9):1203-10.

85. Bonini M, Šikoparija B, Skjøth CA, Cislaghi G, Colombo P, Testoni C, *et al.* Ambrosia pollen source inventory for Italy: a multi-purpose tool to assess the impact of the ragweed leaf beetle (Ophraella communa LeSage) on populations of its host plant. Int J Biometeorol. 2018;62(4):597-608.

86. Thibaudon M, Šikoparija B, Oliver G, Smith M, Skjøth CA. Ragweed pollen source inventory for France – The second largest centre of Ambrosia in Europe. Atmospheric Environment. 2014; 83:62-71.

87. Skjøth CA, Sun Y, Karrer G, Sikoparija B, Smith M, Schaffner U, *et al*. Predicting abundances of invasive ragweed across Europe using a "top-down" approach. Science of The Total Environment. 2019; 686:212-22.

88. Karrer G, Skjoth CA, Sikoparija B, Smith M, Berger U, Essl F. Ragweed (Ambrosia) pollen source inventory for Austria. The Science of the total environment. 2015;523:120-8.

89. Cai T, Zhang Y, Ren X, Bielory L, Mi Z, Nolte CG, et al. Development of a semi-mechanistic allergenic pollen emission model. Science of the Total Environment. 2019;653:947-57.

90. Chapman DS, Scalone R, Stefanic E, Bullock JM. Mechanistic species distribution modeling reveals a niche shift during invasion. Ecology. 2017;98(6):1671-80.

91. Storkey J, Stratonovitch P, Chapman DS, Vidotto F, Semenov MA. A Process-Based Approach to Predicting the Effect of Climate Change on the Distribution of an Invasive Allergenic Plant in Europe. Hérault B, éditeur. PLoS ONE. 2014;9(2):e88156.

92. Hamaoui-Laguel L, Vautard R, Liu L, Solmon F, Viovy N, Khvorostyanov D, *et al*. Effects of climate change and seed dispersal on airborne ragweed pollen loads in Europe. Nature Climate Change. 2015;5(8):766-71.

93. Katz DSW, Batterman SA. Allergenic pollen production across a large city for common ragweed (Ambrosia artemisiifolia). Landscape and urban planning. 2019;190. http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=pmnm4&NEWS=N&AN=32831442

94. Case MJ, Stinson KA. Climate change impacts on the distribution of the allergenic plant, common ragweed (Ambrosia artemisiifolia) in the eastern United States. PLoS ONE. 2018;13(10):e0205677.

95. Khwarahm NR, Dash J, Skjoth CA, Newnham RM, Adams-Groom B, Head K, *et al*. Mapping the birch and grass pollen seasons in the UK using satellite sensor time-series. Science of the Total Environment. 2017;578:586-600.

96. Liu Y, Huete A, Xie Q, Davies JM, Beggs PJ, Abdollahi A, *et al*. Informing spatial distributions and temporal variations of grass pollen sources in urban landscapes using 10 m Sentinel-2 data [En ligne]. 2024. Disponible : https://www.researchsquare.com/article/rs-3894828/v1

97. Ngom R, Gosselin P. Development of a Remote Sensing-Based Method to Map Likelihood of Common Ragweed (Ambrosia artemisiifolia) Presence in Urban Areas. IEEE J Sel Top Appl Earth Observations Remote Sensing. 2014;7(1):126-39.

98. Katz DSW, Batterman S. Creating a comprehensive municipal inventory of common ragweed (Ambrosia artemisiifolia) to predict allergenic pollen exposures. Journal of Clinical and Translational Science. 2018;7.

99. Hjort J, Hugg TT, Antikainen H, Rusanen J, Sofiev M, Kukkonen J, *et al*. Fine-Scale Exposure to Allergenic Pollen in the Urban Environment: Evaluation of Land Use Regression Approach. Environmental health perspectives. 2016;124(5):619-26.

100. Csepe Z, Leelossy A, Manyoki G, Kajtor-Apatini D, Udvardy O, Peter B, *et al*. The application of a neural network-based ragweed pollen forecast by the Ragweed Pollen Alarm System in the Pannonian biogeographical region. Aerobiologia. 2020;36(2):131-40.

101. Valipour Shokouhi B, de Hoogh K, Gehrig R, Eeftens M. Estimation of historical daily airborne pollen concentrations across Switzerland using a spatio temporal random forest model. The Science of the total environment. 2024;906:167286.

102. Oteros J, Bergmann KC, Menzel A, Damialis A, Traidl-Hoffmann C, Schmidt-Weber CB, *et al.* Spatial interpolation of current airborne pollen concentrations where no monitoring exists. Atmospheric Environment. 2019;199:435-42.

103. Picornell A, Oteros J, Trigo MM, Gharbi D, Docampo Fernandez S, Melgar Caballero M, *et al.* Increasing resolution of airborne pollen forecasting at a discrete sampled area in the southwest Mediterranean Basin. Chemosphere. 2019;234:668-81.

104. Zewdie GK, Lary DJ, Liu X, Wu D, Levetin E. Estimating the daily pollen concentration in the atmosphere using machine learning and NEXRAD weather radar data. Environmental monitoring and assessment. 2019;191(7):418.

105. Nowosad J. Spatiotemporal models for predicting high pollen concentration level of Corylus, Alnus, and Betula. International journal of biometeorology. 2016;60(6):843-55.

106. Ren X, Cai T, Mi Z, Bielory L, Nolte CG, Georgopoulos PG. Modeling past and future spatiotemporal distributions of airborne allergenic pollen across the contiguous United States. Frontiers in allergy. 2022;3:959594.

107. Suanno C, Aloisi I, Fernández-González D, Del Duca S. Pollen forecasting and its relevance in pollen allergen avoidance. Environmental Research. 2021;200:111150.

108. Werner M, Guzikowski J, Kryza M, Malkiewicz M, Bilinska D, Skjoth CA, *et al.* Extension of WRF-Chem for birch pollen modelling – A case study for Poland. International Journal of Biometeorology. 2020;65(4):513-26.

109. Robichaud A, Comtois P. Numerical modelling of birch pollen dispersion in Canada. Environmental Research. 2021;194:110554.

110. Helbig N, Vogel B, Vogel H, Fiedler F. Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale. Aerobiologia. 2004;20(1):3-19

111. Lake IR, Jones NR, Agnew M, Goodess CM, Giorgi F, Hamaoui-Laguel L, *et al.* Climate change and future pollen allergy in Europe. Environmental Health Perspectives. 2017;125(3):385-91.

112. Schaffner U, Steinbach S, Sun Y, Skjøth CA, de Weger LA, Lommen ST, *et al.* Biological weed control to relieve millions from Ambrosia allergies in Europe. Nat Commun. 2020;11(1):1745.

113. Anses. Impacts sanitaires et coûts associés à l'ambroisie à feuilles d'armoise en France [IEn ligne]. France : Anses; 2020. Disponible : https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2018SA0088Ra.pdf

114. Voukantsis D, Berger U, Tzima F, Karatzas K, Jaeger S, Bergmann KC. Personalized symptoms forecasting for pollen-induced allergic rhinitis sufferers. Int J Biometeorol. 2015;59(7):889-97.

115. Adamov S, Lemonis N, Clot B, Crouzy B, Gehrig R, Graber MJ, *et al.* On the measurement uncertainty of Hirst-type volumetric pollen and spore samplers. Aerobiologia. 2021;(40):77-91. https://doi.org/10.1007/s10453-021-09724-5

116. Lieberherr G, Auderset K, Calpini B, Clot B, Crouzy B, Gysel-Beer M, *et al.* Assessment of real-time bioaerosol particle counters using reference chamber experiments. Atmospheric Measurement Techniques. 2021;14(12):7693-706.

117. Pj B, Jm D. Australian Airborne Pollen and Spore Monitoring Network Interim Standard and Protocols.

118. Galán C, Smith M, Thibaudon M, Frenguelli G, Oteros J, Gehrig R, *et al.* Pollen monitoring : minimum requirements and reproducibility of analysis. Aerobiologia. 2014;30(4):385-95.

119. Yang JJ, Klinkenberg C, Pan JZ, Wyss HM, den Toonder JMJ, Fang Q. An integrated system for automated measurement of airborne pollen based on electrostatic enrichment and image analysis with machine vision. Talanta. 2022;237:122908.

120. Buters J, Clot B, Galán C, Gehrig R, Gilge S, Hentges F, *et al*. Automatic detection of airborne pollen: an overview. Aerobiologia. 2022;(40):13-37. https://doi.org/10.1007/s10453-022-09750-x

121. Rieux C, Personnaz MB, Thibaudon M. Spatial variation of airborne pollen over south-east France : characterization and implications for monitoring networks management. Aerobiologia. 2008;24:43-52.

122. Renard JB, El Azari H, Lauthier J, Surcin J. Spatial Variation of Airborne Pollen Concentrations Locally around Brussels City, Belgium, during a Field Campaign in 2022–2023, Using the Automatic Sensor Beenose. Sensors. 2024;24(12):3731.

123. Charalampopoulos A, Damialis A, Lazarina M, Halley JM, Vokou D. Spatiotemporal assessment of airborne pollen in the urban environment : the pollenscape of Thessaloniki as a case study. Atmospheric Environment. 2021;247:118185.

124. Verstraeten WW, Kouznetsov R, Hoebeke L, Bruffaerts N, Sofiev M, Delcloo AW. Modelling grass pollen levels in Belgium. Science of the Total Environment. 2021;753:141903.

125. Pecero-Casimiro R, Fernandez-Rodriguez S, Tormo-Molina R, Silva-Palacios I, Gonzalo-Garijo A, Monroy-Colin A, *et al*. Producing urban aerobiological risk map for Cupressaceae family in the SW Iberian Peninsula from LiDAR technology. Remote Sensing. 2020;12(10). https://www.mdpi.com/2072-4292/12/10/1562/htm

126. Xu J, Cai Z, Wang T, Liu G, Tang P, Ye X. Exploring spatial distribution of pollen allergenic risk zones in urban China. Sustainability. 2016;8(10):978.

127. Augustinus B, Sun Y, Beuchat C, Schaffner U, Müller-Schärer H. Predicting impact of a biocontrol agent : integrating distribution modeling with climate-dependent vital rates. Ecological Applications. 2020;30(1).

128. Garcia de Leon D, Garcia-Mozo H, Galan C, Alcazar P, Lima M, Gonzalez-Andujar JL. Disentangling the effects of feedback structure and climate on Poaceae annual airborne pollen fluctuations and the possible consequences of climate change. The Science of the total environment. 2015;530-531:103-9.

129. AtmoSud, ORS. Modélisation de la répartition des pollens d'ambroisie et estimation de son impact sanitaire en Provence-Alpes-Côte d'Azur [En ligne]. France : AtmoSud, ORS; 2021. Disponible : http://www.orspaca.org/productions/publication/mod%C3%A9lisation-de-la-r%C3%A9partition-des-pollens-d%E2%80%99ambroisie-et-estimation-de-son

130. Aguilera F, Dihab A, Msallem M, Orlandi F, Tommaso B, Valenzuela L, *et al.* Airborne-pollen maps for olive-growing areas throughout the Mediterranean region: spatio-temporal interpretation. Aerobiologia. 2015;31.

131. Maya-Manzano JM, Skjøth CA, Smith M, Dowding P, Sarda-Estève R, Baisnée D, *et al.* Spatial and temporal variations in the distribution of birch trees and airborne Betula pollen in Ireland. Agricultural & Forest Meteorology. 2021;298.

132. Stępalska D, Myszkowska D, Piotrowicz K, Kluska K, Chłopek K, Grewling Ł, *et al*. High Ambrosia pollen concentrations in Poland respecting the long distance transport (LDT). Science of The Total Environment. 2020;736:139615.

133. Makra L, Matyasovszky I, Tusnády G, Ziska LH, Hess JJ, Nyúl LG, *et al*. A temporally and spatially explicit, data-driven estimation of airborne ragweed pollen concentrations across Europe. Science of The Total Environment. 2023;905:167095.

134. Katz DSW, Batterman SA. Urban-scale variation in pollen concentrations: a single station is insufficient to characterize daily exposure. Aerobiologia. 2020;36(3):417-31.

135. Zapata-Marin S, Schmidt AM, Weichenthal S, Katz DSW, Takaro T, Brook J, *et al*. Within city spatiotemporal variation of pollen concentration in the city of Toronto, Canada. Environmental research. 2022;206:112566.

136. Fernández-Rodríguez S, Skjøth CA, Tormo-Molina R, Brandao R, Caeiro E, Silva-Palacios I, *et al*. Identification of potential sources of airborne Olea pollen in the Southwest Iberian Peninsula. Int J Biometeorol. 2014;58(3):337-48.

137. Esteve RS, Baisnee D, Guinot B, Petit JE, Sodeau J, O'Connor D, *et al*. Temporal variability and geographical origins of airborne pollen grains concentrations from 2015 to 2018 at Saclay, France. Remote Sensing. 2018;10(12):1932.

138. Robichaud A. A case study of birch pollen and the synergy with environmental factors : relation to asthma in Montreal, Canada. Atmosphere. 2021;12(6). https://www.mdpi.com/2073-4433/12/6/789

139. Kurganskiy A, Skjøth CA, Baklanov A, Sofiev M, Saarto A, Severova E, et al. Incorporation of pollen data in source maps is vital for pollen dispersion models. Atmospheric Chemistry and Physics. 2020;20(4):2099-121.

140. Globema [En ligne]. Globema;2023. Google introduces new environment APIs : the Pollen API. Disponible : https://google.globema.com/2023/10/12/google-introduces-the-pollen-api/

141. Robichaud A. L'aérobiologie du pollen de bouleau (Betula spp.) : synergie avec les facteurs environnementaux et impacts sur les maladies respiratoires [En ligne]. Québec, Canada : 2018. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/38437388_L'aerobiologie_du_pollen_de_bouleau_Betula_spp_synergie_avec_les_facteurs_environnementaux_et_impacts_sur_les_maladies_respiratoires

142. Anses. NOTE d'appui scientifique et technique relative à la surveillance phénologique du pollen dans l'air ambiant et à l'indicateur de risque d'allergie lié à l'exposition au pollen (RAEP) [En ligne]. France : Anses; 2022. Disponible : https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2020AST0168.pdf

ANNEXE 1 TABLEAUX ASSOCIÉS À LA STRATÉGIE DE RECHERCHE

Tableau A1-1 Concepts et mots-clés

	Concept 1 Ce que l'on surveille	Concept 2 Méthodes de mesure et d'analyse des pollens allergènes	Concept 3 Méthodes de cartographie et de diffusion de l'information	Concept 4 Aborde tout le système de surveillance
Mots-clés en anglais	• Allergenic pollen • Pollen allergy • Aeoroallergen • Airborne pollen • Ragweed • Ambrosia • Artemisiifolia • Poaceae • Seasonal allergies •	• Detection • Monitoring • Site • Design measurement • Processing • Station • Count • Automatic count • Data collection • Data sampling • Sampler • Classification • Identification • Real time • Monitoring network • Spatial sampling • Location • Analysis •	• Spatial sampling • Mapping • Geographic distribution • Spatial distribution • Alert • Geographic information systems • Spatial-temporal • Geography • Spatial analysis • Environmental factors • Modeling • Forecasting • Prediction, • Remote sensing • Land use • Allergy risk map • Modeling maps • Community mapping • Crowdsourced mapping • Volunteer mapping	• Surveillance • Epidemiological surveillance • Environnemental surveillance • Global monitoring • Aerobiological surveillance • Phenological Pollen monitoring

ANNEXE 2 DÉTAILS SUR DES APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES

M1. Méthodologie de l'approche descendante

La première étape menant à la création de la carte d'infestation de la plante sur un territoire donné consiste à déterminer la superficie occupée par la plante ou le nombre total d'habitats de la plante dans un rayon autour de la station de mesure. Skjøth *et al*. [84] ont sélectionné un rayon de 30 km sur la base de la littérature décrivant la distance moyenne que les grains de pollen peuvent parcourir en un jour à partir de leurs sources (84). La valeur du rayon peut également être obtenue par l'intermédiaire de systèmes de modélisation mésoéchelle tels que SILAM (87). La connaissance des habitats de croissance, s'appuyant parfois sur des avis d'experts, permet de sélectionner les catégories d'utilisation du sol (ex. : terrain vacant) propices au développement de la plante.

La deuxième étape consiste à calculer le niveau d'infestation des habitats de croissance de la plante autour de la station de mesure. Enfin, une méthode d'interpolation géospatiale est utilisée pour générer les niveaux d'infestation sur l'ensemble du territoire à l'étude (83,86,87).

M2. Méthode de calcul du RAEP

Les informations phénologiques liées à la surveillance, cliniques et météorologiques sont mises ensemble pour calculer le RAEP. Mathématiquement, il s'écrit :

RAEP = Rath + (C+P+M)/3

Où **RAth** est le risque d'allergie théorique hebdomadaire. Autrement dit, la probabilité pour une personne allergique au pollen de présenter des symptômes cliniques, dans une zone géographique spécifique. Le Rath est un indice composite qui tient compte du potentiel allergisant du pollen, de la durée de la saison pollinique, des conditions météorologiques, des comptes polliniques et de la localisation géographique.

C est l'indice clinique calculé en utilisant les données de symptomatologie observée au sein de la population, recueillies chaque semaine par des médecins sentinelles (ex. : allergologues) collaborant avec le RNSA.

P est l'indice phénologique obtenu à partir de bulletins phénologiques décrivant la floraison, l'absence de floraison ou la non-observation des plantes. Ces informations sont relevées par des observateurs bénévoles des différents jardins et polliniers.

M est l'indice météorologique utilisant les prévisions de la température, de la pluie et du vent pour les six prochains jours de différentes zones géographiques(142).

ANNEXE 3 GRILLE D'EXTRACTION

Tableau A3-1 Système de détection automatisée

Publications	Oteros, *et al.* (2015) Oteros *et al.* (2020) Plaza (2022) Huffmanetal (2019) Buters (2024)	Crouzy *et al.* (2016) Šaulien *et al.* (2019) Huffman *et al.* (2019) M. Boldeanu *et al.* (2020) Chappuis *et al.* (2020) Tesendic *et al.* (2022) Smith *et al.* (2022) Buters (2024)	Sauvageat *et al.* (2019) Huffman *et al.* (2019) Erb *et al.* (2024) Buters, (2024)	Markey *et al.* (2022) Ruske (2018) Buters (2024)	Jiang *et al.* (2022) Buters (2024)	Kawashima *et al.* (2017) Buters (2024)
Zone d'étude	Allemagne	Serbie, Croatie, Suisse et Lituanie	Suisse	Royaume-Uni	Amérique du Nord (États-Unis)	Japon
Nom du capteur automatique	BAA500 system	PA-300 ou son successeur Rapid-E	Swisens Poleno	WIBS	APS-300	KH-3000
Débit d'air	100 L/min	2,8 L/min	40 L/min	0,3 L/min	13,7 L/min	4,1 L/min
Technique de détection	Prélèvement par impaction et microscopie numérique	Diffusion élastique et fluorescence induite par la lumière ultraviolette	Diffusion élastique, fluorescence induite par la lumière ultraviolette et holographie	Fluorescence induite par la lumière ultraviolette	Prélèvement par impaction et microscopie numérique	Diffusion élastique
Taille des particules	> 5 µm	0,5–100 µm	0,5–100 µm	0,5-30 µm	> 8 µm	> 10µm
Résolution temporelle	3 heures (peut être ajustée à 1 heure)	Inférieure à 1 minute	> = à 10 minutes	Peut être ajustée jusqu'aux millisecondes	< à 1 minute)	1 heure

Tableau A3-1 Système de détection automatisée (suite)

Algorithme d'identification	LDL[44] et RNC[45]	RNC	RNC	K-Means	RNC	LDL
Efficacité de détection	40 classes taxonomiques avec une précision au-delà de 85 %	Bonne corrélation avec l'approche manuelle (R > 0,7) pour 11 types de pollens Précision de 65 % pour 26 classes taxonomiques	Peut reconnaître jusqu'à 6 types de pollen avec une précision au-dessus de 90 %	Capable de distinguer les taxons de pollen des autres particules biologiques : pollen d'arbre (R2 = 0,8), Pollen d'herbacées (R2 = 0,6) et les graminées (R2 = 0,4)	Bonne corrélation avec l'approche manuelle (R > 0,77) pour 20 types de pollens	Capable d'identifier le cèdre japonais

[44] Analyse discriminante linéaire.

[45] RNC : réseau de neurones convolutif (intelligence artificielle).

Tableau A3-2 Cartographie de sources de pollen : approche ascendante

Publications	McInnes *et al.* (2017)	Gentili *et al.* (2017)	Carinanos *et al.* (2016) Cariñanos *et al.* (2017) Calatayud *et al.* (2024)	Pecero-Casimiro *et al.* (2019) Pecero-Casimiro *et al.* (2020)	Sousa-Silva *et al.* (2020)	Pham-Thi *et al.* (2019)
Zone d'étude	Royaume-Uni	Italie	25 villes d'Espagne	Espagne	Plusieurs grandes villes du monde	France
Données d'entrée	Catégorie d'utilisation du sol	Données d'observations de présence des plantes	VPA[46] et paramètres biométriques (diamètre et hauteur de la canopée)	Données Lidar Carte de distribution des platanes Réseau routier Superficie totale de la ville en km^2	PA[47] des plantes à partir de plusieurs sources (ex. : OPALS)	PA et nombre d'arbres
Type de plante	Graminée	Herbe à poux	Plusieurs espèces d'arbres	Platanes-Platanus Cupressacées-*Cupressaceae*	Plusieurs espèces d'arbres	Plusieurs espèces d'arbres
Objectif de la cartographie	Localisation des plantes produisant de pollens allergènes	Distribution spatiale de la présence de plantes produisant de pollens allergènes	Localisation des parcs et des espaces verts produisant de pollens allergènes	Distribution spatiale de l'allergénicité des plantes ornementales	Distribution spatiale de l'allergénicité de certaines espèces d'arbres	Localisation des parcs et des espaces verts produisant de pollens allergènes
Indicateur à cartographier	Taux de couverture	Présence ou non de l'herbe à poux	[48]I_{ugza}	AIROT[49]	PA	Indice de source

[46] VPA : valeur du potentiel allergène.

[47] PA : potentiel allergène.

[48] I_{ugza} : indice d'allergénicité des zones vertes en milieu urbain (*Index of Urban Green Zones Allergenicity Index*).

[49] AIROT : indice de risque aérobiologique pour les plantes ornementales *(Aerobiological Index of Risk for Ornamental Trees*).

Tableau A3-2 Cartographie de sources de pollen : approche ascendante (suite)

Méthode de cartographie	• Sélection des graminées (Grass) à partir de catégories d'utilisation du sol • Discrétisation en quantile	Colorer 1 057 quadrants** avec une présence d'herbe à poux sur un total de 9 272 quadrants	Répartition des parcs ou des espaces verts, représentés par des cercles proportionnels à la valeur du I_{ugza} et Krigeage (méthode géostatistique d'interpolation spatiale)	Construit sur la base des caractéristiques physiques de l'environnement (ex. : configuration des routes, l'élévation et la pente de terrain), le nombre de plantes d'une même espèce par hectare sur chaque route, ainsi que le diamètre du tronc ou le développement des branches. Krigeage : méthode géostatistique d'interpolation spatiale	Assigner le PA à chaque espèce d'arbre	S. O.
Type de carte	Raster	Raster	Point Raster	Raster	Point	Point
Résolution spatiale	25 m × 25 m et 1 km × 1 km	6 km × 5 km	0* 300 m	Non précisée	0	0
Limites géographiques	Pays	Pays	Ville	Ville	Ville	Ville

Tableau A3-2 Cartographie de sources de pollen : approche ascendante (suite)

Application	• Études épidémiologiques[50] • Outils de prévention des allergies[51] • Intrants des SAPMQA [52]	Intrants des SAPMQA	Planification urbaine[53]	• Planification urbaine • Outils de prévention des allergies	Planification urbaine	• Planification urbaine • Outils de prévention des allergies

* Les cartes illustrant la distribution spatiale des entités de type « point » n'ont pas de résolution spatiale explicite en raison de la nature de la carte.

** La Terre est divisée en zones selon le système de projection cartographique de l'Europe centrale UTM-ED50 (Universal Transverse Mercator). Chaque zone est subdivisée en quatre parties égales, appelées « quadrants ».

[50] Contribuer, à titre d'intrant, aux études épidémiologiques visant à documenter l'exposition de la population aux plantes allergènes sur le court et moyen termes.

[51] Servir d'outils aux professionnels et professionnelles de la santé et aux personnes allergiques dans la prévention des allergies causées par les pollens allergènes.

[52] Servir d'intrants aux systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air.

[53] Contribuer à la planification urbaine, notamment des parcs et des espaces verts.

Tableau A3-3 Cartographie de sources de pollen : approche descendante

Publications	Thibaudon *et al.* (2014)	Karrer *et al.* (2015)	Bonini *et al.* (2018)	Skjøth *et al.* (2019)	McInnes *et al.* (2017)
Zone d'étude	France	Autriche	Italie	Europe	Royaume-Uni
Données d'entrée	• MNE[54] • Données terrain[55] • Catégorie d'utilisation du sol • Comptes polliniques (SAP[56])	• Données terrain • MNE • Catégorie d'utilisation du sol • Comptes polliniques (SAP) • Connaissance locale de l'infestation de l'herbe à poux	• Connaissance locale de l'infestation de l'herbe à poux • Comptes polliniques (SAP) • Catégorie d'utilisation du sol	• Catégorie d'utilisation du sol • MNE • Comptes polliniques (SAP)	• Catégorie d'utilisation du sol • Avis d'experts concernant les habitats de croissance des plantes de type herbacée
Nombre de stations de pollen	29	19	91	349	S. O.
Type de plante	Ambroisie (herbe à poux)	Ambroisie (herbe à poux)	Ambroisie (herbe à poux)	S O.	Ambroisie (Herbe à poux)
Couverture temporelle des données polliniques	Varie selon les villes (de 1 à 25 ans)	10 ans (2004–2013)	10 ans (2003-2014)	8 ans (2004-2012)	8 ans (2004-2012)
Objectif de la cartographie	Créer une base de données géoréférencée de la présence de l'herbe à poux	Créer une base de données géoréférencée de la présence de l'herbe à poux	Créer une base de données géoréférencée de la présence de l'herbe à poux	Valider et produire une carte numérique de la répartition de l'herbe à poux	S. O.

[54] MNE : modèle numérique d'élévation.

[55] Données d'observations de présence d'herbe à poux.

[56] SAP : somme annuelle de pollen.

Tableau A3-3 Cartographie de sources de pollen : approche descendante (suite)

Indicateur à cartographier	Niveau d'infestation de l'herbe à poux	Niveau d'infestation de l'herbe à poux	Niveau d'infestation de l'herbe à poux	Répartition de l'herbe à poux	
Méthode de cartographie	Voir la note de bas de page[57]	Voir la note de bas de page	Voir la note de bas de page	Voir la note de bas de page	Voir la note de bas de page
Type de carte	Raster	Raster	Raster	Raster	Raster
Résolution spatiale	5 km × 5 km	5 km × 5 km	5 km × 5 km	S. O.	1 km × 1 km
Limites géographiques	Pays	Pays	Pays	Europe	Pays
Application	Intrants des SAPMQA[58]	Intrants des SAPMQA	Intrants des SAPMQA et évaluation de la gestion de l'herbe à poux	Intrants des SAPMQA et évaluation de la gestion de l'herbe à poux	• Études épidémiologiques[59] • Outils de prévention des allergies[60] • Intrants des SAPMQA

[57] (1) Estimation du niveau global d'infestation de l'herbe à poux à l'intérieur de la zone de 30 km autour de chaque station; (2) Assigner à chaque station le niveau global d'infestation correspondant; (3) Interpolation spatiale pour générer les niveaux d'infestation sur l'ensemble d'habitats de croissance possibles de la zone d'étude.

[58] Servir d'intrants dans les systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air.

[59] Contribuer, à titre d'intrant, aux études épidémiologiques visant à documenter l'exposition de la population aux plantes allergènes sur le court et moyen termes.

[60] Servir d'outils aux professionnels ou professionnelles de la santé et aux personnes allergiques dans la prévention des allergies causées par les pollens allergènes.

Tableau A3-4 Cartographie de sources de pollen : approche écologique

Publication	Storkey *et al.* (2014)	Rasmussen *et al.* (2022)	Qin *et al.* (2022)	Liu *et al.* (2016)	Liu *et al.* (2016) Chapman *et al.* (2017)	Zink *et al.* (2017)	Case *et al.* (2018)	Katz *et al.* (2019) Ngom *et al.* (2014)
Zone d'étude	Europe	Europe	Chine	Europe	Europe	France	États-Unis	États-Unis Detroit, Michigan) et zones urbanisées du Québec
Donnée d'entrée	• Données de signalement de l'herbe à poux [61] • Données météorologiques[62]	• Données de signalement de l'herbe à poux • Données climatiques ou bioclimatiques [63] • Bilan hydrique	• Données de signalement de l'herbe à poux • Données bioclimatiques[64]	• Comptes polliniques journaliers • Niveau d'infestation de l'herbe à poux • Catégorie d'utilisation du sol	• Température journalière (entre 1991 et 2010) • Données de signalement de l'herbe à poux •	• Données de signalement de l'herbe à poux • Données climatiques et bioclimatiques [65]	• Données de signalement de l'herbe à poux • Données climatiques ou bioclimatiques[66]	• Données de signalement de l'herbe à poux • Distribution géographique de la présence de l'herbe à poux[67]

[61] Base de données de signalement de l'occurrence de l'herbe à poux (un des réseaux à but non lucratif d'échange de données avec une couverture planétaire est le système mondial d'information sur la biodiversité [*Global Biodiversity Information Facility*]).

[62] Données météorologiques quotidiennes synthétiques sur plusieurs années (ex. : 100 années) couvrant chaque emplacement d'herbe à poux.

[63] Degrés-jours de croissance, température minimale absolue du mois le plus froid (Tmin).

[64] 19 variables bioclimatiques en lien avec la température, les précipitations et autres (moyenne sur 50 années).

[65] Température maximale du mois le plus chaud, température moyenne de la saison la plus froide, amplitude thermique annuelle, précipitations de la saison la plus sèche, précipitations de la saison la plus chaude.

[66] Températures mensuelles moyenne, maximale et minimale, précipitations moyennes mensuelles et autres variables bioclimatiques (ex. : température maximale du mois le plus chaud).

[67] Données dérivées d'images satellitaires, des données Lidar et des catégories d'utilisation du sol.

Tableau A3-4 Cartographie de sources de pollen : approche écologique (suite)

Type de plante	Herbe à poux	Herbe à poux, et autres herbacées[68]	Herbe à poux, et autres herbacées	Herbe à poux	Herbe à poux	Herbe à poux	Herbe à poux	Herbe à poux
Type de modèle	MDE[69] basés sur les processus	MDE empiriques	MDE empiriques	MDE basés sur les processus	MDE basés sur les processus	MDE empiriques	MDE empiriques	MDE empiriques
Sous-catégorie du modèle	Modèle écologique appelé SIRIUS	Maxent	Maxent	Modèle phénologique de l'herbe à poux	Modèle phénologique de l'herbe à poux	Certains modèles[70]	Maxent[71]	Régression logistique et la logique floue
Indicateur à cartographier	Qualité de l'habitat *(suitability habitat*)	Qualité de l'habitat ou probabilité de présence de l'herbe à poux	Qualité de l'habitat ou Probabilité de présence de l'herbe à poux	Probabilité de présence de l'herbe à poux[72]	Probabilité de présence de l'herbe à poux	Qualité de l'habitat ou probabilité de présence de l'herbe à poux	Qualité de l'habitat ou probabilité de présence de l'herbe à poux	Probabilité de présence de l'herbe à poux

68 Ambroisie à épis lisses (*Ambrosia psilostachya)*, ambroisie trifide ou grande herbe à poux (*Ambrosia trifida)*.

69 MDE : modèles de répartition des espèces.

70 Le modèle linéaire généralisé (*Generalized Linear Models;* GLM), le modèle de régression boostée généralisé (*Generalized Boosted Regression Models;* GBM)
et la méthode de l'entropie maximale (Maxent).

71 Le logiciel Maxent utilise une technique d'apprentissage automatique appelée modélisation de l'entropie maximale.

72 Probabilité de présence de l'herbe à poux ajustée en tenant compte des comptes polliniques.

Tableau A3-4 Cartographie de sources de pollen : approche écologique (suite)

Méthode de cartographie	Répartition de la qualité de l'habitat de l'herbe à poux[73]	Répartition de la qualité de l'habitat de l'herbe à poux	Répartition de l'herbe à poux, d'ambroisie à épis lisses et d'ambroisie trifide ou grande herbe à poux	Assigner la probabilité de présence de l'herbe à poux à chaque cellule de la grille	Assigner la probabilité de présence de l'herbe à poux à chaque cellule de la grille	Assigner la probabilité de présence de l'herbe à poux à chaque cellule de la grille	Assigner la probabilité de présence de l'herbe à poux à chaque cellule de la grille	Assigner la probabilité de présence de l'herbe à poux à chaque cellule de la grille
Modèle climatique	Modèle climatique global HadCM3	Basé sur les conditions climatiques actuelles	Modèle climatique globale : CNRM-CM5 HadGEMs-ES MIROC5, BCC-CSM1.1	Modèle climatique régionale : RegCM-4	Modèle climatique régional : HIRHAM	COSMO-ART	13 modèles climatiques globaux (MCG)[74]	S. O.
Horizon de prévision	2010–2030 2050–2070	2100 (période de projection 2070-2099)	Actuelle 2050	Rétrospectif (2000-2010)	Rétrospectif (1991-2010) Futur (2076–2095)	Rétrospectif : 1 année (2012)	Actuelle 2050 (moyenne sur2041–2060) 2070 (moyenne sur 2061–2080)	Rétrospectif : 2016 et 2017
Scénarios d'émission	A1B	GIEC changement climatique scénarios (RCP 6.0 et RCP 8.5)	RCP4.5 et RCP8.5	S. O.	SRES-A2	S. O.	(RCPs) 4.5 et 8.5	S. O.

[73] La qualité de l'habitat a été répartie en six catégories : « Pas favorable »; « Peu favorable »; « Occasionnelle »; « Occasionnelle – Moins probable »; « Établie »; « Bien établie. »

[74] MCG : ACCESS1-0, BCC-CSM1-1, CCSM4, CNRM-CM5, GFDL-CM3, GISS-E2-R, HadGEM2-ES, INMCM4, IPSL-CM5A-LR, MIROC5, MPI-ESM-LR, MRI-CGCM3, NorESM1-M.

Tableau A3-4 Cartographie de sources de pollen : approche écologique (suite)

Type de carte	Thématique	Raster	Raster	Raster	Raster	Raster	Raster	Raster
Résolution spatiale	0	10 km × 10 km	9,3 km × 9,3 km	50 km × 50 km	0,25° (correspond approximativement à une grille de 20 km × 28 km)	Non précisée	1 km × 1 km	16 m × 6 m De 1,8 m à 20 m selon la nature de l'image satellitaire
Limites géographiques	Europe	Europe	Asie	Europe	Europe	Pays	Pays	Ville
Application	Élaboration de stratégies de gestion efficaces[75]	• Soutenir les stratégies d'adaptation en réponse au changement climatique • Élaboration de stratégies de gestion efficaces	• Évaluer le risque que ces trois espèces d'Ambrosie représentent pour de nombreux pays asiatiques • Détection précoce et stratégies de prévention[76]	Servir d'intrants des SAPMQA	Élaborer les stratégies de gestion efficaces visant à contrôler l'expansion des plantes allergènes et d'évaluer le risque sur la santé des populations	Servir d'intrants des SAPMQA	Élaboration de stratégies de gestion efficaces	• Planification urbaine[77] • Permettre à élaboration de mesures de contrôle[78]

[75] Élaborer les stratégies de gestion efficace visant à contrôler l'expansion des plantes allergènes et à évaluer le risque sur la santé des populations.

[76] Définir les priorités en matière de détection précoce et de stratégies de prévention.

[77] Contribuer à la planification urbaine, notamment des parcs et des espaces verts.

[78] Permettre à élaborer des mesures de contrôle de l'herbe à poux.

Tableau A3-5 Cartographie de sources de pollen : apport de la télédétection

Publication	Liu *et al.* (2024)	Khwarahm *et al.* (2014)	Bogawski *et al.* (2019)
Zone d'étude	Sydney et Brisbane, Australie	Royaume-Uni	Poznan, Pologne
Objectif de la cartographie	• Extraire d'images satellites les données environnementales et phénologiques • Comprendre la répartition spatiale et les variations temporelles des sources de pollen de graminées	Développement d'une technique pour définir le début de la floraison à partir de données MTCI	S. O.
Type de plante	Graminées	Graminée et bouleau	Bouleau
Données sources	• Images satellites de type Sentinel-2 • Catégorie d'utilisation du sol	• Données de séries temporelles MTCI • Comptes polliniques • Données d'occupation du sol	• Zones couvertes par le bouleau • Catégorie d'utilisation du sol • Donnée Lidar
Indicateur à cartographier	Répartition spatiale des graminées	Date de début de floraison	Distribution spatiale de la canopée
Méthode de cartographie	• Utilisation d'intelligence artificielle pour classer les images de type Sentinel-2 • Extraction d'informations sur la verdure en utilisant les catégories d'utilisation du sol	Approche d'inflexion[79]	Basée sur les données Lidar
Type de carte	Raster	Raster	S. O.
Résolution spatiale	20 km × 20 km	1 km × 1 km	S. O.
Limites géographiques	Ville	Pays	Ville
Application	• Améliorer la compréhension de l'aérobiologie des pollens de graminées en milieu urbain	• Guider le choix des emplacements des capteurs de pollen • Outils de prévention des allergies[80]	S. O.

[79] La méthode de phénologie des points d'inflexion est basée sur la détection des points où la courbure maximale se produit dans les séries temporelles des indices de végétation.

[80] Servir d'outils aux professionnels et professionnelles de la santé et aux personnes allergiques dans la prévention des allergies causées par les pollens allergènes.

Tableau A3-6 Cartographie de concentrations polliniques : modèle théorique

Publication	Werner *et al.* (2020)	Hamaoui-Laguel *et al.* (2015)	Rodinkova *et al.* (2018)	Robichaud (2021)	Mimic *et al.* (2021)	Verstraeten *et al.* (2021)
Zone d'étude	Pologne	Europe	Ville de Vinnytsia, Ukraine	Canada	Vojvodine région, Serbie	Belgique
Type de pollen	Bouleau	Herbe à poux	Herbe à poux	Bouleau	Herbe à poux	Graminée
Type de modèle	Modèle basé sur les processus : modélisation numérique atmosphérique	Modèle basé sur les processus : modélisation numérique atmosphérique	Modèle basé sur les processus : modélisation numérique atmosphérique	Modèle basé sur les processus : modélisation numérique atmosphérique	Modèle basé sur les processus : modélisation numérique atmosphérique	Modèle basé sur les processus : modélisation numérique atmosphérique
Modèle d'émission pollinique	Basé sur le degré-jour de chauffage (la sortie est le flux d'émission des grains de pollen de bouleau)	Hypothèse à propos des particules de pollen[81]	Modèle phénologique basé sur la somme cumulative des températures au-dessus d'un certain seuil	Adaptation du modèle d'émission pollinique de Helbig *et al.*, (2004) pour le pollen de Bouleau[82]	Estimation du moment de la floraison est basée sur le modèle phénologique	Méthode du calendrier pollinique[83]

[81] Repose sur l'hypothèse que le flux vertical des particules de pollen au-dessus de la végétation est proportionnel au produit de la concentration et de la vitesse dérivée des particules.

[82] Adaptation du modèle pour le pollen de bouleau afin de l'appliquer dans la région allant du sud-est du Canada au nord-est des États-Unis.

[83] Le calendrier est établi en utilisant les mesures polliniques des stations de pollen. Au total, 17 simulations SILAM ont été réalisées pour la période 2008-2018 en changeant les jours de début et de fin de la saison pollinique, de même qu'en procédant à la comparaison des séries temporelles modélisées avec les données observées sur cinq sites du réseau belge de surveillance aérobiologique, afin de déterminer de meilleures dates de début et de fin de saison pollinique.

Tableau A3-6 Cartographie de concentrations polliniques : modèle théorique (suite)

Donnée d'entrée	• Paramètres météorologiques[84] • Répartition spatiale du bouleau • Base de données des dates de phases phénologiques[85]	Répartition spatiale de la densité de l'herbe à poux[86]	Compte pollinique journalier	Température Rayonnement solaire Humidité Répartition géographique des bouleaux (10 km × 10 km)	Données d'utilisation du sol ou de structure de la végétation Informations météorologiques pour les modèles de dispersion de pollen.	S. O.
Nombre de stations de pollen	11	51	6	1	S. O.	S. O.
Donnée de sortie	Concentrations de pollen à l'origine des premiers symptômes d'allergie (supérieure à 20 pollens/m³) ainsi que des symptômes sévères (supérieure à 90 pollens/m³)	Évolution de la production moyenne de pollen (en pourcentage)	Somme saisonnière de pollen	Concentration horaire du pollen de bouleau	Équilibre du point de la somme annuelle de pollen	S. O.
Indicateur à cartographier	Somme saisonnière de pollen et dates de début et de fin de la saison pollinique	Évolution de la production moyenne de pollen (en pourcentage)	S. O.	Concentration horaire du pollen de bouleau	Concentrations de pollen d'ambrosie d'une granularité temporelle de 2 heures	Répartition spatiale des graminées
Résolution	12 km × 12 km	50 km × 50 km	S. O.	10 km × 10 km	0,1° × 0,1°	S. O.

[84] Température, humidité relative, la vitesse du vent et les précipitations.

[85] Cette base de données comprend plus de 15 000 enregistrements concernant les dates de phases phénologiques. Ces enregistrements permettent de déterminer les seuils de cumul de température de début et de fin de saison.

[86] La densité de l'herbe à poux est fournie par l'approche écologique et ajustée par les comptes polliniques.

Tableau A3-6 Cartographie de concentrations polliniques : modèle théorique (suite)

Méthode de cartographie	S. O.	S. O.	S. O.	Chaque cellule de la grille est représentée par une couleur dont l'intensité varie selon la valeur de l'indicateur	Chaque cellule de la grille est représentée par une couleur dont l'intensité varie selon la valeur de l'indicateur	S. O.
Modèle climatique/Modèle météo-chimie	WRF-Chem	• Modèle climatique global : IPSL-CM5A-MR • Modèle climatique régional : RegCM4	SILAM	GEM-MACH	WRF (v3.6.1) SILAM (v5.6).	SILAM
Scénarios d'émission	Rétrospectif : 2015, 2016	Rétrospectif (1986–2005) Dutur 2050 (pour la moyenne de 2041–2060) : RCP 8.5 et RCP 4.5	Rétrospectif, 2010	Rétrospectif : période (11 avril-31 mai 2018)	Rétrospectif : 2016	S. O.
Limites géographiques	Pays	Continent	Ville	Pays et ses environs	Région	Pays

Tableau A3-6 Cartographie de concentrations polliniques : modèle théorique (suite)

Application	Outils de prévention des allergies[87]	Élaborer des programmes d'éradication efficaces d'herbe à poux au niveau régional ou continental	• Aider à contrôler la rhinite allergique • Outils de prévention des allergies[88]	• Outils de prévention des allergies	Ajuster les paramètres du SAPMQA[89]	S. O.

[87] Servir d'outils aux professionnels et professionnelles de la santé et aux personnes allergiques dans la prévention des allergies causées par les pollens allergènes.

[88] Servir d'outils aux professionnels et professionnelles de la santé et aux personnes allergiques dans la prévention des allergies causées par les pollens allergènes.

[89] Permet d'ajuster les paramètres du systèmes adaptés de prévision météorologique et de la qualité de l'air en tenant compte des comptes ou des concentrations de pollen dans l'air observées.

Tableau A3-7 Cartographie de concentrations polliniques : modèle empirique

Publication	Hjort *et al.* (2016)	Nowosad, J. (2016)	Cowie *et al.* (2019)	Zewdie *et al.* (2019)	Oteros *et al.* (2019)	Csepe *et al.* (2020)	Valipour Shokouhi *et al.* (2024)
Zone d'étude	Helsinki Finland	Pologne	Royaume-Uni	États-Unis	Bavière, Allemagne	Région biogéographique pannonienne (RBP)	Suisse
Type de pollen	Graminées	Pollens d'arbre[90]	Herbacées, graminées et arbres	Herbe à poux	Pollen d'arbres et d'herbacées[91]	S. O.	Pollen d'arbre et de graminées[92]
Type de modèle	Modèle empirique : *Land Use Regression* : régression linéaire généralisée	Modèle empirique : apprentissage automatique (AA) : forêts aléatoires	Modèle empirique : régression linéaire	Modèle empirique : réseaux de neurones et forêts aléatoires	Modèle empirique : géostatistique (cokrigeage)	Modèle empirique : réseau de neurones	Modèle empirique : Land use regression (Forêt aléatoire)

[90] Aulne (*Alnus*), bouleau (*Betula*), noisetier (*Corylus*).

[91] Aulne (*Alnus*), Ambroisie (*Ambrosia*), Armoise (*Artemisia*), Bouleau (*Betula*), Charme (*Carpinus*), Cupressacées (*Cupressaceae*), Frêne (*Fraxinus*), Épicéa (*Picea*), Pinus (*Pinus*), *Plantago*, Poacées (*Poacea*), Peuplier (*Populus*), Tilleul (*Tilia*), Urticacées (*Urticaceae*).

[92] Noisetier (*Corylus*), Aulne (*Alnus*), Frêne (*Fraxinus excelsior*), Bouleau (*Betula*) et les graminées de la famille de Poaceae.

Tableau A3-7 Cartographie de concentrations polliniques : modèle empirique (suite)

Données d'entrée	• Mesure de verdure • Superficie des terrains vagues • Catégorie d'utilisation du sol	• Concentrations journalières élevées pour les trois types de pollen • Paramètres météorologiques[93]	• Comptes polliniques hebdomadaire • Nombre de gazouillis (tweets) extraits de la plateforme X ayant mentionné les symptômes de rhume des foins	Donnée Radar NEXRAD (*Next Generation Weather Radar*)	**Variable dépendante** Concentration journalière de pollen (de 00 h to 23 h 59) **Variable indépendante[94]**	• Concentrations de pollen des trois derniers jours • Variables indépendantes[95]	• Concentration journalière de pollen • Plusieurs variables indépendantes[96]
Nombre de stations de pollen	16	11	17	1	26	22	14

[93] La grille de cellules de taille régulière (25 km × 25 km) contenant : température mensuelle moyenne pour chaque mois de l'année précédente, température maximale moyenne au cours des quatre derniers jours, température maximale moyenne au cours des 16 derniers jours, température minimale moyenne au cours des quatre derniers jours, température minimale moyenne au cours des 16 derniers jours, pression de vapeur moyenne au cours des quatre jours précédents, pression de vapeur moyenne au cours des 16 jours précédents, vitesse moyenne du vent au cours des quatre jours précédents, précipitations quotidiennes moyennes au cours des quatre jours précédents, précipitations quotidiennes moyennes au cours des 16 jours précédents, évaporation potentielle moyenne au cours des quatre jours précédents, évaporation potentielle moyenne au cours des 16 jours précédents, moyenne du rayonnement global total au cours des quatre jours précédents, moyenne du rayonnement global total au cours des 16 jours précédents, degrés-jours de croissance (DJC) cumulés décalés d'un jour, longitude de la cellule de la grille, latitude de la cellule de la grille, et altitude moyenne de la cellule de la grille.

[94] Élévation au-dessus du niveau de la mer et données journalières de précipitations.

[95] Données météorologiques (moyenne journalière, température minimale et maximale, précipitations, vitesse moyenne journalière du vent et humidité relative) pour la journée actuelle et les journées antérieures (trois jours).

[96] Catégorie d'utilisation du sol, variables météorologiques (moyenne journalière, température, humidité relative, direction du vent, vitesse du vent, hauteur de la couche limite, totale des précipitations), indice de surface foliaire (*Leaf Area Index*), modèle numérique d'élévation (MNE), indices dérivés d'images satellitaires, couverture spatiale du bouleau (*Birch)*, d'aulne (*Alder*), du frêne (As*h*) et du noisetier (*Hazel*) *et* date (jour, mois, semaine et saison de l'année).

Tableau A3-7 Cartographie de concentrations polliniques : modèle empirique (suite)

Donnée de sortie	Concentrations moyennes de pollen	Probabilité de concentration élevée de pollen par jour	Comptes polliniques hebdomadaires	Concentration journalière de pollen d'herbe à poux	Concentration journalière de pollen	Concentrations journalières prédictives	Concentration journalière de pollen
Indicateur à cartographier	Variabilité des concentrations moyennes de pollen de graminée à pendant la période estivale de 10 jours en 2023	Probabilité de concentration élevée de pollen par jour	Comptes polliniques hebdomadaires	Concentration journalière de pollen d'herbe à poux	Concentration journalière de pollen	Concentrations journalières de pollen pour les trois prochains jours	Concentration journalière de pollen
Résolution spatiale	100 m × 100 m	25 km × 25 km	S. O.	0,5 km × 0,5 km	1 km × 1 km	0,25 degré (20 km × 20 km)	S. O.
Méthode de cartographie	Chaque cellule de la grille est représentée par une couleur dont l'intensité varie selon la valeur de l'indicateur	Chaque cellule de la grille est représentée par une couleur dont l'intensité varie selon la valeur de l'indicateur	Attribuer des comptes polliniques hebdomadaires à chaque station incluant aussi celles dépourvues de stations de mesure	Chaque cellule de la grille est représentée par une couleur dont l'intensité varie selon la valeur de l'indicateur	Évolution des concentrations de pollen au cours des 9 premiers jours de la saison pollinique	Chaque cellule de la grille est représentée par une couleur dont l'intensité varie selon la valeur de l'indicateur	Chaque cellule de la grille est représentée par une couleur dont l'intensité varie selon la valeur de l'indicateur
Horizon de prévision : scénarios d'émission	Rétrospectif : 2023	Rétrospectif : 2011	Rétrospectif : 2016-2017	Rétrospectif : 2008.	Rétrospectif : 2015	Prédictif : de 1 à 3 jours	Rétrospectif : 2018
Limites géographiques	Ville	Pays et ses alentours	Pays	Région de 300 km × 300 km	Région	Région	Pays

Tableau A3-7 Cartographie de concentrations polliniques : modèle empirique (suite)

Application	Contribuer aux études épidémiologiques visant à étudier l'exposition de la population aux plantes allergènes sur le court, moyen et long terme	Servir de référence pour d'autres recherches	Servir d'outils aux professionnel(-le)s de la santé et aux personnes allergiques dans la prévention des allergies causées par les pollens allergènes	Servir d'outils aux professionnel(-le)s de la santé et aux personnes allergiques dans la prévention des allergies causées par les pollens allergènes	S. O.	Servir d'outils aux professionnel(-le)s de la santé et aux personnes allergiques dans la prévention des allergies causées par les pollens allergènes	Étudier l'exposition de la population aux plantes allergènes sur le court, moyen et long terme

Nº de publication : 3826

Centre d'expertise et
de référence en santé publique

www.inspq.qc.ca

Institut national
de santé publique
Québec