

Sciences Eaux & Territoires

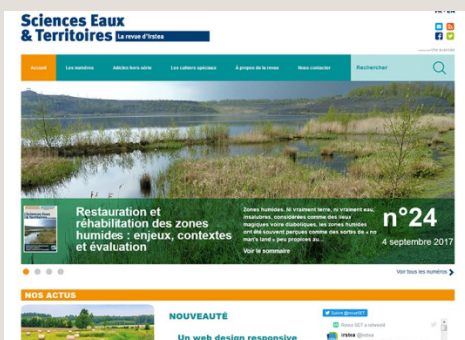
Article hors-série numéro 74

La biologie de la conservation doit-elle prendre en compte les paysages odorants ?

Michel RENOU, Romain SORDELLO et Yorick REYJOL

© Pavel Klimenko - Adobe Stock

www.set-revue.fr



Sciences Eaux & Territoires

Article hors-série numéro 73 – 2021

Directeur de la publication : Philippe Mauguin

Comité éditorial : Stéphanie Gaucherand, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Ghislain Huyghe, Emmanuelle Jannès-Ober, Nicolas de Menthière, Delphine Mézière, Sébastien Michel, Thierry Mougey et Michel Vallance

Coordination éditoriale : Sabine Arbeille

Secrétariat de rédaction, mise en page et suivi d'édition : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : CBat

Contact édition et administration : INRAE-DipSO

1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030

92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : set-revue@inrae.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution – N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : © Pavel Klimenko - Adobe Stock

INRAE

La biologie de la conservation doit-elle prendre en compte les paysages odorants ?

Les organismes vivants et la matière organique en décomposition libèrent dans l'atmosphère une grande diversité de composés organiques créant ainsi des paysages olfactifs servant de repères aux espèces au sein de leur milieu. Mais de nos jours, les activités humaines produisent elles-aussi d'innombrables composés odorants sans que nous n'y prenions nécessairement garde du fait de notre faible utilisation de l'odorat. Ces modifications anthropiques des paysages odorants affectent-elles le fonctionnement des écosystèmes ? Le cas échéant, comment est-il possible d'y remédier ?

La nature des paysages odorants et le rôle des odeurs dans le fonctionnement des écosystèmes

On regroupe sous le terme de BVOCs (pour « *Biogenic Volatile Organic Compounds* ») les divers composés organiques naturellement libérés dans l'atmosphère par les organismes vivants ou la matière organique en décomposition. Plantes et microorganismes sont les principaux producteurs de BVOCs dans les écosystèmes continentaux. Leur production est liée à plusieurs fonctions physiologiques : chez les végétaux supérieurs, l'émission de BVOCs est un facteur de résistance aux stress abiotiques (oxydatif, thermique) ou aux attaques de pathogènes. Pour les seuls dérivés terpéniques, si communs dans les arômes floraux, on estime à plus de soixante mille le nombre de composés différents issus de sources naturelles.

Une espèce donnée ne perçoit qu'une fraction des BVOCs présents dans son environnement, en fonction du répertoire de récepteurs olfactifs dont elle est dotée. Chaque espèce possède ainsi son « paysage olfactif » correspondant à sa propre expérience sensorielle de l'environnement (photo 1).

Les êtres vivants extraient des informations de leur paysage olfactif. En effet, une majorité de BVOCs sont impliqués dans des relations intra-spécifiques ou inter-spécifiques. Ces composés olfactifs « informatifs » sont alors qualifiés de « sémiachimiques », les plus connus étant les phéromones. Ils permettent à un animal de trouver et reconnaître une ressource (alimentaire ou reproductive) ou à une plante angiosperme d'attirer des pollinisateurs. C'est ainsi que les oiseaux de mer que sont les pétrels s'avèrent capables de repérer les zones poissonneuses au large des océans grâce au diméthyl sulfide émis par le phytoplancton. La communication olfactive joue ainsi un très grand rôle dans le fonctionnement d'un écosystème.

Les paysages olfactifs restent très dynamiques car ils sont brassés par les mouvements de l'air, eux-mêmes liés au climat local et à la topographie. Ils varient également au rythme des saisons, de l'alternance des jours et des nuits, selon les cycles biologiques des organismes émetteurs, ou encore sous l'effet d'événements naturels exceptionnels (incendies, par exemple).



© C. Tailleux - INRAE

❶ Dans un paysage donné, formé de différents habitats (ici un habitat de type « garrigue occidentale »), de multiples odeurs s'entremêlent dont la perception sensorielle dépend de chaque espèce, formant ainsi son « paysage olfactif ». Pour un panorama des habitats naturels et semi-naturels présents sur le territoire, consulter le référentiel national HABREF de l'Inventaire national du patrimoine naturel (INPN) : <https://inpn.mnhn.fr/telechargement/referentiels/habitats> En revanche la diversité des paysages olfactifs qui leur correspondent est très mal connue.

Les activités humaines modifient les paysages olfactifs

Les activités industrielles et agricoles produisent de nombreux composés volatils

Les activités industrielles et agricoles génèrent beaucoup de composés organiques volatils, que l'on appelle des AVOCs, le A signifiant ici « Anthropogenic » par contraste avec les Biogenic-VOCS évoqués précédemment. L'industrie énergétique, l'industrie chimique, l'industrie du bois, du papier et de la viscosité, l'élevage et l'agriculture, les industries agroalimentaires ou encore les activités de traitement des déchets sont les principaux secteurs concernés.

Ces activités peuvent libérer des molécules organiques qui n'existent pas à l'état naturel dans l'environnement. Elles peuvent aussi produire certaines molécules naturellement émises par les organismes vivants mais libérées en telles quantités qu'elles dépassent les capacités d'élimination des écosystèmes. L'éthanol, par exemple, est l'un des composés les plus émis par les activités agro-alimentaires.

Ces effluents sont souvent déjà qualifiés de pollution odorante, mais il est intéressant de constater que c'est lorsque leur perception par l'homme représente une nuisance, ce point de vue anthropocentré traduisant bien le fait que la notion d'odeur est organisme-dépendante. Outre ces effets sensoriels, la toxicité physiologique de certains AVOCs est reconnue. Ainsi, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont sur les listes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour leurs effets mutagènes et cancérigènes. En revanche, concer-

nant la faune et la flore sauvage, l'impact des AVOCs dans des paysages odorants naturels n'a été que très peu, voire pas du tout, analysé. On ne dispose que de quelques exemples, comme le fait que la présence de fongicide (issu des traitements phytosanitaires) peut diminuer la capacité de bourdons à localiser une source de nourriture.

La pollution atmosphérique diminue l'efficacité de la communication chimique

Les transports, les industries chimiques, les raffineries, la combustion d'énergies fossiles riches en soufre, libèrent dans l'atmosphère des quantités importantes d'oxydes d'azote (NO_x) ou de dioxyde de soufre (SO_2). Ces gaz contribuent à la formation par photolyse de dérivés réactifs de l'oxygène (appelés ROS pour « Reactive Oxygen Species ») comme l'ozone (O_3), les radicaux nitrate (NO_3) ou hydroxyl (OH).

Ces polluants affectent la photosynthèse, la fixation du carbone et des éléments nutritifs du sol. La pollution de l'air peut également altérer les habitats, notamment en acidifiant les sols (pluies acides). Les concentrations importantes de gaz phytotoxiques (SO_2 , NO_2 , O_3) des grandes métropoles, affectent le rendement des plantes cultivées dans les zones agricoles périurbaines. Des expositions aiguës à des pics de pollution souvent couplées à des phases de canicules provoquent des réponses de stress chez les plantes dont elles se protègent en modifiant leurs émissions de BVOCs. Chez l'homme, la pollution de l'air est responsable de graves atteintes aux systèmes respiratoire et cardiovasculaire, aussi un nombre croissant d'études s'intéressent aux dysfonctionnements du système olfactif provoqués par la pollution.

► Il est vraisemblable que la faune sauvage soit également vulnérable vis-à-vis de ces atteintes à sa santé, ou victime de troubles plus spécifiques des comportements olfactifs, mais les données font défaut.

En outre, les ROS émis depuis les zones urbanisées ou industrialisées sont rapidement transportés dans les zones moins anthropisées où ils interagissent avec les BVOCs naturels pour former une grande diversité de dérivés oxygénés très réactifs et ainsi contribuer à des pics d'ozone en été dans des zones peu anthropisées. L'augmentation croissante des concentrations de ROS dans l'atmosphère diminue fortement la durée de vie des BVOCs, et donc la distance à laquelle ils peuvent être détectés. L'arôme initial d'une fleur peut se trouver rapidement modifié en présence de ROS. Des essais sur l'abeille confirment la perte de reconnaissance d'un mélange de terpènes à la suite de la disparition de certains de ses constituants. Enfin, les produits de réaction des BVOCs avec les ROS peuvent à leur tour réagir pour former une diversité de dérivés volatils dont l'activité biologique est mal connue.

Un appauvrissement global des paysages olfactifs

L'homme modifie également indirectement les paysages odorants par son action globale sur l'occupation du sol et les milieux naturels. La monoculture sur de grands espaces, la déforestation, l'introduction de plantes exotiques modifient la composition floristique des paysages, souvent en les appauvrissant. Bien que cet aspect n'ait pas été évalué, ce fort remaniement de communautés végétales sources de BVOCs induit nécessairement des modifications profondes des paysages odorants. La simplification des paysages olfactifs pourrait ainsi contribuer à la vulnérabilité des plantes cultivées dans les systèmes de production intensive car les insectes se nourrissant des plantes cultivées trouvent plus facilement leurs plantes-

📍 Les antennes des insectes sont leur principal organe de l'olfaction. Elles leur permettent de communiquer entre eux ou de trouver une source de nourriture. Chez les Coléoptères longicornes comme ce Lepture fauve (*Stictoleptura fulva*, famille des *Cerambycidae*), elles sont particulièrement longues, dépassant souvent la longueur du corps.



© M. Renou - INRAE

hôtes dans ces environnements sensoriels très simplifiés que lorsque les odeurs de plusieurs espèces végétales se mêlent. Enfin, le changement climatique affecte indirectement les paysages odorants notamment parce que les plantes ajustent leur métabolisme et leurs voies de biosynthèse des BVOCs en réaction aux variations du climat. Il est cependant difficile de mesurer ces changements au niveau des paysages, car toutes les plantes ne réagissent pas de la même façon et les effets conjoints des différents facteurs ne sont pas linéaires.

Quels impacts sur le comportement des organismes et le fonctionnement des écosystèmes ?

Il est tentant de considérer que la perte des signaux olfactifs n'est qu'un effet collatéral, moins impactant que la disparition d'un habitat ou la contamination par des substances toxiques. Or, ce point de vue est trop anthropocentré, la majorité des animaux utilisant le sens de l'olfaction pour s'alimenter, échapper aux prédateurs ou trouver un partenaire (photo 📍). La perturbation des paysages olfactifs agit ainsi à travers plusieurs mécanismes.

La pollution perturbe le développement et le fonctionnement du système olfactif

Si l'impact de la pollution de l'air sur l'olfaction chez l'homme est devenu un thème majeur de recherche, la connaissance est très limitée pour les autres animaux. Quelques travaux concernent l'abeille domestique ou d'autres *Apidae* pollinisateurs. Par exemple, une réduction des performances dans des procédures d'apprentissage olfactif après une exposition à des émanations de combustion de fuel a été observée au laboratoire chez l'abeille domestique. Aussi, une exposition à des stades sensibles du développement des organismes peut-elle affecter l'ontogenèse du système olfactif. Le système olfactif est généralement très plastique et les effets de la pollution olfactive sur l'expression des gènes de l'olfaction ont été observés en laboratoire chez les rongeurs. Les conditionnements olfactifs sont très efficaces et les animaux répondent différemment aux stimuli auxquels ils ont été pré-exposés. Ces modifications comportementales s'accompagnent de remaniements au sein du système nerveux de rongeurs ou d'insectes. Ces résultats ayant été obtenus au laboratoire, il est difficile d'extrapoler aux conditions naturelles où les expositions sont très variables en intensité et en durée, mais cela reste une hypothèse plausible.

Un bruit de fond olfactif qui masque des signaux olfactifs naturels

On parle de « masquage » lorsque l'intensité du facteur polluant couvre le signal olfactif naturel et empêche sa détection. Dans la nature, les insectes sont naturellement exposés à des environnements odorants où phéromones et odeurs environnementales se mélangent. La spécificité de leurs récepteurs olfactifs, couplée à un codage neuronal efficace, leur permet d'extraire les informations utiles dans ces conditions difficiles. Cependant, les différentes activités humaines industrielles et agricoles peuvent augmenter de manière importante la concentration de certains VOCs (AVOCs et BVOCs) créant alors un « bruit de fond olfactif » trop prégnant. Ainsi, l'acide humique, un

constituant naturellement présent dans les écosystèmes d'eau douce résultant de la dégradation de la matière organique, voit ses concentrations fortement augmenter dans les rivières qui reçoivent des eaux usées non traitées et des déchets agricoles. Les femelles du poisson *Xiphophorus birchmanni* sont beaucoup moins sélectives vis-à-vis des odeurs de leurs mâles dans l'eau de rivières polluées où les concentrations en acide humique peuvent atteindre 200 mg/l.

Tromper et égarer

Il y a confusion quand l'organisme répond aux émissions d'AVOCs comme il le ferait à un signal écologiquement pertinent dans son milieu et présente alors une réponse mal adaptée. Ce phénomène est délibérément utilisé dans les stratégies dites de « confusion sexuelle » pour lesquelles on a recours à des diffuseurs de phéromones de synthèse qui génèrent et entretiennent de fortes concentrations de phéromones au sein des cultures à protéger, afin d'éloigner les papillons ou des mouches qui s'en nourrissent. Les mâles volent ainsi en suivant de fausses pistes et ne parviennent plus à localiser les femelles pour les féconder. Ainsi, on peut aisément concevoir que de fortes concentrations de polluants olfactifs puissent tromper et égarer des organismes à la recherche de nourriture ou de partenaires sexuels, ou saturer leur système olfactif qui répondrait alors beaucoup moins bien aux stimuli naturels.

Odeurs et stress physiologiques

Les stimuli olfactifs sont bien connus pour leurs capacités à interagir avec les circuits de l'émotion et le système de récompense. Ces effets sur l'humeur ou le stress peuvent en retour affecter la valeur sélective de l'individu en interagissant avec de nombreuses fonctions physiologiques et le système endocrine. Chez les animaux d'élevage, une grande attention a été portée à l'identification de phéromones d'apaisement pour atténuer les effets négatifs du confinement et abaisser l'agressivité. Chez l'homme, la présentation d'odeurs associées à des stimuli caractéristiques d'un environnement naturel (photo d'une forêt + chant d'oiseau + odeur d'herbe) réduit significativement le stress. Même si les circuits de l'émotion n'existent vraisemblablement que chez les vertébrés, les odeurs associées de manière innée à des signaux de danger provoquent des réponses physiologiques coûteuses et une réallocation des ressources chez les arthropodes (phéromone d'alarme) ou même les plantes (signaux de stress). L'exposition prolongée à des environnements olfactivement dégradés pourrait donc s'avérer très perturbante pour les organismes qui les peuplent. On peut citer à ce propos la perception par le gibier d'odeurs humaines et canines particulièrement fortes lors des périodes de chasse et sources de stress intense.

Intervenir sur et pour les paysages olfactifs dans le cadre des politiques de conservation ?

Améliorer notre connaissance des paysages olfactifs

Une protection des paysages olfactifs naturels nécessiterait tout d'abord de mieux les connaître. Nous connaissons les émissions volatiles d'un nombre non négligeable d'espèces de végétaux supérieurs. Une typologie des pay-

sages odorants pourrait alors être créée en se basant sur la composition des communautés d'espèces composant les milieux naturels. Pour cela, l'occupation du sol et la classification des formations végétales telles que répertoriées dans le référentiel national des habitats naturels (HABREF) de l'inventaire national du patrimoine naturel (INPN) pourraient être utilisées. La contribution des microorganismes présents dans les sols et les litières devrait aussi être prise en compte. Le savoir-faire existe pour mesurer ensuite les émissions de BVOCs au-dessus des formations végétales (prairies, forêts, champs cultivés, etc.).

Par ailleurs, à ce jour, nous ne disposons pas d'outil permettant d'évaluer la « qualité » d'un paysage odorant. Une meilleure évaluation des pollutions olfactives et des risques associés permettrait d'établir des cartes de risques à l'échelle d'un territoire donné. De telles cartes ont été produites pour la cité de New York au dix-neuvième siècle, décrivant les cônes de vents en aval des industries productrices de nuisances olfactives.

Limiter les émissions de composés organiques volatils

Éviter/limiter les pollutions par des techniques de traitement des effluents est possible. Les normes existent vis-à-vis des COVs et des solvants. Réduire les émissions des AVOCs est en convergence avec les objectifs de santé humaine et de protection de l'environnement mais les seuils des effets sensoriels étant généralement plus bas (< ppb) que les seuils de toxicité physiologique, on peut se demander si les normes existantes sont suffisantes. Les mesures d'impact sont nécessaires dans et autour des zones à protéger car les odeurs « voyagent » au gré des vents et de la topographie des paysages.

Désodoriser les émissions est souvent coûteux. En revanche, diminuer l'exposition des zones à protéger peut se faire par l'aménagement du paysage. Les haies brise-vents contribuent à limiter les fortes concentrations de COV (autour des bâtiments d'élevage intensif en particulier) en détournant les vents vers les couches plus hautes de l'atmosphère. On ne connaît pas l'impact des murs anti-bruit ou des tranchées sur le transfert des polluants vers les espaces « naturels » traversés par de grandes voies de circulation. En revanche, le masquage des odeurs désagréables par nébulisation d'odeurs masquantes paraît inadapté à la conservation tant que l'on n'en connaît pas les effets sensoriels sur la faune et la flore sauvages.

Les odeurs comme outil de génie écologique

En protection des cultures, les odeurs font partie des techniques de contrôle biologique des arthropodes se nourrissant sur les plantes cultivées. La confusion sexuelle par application de phéromones de synthèse dans les champs ou les vergers empêche la reproduction des insectes que l'on cherche à éloigner des cultures (ex. : mouches des fruits). Des répulsifs basés sur les odeurs de leurs prédateurs ont aussi été testés pour dissuader les cervidés d'attaquer les plantations de jeunes arbres. La stratégie « push and pull » permet d'éloigner les herbivores de cultures à protéger pour les cantonner sur des plantes « pièges » moins sensibles à leurs attaques. L'usage d'attractifs ou de répulsifs permet ainsi de contrôler une espèce donnée avec un faible risque d'impact sur les espèces non cibles.

► Cette manipulation des odeurs pourrait être appliquée à la biologie de la conservation, dans les écosystèmes naturels, bien qu'elle puisse soulever des questions éthiques par son caractère « interventionniste ». Elle pourrait potentiellement servir à favoriser la reproduction d'une espèce protégée ou à limiter la colonisation par des espèces exotiques envahissantes en les dirigeant vers des endroits ciblés. Planter des espèces en fonction de leur intérêt sensoriel dans les espaces naturels à vocation récréative pourrait aussi être envisagé pour entretenir le paysage odorant dans les milieux dégradés (ex. : en ville). Mais la prudence est de rigueur en la matière pour éviter l'introduction de plantes invasives ou des plantes « pièges », très attractives pour les insectes mais au final peu nutritives (exemple du buddléia). Enfin, des odeurs peuvent être manipulées pour guider la faune vers les ouvrages de franchissement sécurisé destinés à diminuer le risque de collision avec les véhicules. C'est ainsi qu'au Québec, les passages inférieurs pour la grande faune sont parfois « rendus attractifs » par dépôt de crottes de l'espèce dont on souhaite favoriser la traversée (élasts en l'occurrence). À l'inverse, des odeurs « répulsives » peuvent être disséminées aux abords des routes non sécurisées pour en éloigner la faune sauvage.

Identifier et préserver une « trame olfactive »

En 2007, la France impulsait la politique publique Trame verte et bleue destinée à limiter la perte et la fragmentation des habitats provoquées par les activités humaines. Les motivations visaient essentiellement les éléments « physiques » du paysage, tels que les infrastructures de transport, l'imperméabilisation du sol, les barrages hydrauliques. Depuis, l'amélioration des connaissances scientifiques a permis d'élargir cette notion de trame à des sources immatérielles de fragmentation. Ainsi, la dégradation des habitats nocturnes et l'effet barrière causés par la lumière artificielle ont motivé l'émergence d'une trame noire en plein développement actuellement en France. La pollution sonore peut également

générer une fragmentation entre populations en masquant la communication acoustique et en perturbant les déplacements, ce qui fait naître depuis peu la nécessité d'une trame blanche formée de continuités écologiques silencieuses. En revanche, la dégradation des paysages olfactifs a été pratiquement oubliée, hormis lorsqu'elle impacte notre odorat en milieu urbain. Les risques de perturbation du fonctionnement des écosystèmes liés à la pollution atmosphérique ou aux émissions de VOCs sont pourtant bien documentés. Cet article souligne l'importance des repères olfactifs pour les animaux à l'échelle du paysage et en corollaire l'impact des odeurs anthropiques sur ces paysages odorants. La nécessité d'une trame dépourvue d'odeurs anthropiques prend alors tout son sens, afin de préserver l'intégrité des odeurs écologiquement importantes dans des espaces contigus. Le chantier est vaste et nous encourageons à approfondir ces réflexions, pour envisager l'identification, la préservation et la restauration d'une trame olfactive et plus largement pour mieux prendre en compte les paysages olfactifs dans la protection de la biodiversité. ■

Les auteurs

Michel RENO

INRAE, Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris
route de Saint-Cyr, 78026 Versailles Cedex, France.
✉ michel.renou@inrae.fr

Romain SORDELLO

UMS 2006 Patrimoine Naturel OFB-CNRS-MNHN, Muséum national d'Histoire naturelle, CBNBP, 61 rue Buffon, CP 53, 75005 Paris, France.
✉ romain.sordello@mnhn.fr

Yorick REYJOL

UMS 2006 Patrimoine Naturel OFB-CNRS-MNHN, Muséum national d'Histoire naturelle, CBNBP, 61 rue Buffon, CP 53, 75005 Paris, France.
✉ yorick.reyjol@mnhn.fr

EN SAVOIR PLUS...

Sur la nature des paysages olfactifs

📖 CONCHOU, L., LUCAS, P., MESLIN, C., PROFFIT, M., STAUDT, M., RENO, M., 2019, Insect Odorscapes: From Plant Volatiles to Natural Olfactory Scenes, *Frontiers in Physiology*, vol. 10, art. 972, <https://dx.doi.org/10.3389/fphys.2019.00972>

Sur l'importance de la pollution sensorielle en général

📖 DOMINONI, D.M., HALFWERK, W., BAIRD, E., BUXTON, R.T., FERNÁNDEZ-JURICIC, E., FRISTRUP, K.M., MCKENNA, M.F., MENNITT, D.J., PERKIN, E.K., SEYMOUR, B.M., STONER, D.C., TENNESSEN, J.B., TOTH, C.A., TYRRELL, L.P., WILSON, A., FRANCIS, C.D., CARTER, N.H., BARBER, J.R., 2020, Why conservation biology can benefit from sensory ecology, *Nature Ecology & Evolution*, vol. 4(4): p. 502-511, <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1135-4>

Sur la dégradation des arômes floraux par les polluants

📖 JÜRGENS, A., BISCHOFF, M., 2017, Changing odour landscapes: the effect of anthropogenic volatile pollutants on plant-pollinator olfactory communication, *Functional Ecology*, vol. 31, p. 56-64., <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12774>

📖 FUENTES, J.D., CHAMECKI, M., ROULSTON, T.H., CHEN, B., PRATT, K.R., 2016, Air pollutants degrade floral scents and increase insect foraging times, *Atmospheric Environment*, vol. 214, p. 361-374, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.07.002>

Sur les cartes olfactives et la typologie des odorscapes : un exemple d'aménagement du territoire en urbanisme

📖 HENSHAW, V., 2013, Urban Smellscape - Understanding and Designing City Smell Environments, Taylor & Francis, New-York, 272 p., <https://doi.org/10.4324/9780203072776>

Sur la manipulation des odorscapes : un exemple appliqué et réussi, les stratégies push pull en protection des cultures

📖 COOK, S.M., KHAN, Z.R., PICKETT, J.A., 2007, The Use of Push-Pull Strategies in Integrated Pest Management, *Annual Review of Entomology*, vol. 52:1, p. 375-400, <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.52.110405.091407>

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES COMPLÉMENTAIRES

La pollution sensorielle : un impact important sur la faune

HALFWERK, W., SLABBEKOORN, H., 2015, Pollution going multimodal: the complex impact of the human-altered sensory environment on animal perception and performance, *Biology Letters*, vol. 11, n° 4, <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.1051>

La pollution atmosphérique menace les réseaux de pollinisation

GIRLING, R.D., LUSEBRINK, I., FARTHING, E., NEWMAN, T.A., POPPY, G.M., 2013, Diesel exhaust rapidly degrades floral odours used by honeybees, *Scientific Reports*, 3(1), art. 2779, <https://doi.org/10.1038/srep02779>

JÜRGENS, A., BISCHOFF, M., 2017, Changing odour landscapes: the effect of anthropogenic volatile pollutants on plant–pollinator olfactory communication, *Functional Ecology*, vol. 31, n° 1, p. 56-64, <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12774>

LEONARD, R.J., PETTIT, T.J., IRGA, P., MCARTHUR, C., HOCHULI, D.F., 2019, Acute exposure to urban air pollution impairs olfactory learning and memory in honeybees, *Ecotoxicology*, 28(9), p. 1056-1062, <https://doi.org/10.1007/s10646-019-02081-7>

MCFREDERICK, Q.S., KATHILANKAL, J.C., FUENTES, J.D., 2008, Air pollution modifies floral scent trails, *Atmospheric Environment*, vol. 42, n° 10, p. 2336-2348, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.12.033>

La pollution chimique affecte la communication dans les milieux aquatiques

FISHER, H.S., WONG, B.B.M., ROSENTHAL, G.G., 2006, Alteration of the chemical environment disrupts communication in a freshwater fish, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 273, n° 1591, p. 1187-1193, <https://doi.org/10.1098/rspb.2005.3406>

Une manipulation réussie des paysages odorants : la confusion sexuelle en verger

WITZGALL, P., STELINSKI, L., LARRY GUT, L., THOMSON, D., 2008, Codling Moth Management and Chemical Ecology, *Annual Review of Entomology*, vol. 53, p. 503-522, <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.53.103106.093323>

Le suivi de la composition des paysages odorants : un outil pour le bilan santé des écosystèmes

JANSEN, R.M.C., WILDT, J., KAPPERS, I.F., BOUWMEESTER, H.J., HOFSTEE, J.W., VAN HENTEN, E.J., 2011, Detection of Diseased Plants by Analysis of Volatile Organic Compound Emission, *Annual Review of Phytopathology*, vol. 49(1), p. 157-174, <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095227>

KELSEY, R.G., GALLEGRO, D., SÁNCHEZ-GARCÍA, F.J., PAJARES, J.A., 2014, Ethanol accumulation during severe drought may signal tree vulnerability to detection and attack by bark beetles, *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 44(6), p. 554-561, <https://doi.org/10.1139/cjfr-2013-0428>

Décrire la complexité des paysages odorants et la richesse des interactions qu'ils supportent

SCHALLHART, S., RANTALA, P., NEMITZ, E., TAIPALE, D., TILLMANN, R., MENDEL, T.F., LOUBET, B., GEROSA, G., FINCO, A., RINNE, J., RUUSKANEN, T.M., 2016, Characterization of total ecosystem-scale biogenic VOC exchange at a Mediterranean oak–hornbeam forest, *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, p. 7171-7194, <https://doi.org/10.5194/acp-16-7171-2016>

VIVALDO, G., MASI, E., TAITI, C., CALDARELLI, G., MANCUSO, S., 2017, The network of plant volatile organic compounds, *Scientific Reports*, 7, Art. 11050, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10975-x>