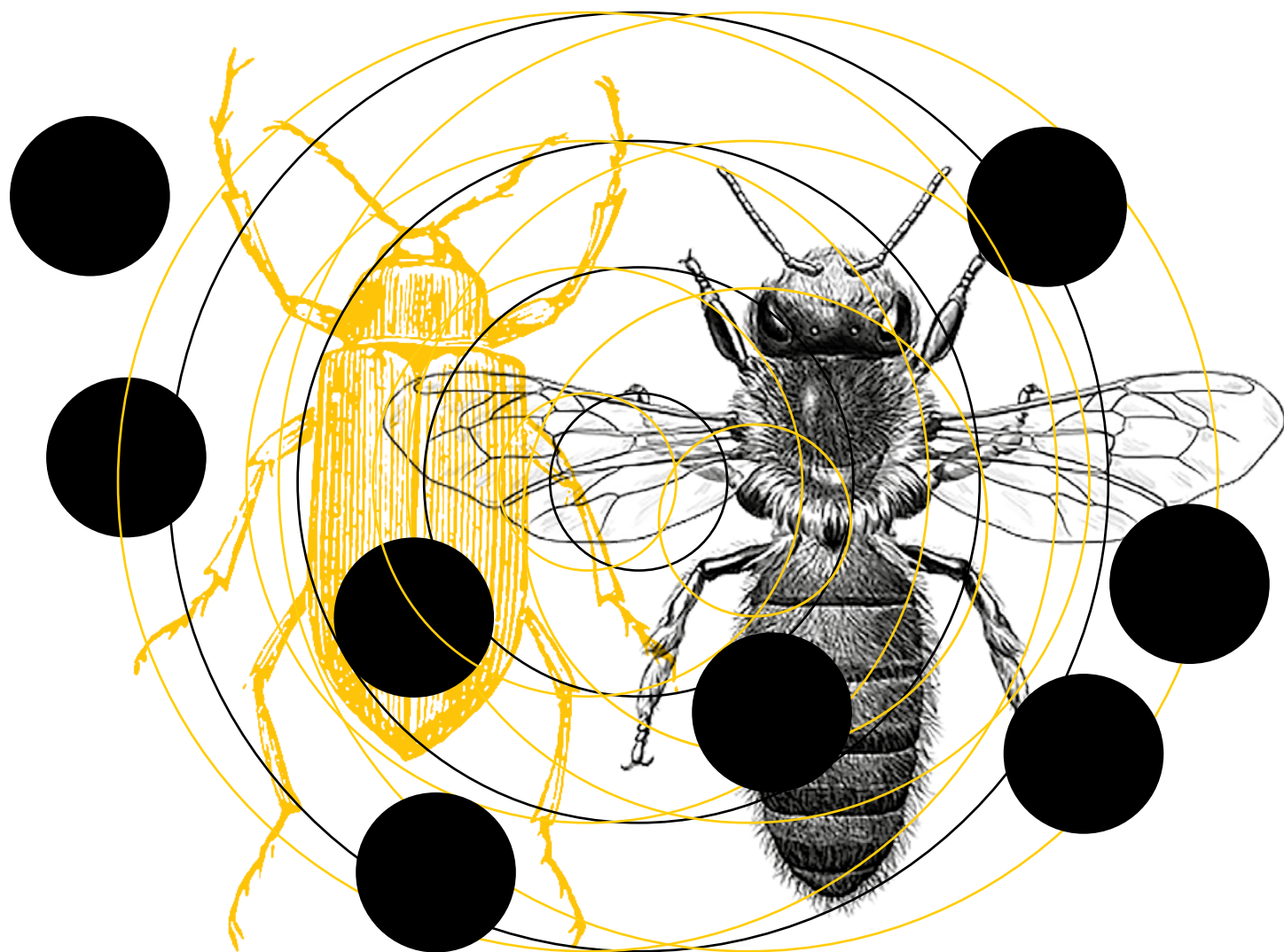


POLLINIS

ONG INDÉPENDANTE ET SANS BUT LUCRATIF QUI AGIT EXCLUSIVEMENT GRÂCE AUX DONS DES CITOYENS POUR LA PROTECTION DES ABEILLES DOMESTIQUES ET SAUVAGES, ET UNE AGRICULTURE RESPECTUEUSE DE TOUS LES POLLINISATEURS.



PESTICIDES GÉNÉTIQUES ARNi

**Les pollinisateurs, victimes collatérales
des nouveaux produits de l'agrochimie**



INTRODUCTION

Pendant longtemps, l'Europe s'est tenue à l'écart d'un modèle agricole reposant sur les organismes génétiquement modifiés (OGM). Mais les promesses d'une nouvelle génération d'organismes et de produits génétiquement modifiés à l'aide de techniques plus précises, plus contrôlables et moins coûteuses que la transgénèse – telles que les ciseaux génétiques CRISPR/Cas9 – ont récemment poussé les institutions européennes à entamer une révision à marche forcée du cadre réglementaire, afin de permettre le déploiement de certaines de ces nouvelles techniques de modification génétique (NTMG) dans les champs européens.

Parmi les nombreuses découvertes issues des avancées en matière de génie génétique, la compréhension des mécanismes de régulation des gènes (interférence par ARN) a été le moteur du développement d'un nouveau type de pesticides capable d'agir sur l'expression génétique des insectes.

À l'image des pesticides chimiques, ces pesticides génétiques ciblent les mécanismes vitaux des insectes ravageurs des cultures, tels que la noctuelle de la tomate, le puceron ou la pyrale du maïs. Diffusés par le biais de sprays, de plantes OGM ou de micro-organismes (bactéries, virus, champignons), ces pesticides pourraient avoir, comme leur déclinaison chimique, des effets dévastateurs pour les insectes non-ciblés. Et notamment pour les insectes pollinisateurs, chaînons indispensables de la biodiversité et garants de notre sécurité alimentaire¹. Malgré ces risques, les firmes de l'agrochimie ont entamé un lobbying intense pour faire passer ces pesticides pour des solutions durables, voire indispensables à la transition agroécologique et à la réduction des pesticides chimiques.

Ce rapport propose une plongée au cœur des risques et des dangers que ces nouveaux pesticides génétiques font peser sur les insectes, en particulier sur les pollinisateurs.

À l'heure où la mise sur le marché de ces pesticides se profile en Europe, il détaille **les technologies envisagées et l'état d'avancement de leur développement** (du laboratoire aux champs) ; **leurs impacts négatifs potentiels sur les pollinisateurs** et les incertitudes réglementaires qui pourraient permettre leur commercialisation au sein de l'Union européenne. Il met aussi en évidence le manque d'études scientifiques indépendantes, de recul et de connaissances fondamentales sur les risques potentiels de ces technologies pour envisager leur utilisation en pleine nature.

¹ Laarman, 2020.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ

I. BIOTECHNOLOGIES GÉNÉTIQUES: NOUVELLES ARMES DES FIRMES DE L'AGROCHIMIE

1. DES OGM AUX PESTICIDES GÉNÉTIQUES : LES FAUSSES ALTERNATIVES AUX PESTICIDES CHIMIQUES
2. ENCADREMENT DES PESTICIDES GÉNÉTIQUES : LE DÉVOIEMENT DU BIOCONTRÔLE
3. DES PESTICIDES GÉNÉTIQUES DÉJÀ TESTÉS DANS LES CHAMPS EN EUROPE
4. LES FIRMES DE L'AGROCHIMIE ET LES START-UP DES BIOTECHNOLOGIES EN ORDRE DE BATAILLE

II. LES PESTICIDES GÉNÉTIQUES : DES RISQUES INACCEPTABLES POUR L'ENVIRONNEMENT

1. LE SILENÇAGE : LES RESSORTS D'UNE TECHNOLOGIE D'EXTINCTION DES GÈNES
2. DES PESTICIDES DIFFUSÉS PAR PLANTES OGM, SPRAYS ET MICRO-ORGANISMES
3. DES RISQUES DOCUMENTÉS POUR L'ENVIRONNEMENT
4. UNE IMPOSSIBLE ÉVALUATION DU RISQUE

III. DES EFFETS IMPRÉVUS ET DANGEREUX SUR LES POLLINISATEURS

1. HOMOLOGIE SÉQUENTIELLE, EFFET MORTEL
2. LES POLLINISATEURS EN DANGER : RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE POLLINIS
3. BLOQUER LA MUE DES PAPILLONS
4. EMPÊCHER L'ACTIVITÉ MUSCULAIRE CHEZ LES ABEILLES ET LES BOURDONS
5. L'ABEILLE MELLIFÈRE, CIBLE À HAUT-RISQUE

CONCLUSION

QUI SOMMES-NOUS

RÉFÉRENCES

ANNEXE 1 : TABLEAU RÉCAPITULATIF DES AVANCÉES RÉCENTES SUR LES PESTICIDES GÉNÉTIQUES

ANNEXE 2 : MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

ANNEXE 3 : LEXIQUE



RÉSUMÉ

L'Europe est confrontée à un déclin massif des insectes. En moins de 30 ans, plus de 75 % de la biomasse des insectes volants a disparu des zones protégées d'Allemagne², et ce déclin spectaculaire touche directement les insectes pollinisateurs : une espèce d'abeilles et de papillons sur dix est en voie d'extinction en Europe, et un tiers des espèces d'abeilles, de papillons et de syrphes du continent voient leur population décliner³.

Cette extinction massive découle en grande partie de l'usage intensif de pesticides chimiques sur lequel repose l'agriculture industrielle⁴. Tandis que les plans de transitions agroécologiques peinent à se concrétiser en France et en Europe, systématiquement freinés par les lobbys agro-industriels, les firmes de l'agrochimie développent aujourd'hui des pesticides d'un nouveau genre : les **pesticides génétiques ou pesticides à ARN interférents (ARNi)**. Issus des avancées récentes en matière de génie génétique, ils neutralisent l'expression de gènes vitaux chez les insectes ravageurs pour les éliminer.

Présentés par leurs fabricants comme des solutions durables, précises et fiables, au service de la transition agroécologique, ces pesticides génétiques diffusés par le biais de sprays, de plantes OGM ou de micro-organismes (bactéries, virus, champignons) opèrent en réalité selon la même logique indifférenciée que les insecticides issus de la chimie de synthèse : en éliminant les insectes jugés indésirables pour l'activité agricole, **ils détruiront potentiellement un large spectre d'insectes non-ciblés dont, notamment, les insectes pollinisateurs, chaînons indispensables de la biodiversité et garants de notre sécurité alimentaire.**

En menant une analyse bio-informatique comparative entre les séquences génétiques ciblées par 26 produits ARNi avec les séquences génétiques de centaines d'espèces d'insectes pollinisateurs référencées dans la base de données génétiques BLAST, ce rapport met en évidence que **plus de la moitié de ces produits pourraient avoir des effets mortels sur 136 espèces de pollinisateurs différents**, parmi lesquels l'abeille mellifère européenne (*Apis mellifera*), le bourdon des prés (*Bombus pratorum*) ou encore le papillon Belle-Dame (*Vanessa cardui*), dont certains gènes présentent de fortes similitudes avec ceux des espèces cibles.

Malgré les risques importants que ces nouveaux pesticides génétiques font peser sur les pollinisateurs, malgré le manque de recul et de connaissances fondamentales sur les effets de ces technologies pour envisager leur utilisation en pleine nature, les multinationales de l'agrochimie et de nouvelles firmes spécialisées dans les biotechnologies agricoles ont d'ores et déjà commencé à préparer la mise sur le marché de ces pesticides génétiques en Europe. Ainsi, dans plusieurs pays d'Europe – dont la France – **plusieurs tests en plein**

² Hallmann *et al.*, 2017.

³ Nieto *et al.*, 2014.

⁴ Leenhardt *et al.*, 2022.

champ de pesticides génétiques ont été réalisés, sur des cultures de colza et de pommes de terre notamment.

Afin de s'assurer des conditions favorables d'une mise sur le marché, plusieurs firmes participent actuellement à l'élaboration d'un nouveau schéma d'évaluation du risque dans le cadre d'un appel d'offres européen, visant à développer une procédure plus flexible pour les pesticides **considérés comme « à faible risque »**, catégorie dans laquelle les pesticides ARNi ont été inscrits sans aucune preuve de leur moindre dangerosité.

En dépit des risques déjà documentés par la science indépendante, des mises en garde effectuées par plusieurs agences telles que l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) ou l'OCDE sur la nécessité d'évaluer les risques de ces substances, **les pesticides ARNi pourraient être utilisés dans les champs européens dans un futur proche**. Face à ces risques et sur la base des résultats de son étude, POLLINIS demande :

- L'exclusion explicite des pesticides ARNi de la définition des produits de biocontrôle, tels que définis dans le règlement sur l'utilisation durable des pesticides (SUR) ;
- Une évaluation des risques drastique et rigoureuse des pesticides ARNi par une agence indépendante, et la stricte application du principe de précaution, pour confiner la recherche scientifique aux laboratoires et protéger l'environnement et les pollinisateurs ;
- La suspension immédiate de tous les essais en plein champ pratiqués en Europe, jusqu'à la mise en œuvre de cette évaluation.



I. BIOTECHNOLOGIES GÉNÉTIQUES : NOUVELLES ARMES DES FIRMES DE L'AGROCHIMIE

1. DES OGM AUX PESTICIDES GÉNÉTIQUES : LES FAUSSES ALTERNATIVES AUX PESTICIDES CHIMIQUES

Développées dans les années 1970, les premières générations d'OGM ont été créées grâce à la technique de la transgénèse, qui consiste à insérer – en laboratoire – une construction contenant un gène étranger dans le génome d'un organisme, afin d'en améliorer les caractéristiques (résistance, rendements...). Les applications agricoles de ces techniques ont été particulièrement restreintes en Europe, en raison d'une opposition massive des citoyens. Ainsi, un seul OGM est aujourd'hui autorisé en culture commerciale au sein de l'Union européenne : le maïs MON810 de Monsanto, cultivé sur quelques hectares seulement en Espagne et au Portugal⁵.

Présentées comme des solutions durables permettant de nourrir la planète, **les plantes OGM traditionnelles ont en réalité décuplé l'usage de pesticides**⁶. Elles cèdent maintenant le pas à une nouvelle génération d'organismes, de produits et/ou de composants issus de techniques plus récentes, moins invasives et moins coûteuses, développées dans la foulée de l'invention des ciseaux génétiques CRISPR/Cas9, qui permettent d'éditer le génome de manière plus ciblée⁷.

Une autre avancée fondamentale dans le domaine de la médecine a également ouvert la voie à la **révolution génétique en cours : celle de l'interférence par ARN** (acide ribonucléique). Découverts dans les années 1990, les rouages de l'ARN interférent (ARNi) ont été décryptés par deux chercheurs américains, Andrew Fire et Craig Mello, dont les travaux, publiés en 1998, furent récompensés huit ans plus tard par le prix Nobel de médecine et de physiologie⁸. Processus cellulaire naturel chez les champignons, les plantes, les animaux et les humains, l'ARNi a pour fonction de perturber ou de rendre silencieuse la production d'une protéine spécifique, ce qui entraîne une modification de l'activité cellulaire. Il joue par exemple un rôle crucial dans la défense des organismes face aux virus, en dégradant les cellules infectées et évitant ainsi la contamination à l'ensemble de l'organisme.

La compréhension et l'utilisation de l'ARN interférent a déjà trouvé de nombreuses applications dans le domaine de la recherche et de la santé. Elle a aussi éveillé très tôt l'appétit des géants de l'agro-industrie, qui ont investi massivement dans la recherche et le développement de nouveaux pesticides utilisant le mécanisme de l'interférence par ARN, les présentant comme des alternatives aux pesticides chimiques respectueuses de l'environnement, et nécessaires à la sécurité alimentaire.

Un discours séduisant à l'heure où l'Europe est confrontée à un effondrement sans précédent des populations d'insectes – plus de 75 % de la biomasse des insectes volants a, notamment, déjà disparu des zones naturelles protégées

⁵ L'info Durable, 2023.

⁶ Benbrook, 2016.

⁷ Alexis Verger, 2021.

⁸ Harel-Bellan, 2006.

d'Allemagne en 30 ans⁹ –, et que la réduction drastique des pesticides chimiques utilisés pour la production agricole, les principaux responsables de cet effondrement, fait partie des chantiers politiques prioritaires de l'Union européenne. Cet objectif fait aussi consensus au niveau international, puisque le nouveau cadre mondial pour la biodiversité adopté lors de la COP 15 en décembre 2022 prévoit une réduction de moitié au moins du risque global lié aux pesticides et aux produits chimiques hautement dangereux¹⁰.

Face aux séduisantes promesses de cette nouvelle classe de pesticides génétiques, supposément débarrassés des conséquences délétères de la chimie de synthèse sur les écosystèmes, la mise en place d'un cadre réglementaire au niveau européen fait déjà l'objet d'une offensive organisée de la part des firmes de l'agrochimie, qui oeuvrent en faveur d'une évaluation des risques peu contraignante.

LE DÉCLIN DES POLLINISATEURS, RISQUE MAJEUR POUR LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

Le déclin spectaculaire des insectes pollinisateurs aura de graves conséquences sur la sécurité alimentaire. Dans l'Union européenne, environ 84 % des espèces cultivées et 78 % des espèces de fleurs sauvages dépendent, au moins en partie, de la pollinisation par les animaux¹¹. La contribution des insectes pollinisateurs à la production agricole européenne s'élève à environ 15 milliards d'euros par an, selon un rapport de 2020 de la Commission européenne¹².

BIOTECHNOLOGIES
GÉNÉTIQUES :
NOUVELLES ARMES
DES FIRMES DE
L'AGROCHIMIE

2. ENCADREMENT DES PESTICIDES GÉNÉTIQUES : LE DÉVOIEMENT DU BIOCONTRÔLE

Au niveau international, le nouveau Cadre Mondial de la biodiversité¹³, adopté en décembre 2022 lors de la COP15 « Biodiversité » de Montréal, constitue le seul accord international ayant pour vocation d'encadrer l'évaluation et l'utilisation des nouvelles biotechnologies génétiques dans la nature. Le compromis voté par les pays signataires de la Convention sur la diversité biologique (CBD) a cependant levé les rares garde-fous en la matière, en faisant notamment disparaître la restriction de principe à l'utilisation dans la nature des produits et composants issus de l'ingénierie génétique, comme les pesticides génétiques.

Au niveau européen, les pesticides ARNi, qui visent à modifier l'expression des gènes chez une espèce ou un organisme cible et non à modifier le patrimoine génétique comme les OGM traditionnels, **tombent hors du champ d'application des textes réglementaires encadrant les organismes génétiquement modifiés**, tels que la directive européenne sur la dissémination volontaire des OGM¹⁴.

⁹ Hallmann *et al.*, 2017.

¹⁰ CBD, 2022.

¹¹ Communication de la commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au comité des régions.

¹² CCE, 2020.

¹³ CBD, 2022.

¹⁴ Parlement européen et Conseil, directive 2001/18/CE du 12 mars 2001.



Leur mode d'action étant également très différent de celui des pesticides chimiques, il paraît hors de propos de leur appliquer les cadres réglementaires applicables aux substances actives chimiques.

Cette inadéquation a été pointée du doigt par plusieurs instances internationales, comme l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) par exemple. En 2020, le groupe de travail de l'OCDE sur les produits chimiques, les pesticides et les biotechnologies, recommandait ainsi **la mise en place de procédures d'évaluation des risques environnementaux plus robustes que celles utilisées pour les pesticides issus de la chimie de synthèse, afin notamment d'évaluer les « effets hors cible potentiellement dangereux »**¹⁵ des nouveaux pesticides génétiques. Un autre document portant sur l'évaluation des risques, établi par l'EPA en 2013, pointe lui aussi l'inadaptation d'une évaluation du risque calquée sur celle des pesticides chimiques¹⁶. Ces prises de position fermes n'ont pourtant pas empêché la Commission européenne d'affirmer récemment dans une réponse écrite à une question parlementaire que les pesticides ARNi étaient « *pleinement couverts par le règlement (CE) n° 1107/2009 concernant la mise sur le marché de produits phytopharmaceutiques* »¹⁷, et étaient donc considérés comme des pesticides classiques.

L'exécutif européen est même allé encore plus loin, en lançant récemment un projet visant à élaborer une évaluation des risques facilitant la mise sur le marché des pesticides ARNi. Ainsi, un appel d'offres¹⁸ lancé dans le cadre du programme de recherche « Horizon Europe » donne pour mission à un consortium composé d'universités, d'autorités réglementaires mais aussi de géants de l'agrochimie tels que Syngenta et Bayer, de développer un schéma d'évaluation du risque spécifique pour les pesticides considérés « à faible risque » pour la santé et l'environnement tels que les extraits de plantes, les phéromones ou encore les micro-organismes (bactéries, champignons, etc.), mais aussi les pesticides ARNi, qui ont été inclus arbitrairement dans cette liste. Un choix qui ignore qu'à l'inverse des extraits de plantes ou des phéromones, les pesticides ARNi ne sont pas le résultat de processus naturels mais bien d'une manipulation génétique forcée en laboratoire.

Interpellée par POLLINIS, la Commission européenne n'a pas souhaité livrer les détails du processus qui a permis de classer ces nouvelles substances issues du génie génétique parmi les substances naturelles du biocontrôle¹⁹. Les résultats de cet appel d'offres, attendus en 2026, pourraient permettre le déploiement en Europe des pesticides utilisant le mécanisme de l'ARN interférent via une évaluation du risque plus laxiste que celles des pesticides chimiques.

Au Parlement européen, les discussions en cours sur le règlement européen sur l'usage durable des pesticides²⁰ sont aussi le théâtre d'une offensive visant à insérer les pesticides ARNi dans le champ des alternatives à faible risque ou

¹⁵ OECD, 2023.

¹⁶ US EPA, 2013.

¹⁷ Réponse de la Commission européenne à l'eurodéputé Eric Andrieu, 3 mai 2023.

¹⁸ Cordis Europa, 2022.

¹⁹ Réponse de la Commission européenne à Pollinis, 9 novembre 2022

²⁰ European Parliament, 2023.

relevant du biocontrôle. Plusieurs amendements²¹ déposés par des eurodéputés libéraux lient ainsi les solutions issues des nouvelles techniques génomiques (dont font partie les pesticides ARNi) ou les produits à faible risque à la notion d'alternative aux pesticides chimiques.

Le classement arbitraire des pesticides génétiques comme des substances à faible risque révèle une volonté incompréhensible de la part des institutions européennes de faciliter leur mise sur le marché via une évaluation du risque allégée, alors que leurs effets réels sur l'environnement et la biodiversité restent encore très largement méconnus et les bénéfices supposés pour la transition agricole ne sont avérés par aucune étude scientifique.

3. DES PESTICIDES GÉNÉTIQUES DÉJÀ TESTÉS DANS LES CHAMPS EN EUROPE

Malgré le flou sur le cadre réglementaire et d'évaluation des risques – notamment environnementaux – applicable aux pesticides génétiques, certains de ces produits ont déjà fait l'objet de tests en plein champ dans plusieurs pays, dont la France.

LES PRODUITS ARNI TESTÉS EN PLEIN CHAMPS*



* recensés par POLLINIS dans le cadre de ce rapport, chiffre au 31 décembre 2022

En Chine, un spray visant la teigne des choux (*Plutella xylostella*)²² ainsi que deux plantes OGM, modifiées pour exprimer un ARNi à visée pesticide ciblant respectivement le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*)²³ et le puceron des céréales (*Sitobion avenae*)²⁴, ont déjà fait l'objet de tests en plein champ. Aux États-Unis, un autre spray génétique visant la teigne des crucifères développé par la startup américaine RNAiSSANCE AG, a été testé en plein champ en Géorgie et en Californie²⁵, ainsi que deux plantes OGM exprimant un ARNi à visée pesticide ciblant la chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera*), respectivement développées par Monsanto²⁶ et Corteva²⁷.

L'Europe n'a pas été épargnée par cette multiplication des tests en plein champ, sur fond d'incertitudes quant aux conditions d'octroi des autorisations. Un pesticide génétique en spray ciblant le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*) a fait l'objet de tests en juin et juillet 2019, « dans trois localisations proches de Ljubljana », selon un article scientifique publié dans la revue « *Frontiers in Plant Science* »²⁸. Cet essai en plein champ n'a fait l'objet d'aucune demande auprès de l'Agence sanitaire européenne (EFSA)²⁹. En France, une demande de test en plein champ sur du colza a été soumise à

²¹ European Parliament, 2022 amendements 367 et 423.

²² Gong *et al.*, 2013.

²³ Guo *et al.*, 2018.

²⁴ Zhao *et al.*, 2018.

²⁵ Donald Danforth Plant-Science Center.

²⁶ Reinders *et al.*, 2022.

²⁷ Anderson *et al.*, 2020.

²⁸ Petek *et al.*, 2020.

²⁹ Lettre de la Direction générale de la santé et de la sécurité alimentaire de la Commission européenne à POLLINIS, 2022.

EN FRANCE, DES ESSAIS HORS DE CONTRÔLE

En France, un représentant de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a confirmé en avril 2023 au journal « Libération » avoir enregistré « *trois déclarations (1 sur colza et 2 sur pommes de terre) de mise en place d'essais ou d'expérimentations [...] entre 2020 et 2021 sur une surface totale limitée à un demi-hectare* »³³.

Ces expérimentations ont été menées « *sous le régime de la dérogation au permis d'expérimentation* ». Une exception qui permet à certaines personnes ou laboratoires agréés par le ministère de l'Agriculture de s'affranchir de l'évaluation préalable de l'Anses pour réaliser des expérimentations en plein air de produits pesticides non autorisés.

Grâce à cette disposition dérogatoire habituellement destinée aux pesticides chimiques, les pesticides ARNI bénéficient d'un permis d'expérimentation automatique de la part de l'Anses, qui reconnaît dans un courrier adressé à POLLINIS en juin 2023 que « *les produits qui ont été expérimentés n'ont donc pas été évalués [...] et leurs compositions n'ont pas été communiquées* ». Enfin, l'Anses reconnaît n'avoir de contrôle ni sur la composition réelle des produits testés, ni sur leur dangerosité potentielle, ni sur la réalité des informations déclarées par les laboratoires ni même sur « *l'adéquation du régime déclaratif* ».

Au mépris du principe de précaution, ces dispositions dérogatoires exemptent ainsi de tout contrôle sanitaire ou environnemental ces essais en plein champ.

4. LES FIRMES DE L'AGROCHIMIE ET LES START-UP DES BIOTECHNOLOGIES EN ORDRE DE BATAILLE

Le marché des pesticides génétiques destinés à la production agricole intéresse l'ensemble des firmes de l'agrochimie, à l'instar de Bayer-Monsanto, Corteva ou Syngenta-ChemChina, qui financent et développent des études et des produits dédiés.

Parmi les firmes historiques de l'agrochimie, c'est Monsanto (rachetée par Bayer en 2018) qui a développé la première plante contenant un ARNi à avoir été approuvée par l'EPA, en 2015, le maïs MON 87411³⁴ – tolérant au glyphosate et ciblant la chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera*). Cinq ans plus tard, en 2022, Bayer annonçait la sortie d'un autre maïs ARNi visant ce ravageur, sous le nom de *SmartStax® PRO with RNAi Technology*³⁵, qui a fait l'objet de 34 essais au champ en 2021 dans la ceinture de maïs américaine.

Corteva Agriscience s'est elle aussi penchée sur ce ravageur avec son maïs DP23211, qui a été autorisé en 2021 en Colombie pour l'alimentation du bétail, et en 2022 en Australie et en Nouvelle-Zélande pour l'alimentation humaine³⁶. Syngenta, filiale de ChemChina, s'est de son côté intéressée à l'interférence ARN pour cibler des gènes chez le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*, essais au champ), la chrysomèle du maïs (*Diabrotica virgifera*) et différentes espèces de punaise (les deux ont fait l'objet de tests en laboratoire)³⁷.

³³ Schaub, 2023.

³⁴ US-EPA, 2015.

³⁵ Bayer, 2021.

³⁶ OECD, 2021.

³⁷ Bramlett et al., 2020.

À leurs côtés se développent de nouvelles entreprises qui se consacrent exclusivement au développement de produits ARNi, en premier lieu desquelles figure l'entreprise américaine GreenLight Biosciences.

Créée en 2008 à Medford (Massachusetts) et cotée depuis 2021 au Nasdaq, le deuxième marché d'actions des États-Unis, GreenLight Biosciences entend commercialiser neuf produits ARNi à usage agricole d'ici 2028. Elle estime le marché potentiel pour ses produits à 8 milliards de dollars³⁸. Calantha™, son premier spray ARNi ciblant le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*), est en cours d'évaluation par l'EPA, et l'entreprise espère le voir sur le marché nord-américain avant la fin de l'année 2023³⁹.

En parallèle, GreenLight, qui a mené des tests en plein champ de ses pesticides ARNi sur le sol de plusieurs pays d'Europe, prépare aussi son entrée sur le marché européen. Le 13 septembre 2022, la firme inscrivait son vice-président principal et chargé d'affaires commerciales, Thomas Crampton, au registre des représentants d'intérêt auprès de l'Union européenne⁴⁰, au moment où la Commission européenne finalisait la première étape de sa réforme du statut réglementaire des NTMG.

Si GreenLight fait figure de fer de lance parmi les nouvelles entreprises centrées exclusivement sur la production de produits ARNi, elle n'est pas la seule à s'être emparée du sujet : les entreprises américaines AgroSpheres et Trillium Ag ont toutes deux vu le jour en 2016, et développent des pesticides en spray ciblant quatre ravageurs différents. Fondée en 2019, la société RNAiSSANCE AG déclare de son côté se concentrer sur des sprays ARNi ciblant, en premier lieu, la teigne des choux. Comme rappelé en annexe, les informations concernant le développement et la commercialisation de ces produits restent toutefois sporadiques.

³⁸ GreenLight Biosciences, 2022a.

³⁹ L'annonce de la mise sur le marché a déjà été faite en 2020, et a donc été reportée plusieurs fois depuis. FOE, 2020.

⁴⁰ EC Europa, 2022a.

LA BAISSÉ DES COÛTS DE PRODUCTION DE L'ARN INTERFÉRENT

Cet intérêt pour les pesticides génétiques s'explique aussi par la baisse drastique des coûts de production de l'ARN interférent. Michael Helmstetter, le fondateur et président de la maison-mère de RNAiSSANCE AG, Tech Accel, affirmait ainsi qu'« *un gramme d'ARN coûtait 100 000 dollars quand nous avons commencé. En 2014, c'était 100 dollars par gramme. Aujourd'hui c'est un dollar par gramme* » (The Economist, 2021)⁴¹.

GreenLight Biosciences, qui évalue ses coûts de production à moins d'un dollar par gramme d'ARN, a pour sa part opté pour la biologie acellulaire (cell-free biology) permettant, selon Andrey Zarur, co-fondateur et PDG de la firme, de simplifier drastiquement la production.

L'entreprise estime, dans une présentation aux investisseurs de novembre 2022⁴², qu'entre cinq et huit ans suffisent pour développer et commercialiser un produit ARNi, pour un coût total de développement inférieur à 30 millions de dollars – contre 286 millions de dollars pour un nouveau pesticide chimique en 2014 selon les estimations du lobby des pesticides CropLife⁴³, et 115 millions de dollars pour une nouvelle plante OGM entre 2017 et 2022⁴⁴.

Alors que quelques grammes d'ARNi suffiraient pour traiter un hectare de culture, GreenLight Biosciences déclare être en capacité d'en produire 500 kilogrammes par an dans son usine de Rochester – « *un pilote pour un établissement bien plus grand* »⁴⁵ – dont les opérations ont commencé début 2021.⁴⁶



⁴¹ The Economist, 2021.

⁴² GreenLight Biosciences, 2022b.

⁴³ McDougall, 2016.

⁴⁴ AgBioInvestor, 2022.

⁴⁵ GreenLight Biosciences, 2021a.

⁴⁶ GreenLight Biosciences, 2021b.

LOBBYING : LES REPRÉSENTANTS D'INTÉRÊT DES BIOTECHNOLOGIES AGRICOLES ARRIVENT À BRUXELLES

Les inscriptions de lobbyistes représentant les intérêts des biotechnologies agricoles se sont récemment multipliées au registre de transparence de l'UE. Outre GreenLight Biosciences, l'Organisation de l'Innovation en Biotechnologie (BIO en anglais), s'est inscrite au registre de l'UE le 25 juillet 2022 afin de s'engager, au-delà de dossiers sanitaires, « dans les discussions politiques reliées à la bioagriculture, au développement durable et à la bio-manufacture »⁴⁷, représentant les intérêts de plus de 1 100 entreprises, dont Bayer, Corteva ou encore GreenLight.

ORGANISATION (ET MEMBRES SI PERTINENT)	DATE D'INSCRIPTION AU REGISTRE DE TRANSPARENCE DE L'UE	PÉRIMÈTRE D'ACTION*
GreenLight Biosciences	13/09/2022	« GreenLight est intéressée par les propositions de loi et par les politiques relatives à l'agriculture, l'environnement, la biodiversité, l'usage durable de pesticides et les régulations de protection des cultures. Cela inclut la stratégie de la Ferme à la Fourchette ».
Biotechnology Innovation Organization (dont Bayer, Corteva Agriscience et GreenLight)	25/07/2022	Concentrée d'abord sur la santé, l'Organisation souhaiterait en outre « s'engager dans les discussions politiques pertinentes relatives à la bioagriculture, au développement durable et à la bio-manufacture ».
German Life Sciences association (ONG en faveur d'une législation différenciée pour les plantes issues des nouvelles techniques de modification génétique ⁴⁸)	15/07/2022	« Organismes génétiquement modifiés : → Nouvelles techniques de biotechnologies → Législation pour les plantes produites par certaines nouvelles techniques de modification génétique »
Wissenschaftlerkreis Grüne Gentechnik e.V (WGG) (ONG en faveur d'une législation différenciée pour les plantes issues des nouvelles techniques de modification génétique ⁴⁸)	22/06/2022	Publication de suggestions, de propositions et d'une lettre ouverte à la Commission européenne concernant la régulation des NTMG. Les autres intérêts législatifs inscrits au registre de transparence sont : « [La] Réglementation des pesticides (...) [Le] Pacte vert pour l'Europe »
European federation of Biotechnology (partenaire d'Europabio)	13/06/2022	« Nouvelles technologies génétiques : le besoin d'une révision majeure des régulations actuelles de l'UE basée sur les preuves scientifiques autour de la sécurité, de la durabilité et de la compatibilité avec les objectifs de l'UE comme ceux inscrits dans les politiques de la Ferme à la Fourchette et aux réponses au changement et au réchauffement climatiques ».

*Données issues du registre de transparence de l'Union européenne

⁴⁷ EC Europa, 2022b.

⁴⁸ VBio, 2020.

DES PESTICIDES GÉNÉTIQUES DANS LES JARDINS ET POTAGERS DOMESTIQUES ?

Outre la mise au point de pesticides à base d'ARNi destinés à l'agriculture commerciale, certaines firmes – à l'image de la start-up nord-américaine RNAiSSANCE AG – tablent sur le développement de pesticides à usage domestique. Un billet publié par le magazine Forbes⁴⁹ en 2020 pointe par ailleurs les « applications potentielles intéressantes [de l'ARNi] pour la maison et le jardin, notamment la lutte contre les termites et les fourmis », en raison de « la nature très sûre » de cette technologie. Ce billet a lui aussi été écrit par Michael Helmstetter, cofondateur et président de l'entreprise TechAccel, maison mère de RNAiSSANCE AG.

INSECTES VISÉS EN PRIORITÉ PAR LES PESTICIDES ARNI IDENTIFIÉS PAR POLLINIS ET EN COURS DE DÉVELOPPEMENT AU SEIN DES FIRMES

NOM DE L'ESPÈCE	NOMBRE DE PESTICIDES
Chrysomèle des racines du maïs (<i>Diabrotica virgifera</i>)	5
Teigne des choux (<i>Plutella xylostella</i>)	2
Tétranyque tisserand (<i>Tetranychus urticae</i>)	1
Doryphore de la pomme de terre (<i>Leptinotarsa decemlineata</i>)	1
Légionnaire d'automne (<i>Spodoptera frugiperda</i>)	3
Punaises (plusieurs espèces)	1
Coléoptère du pollen (<i>Brassicogethes aeneus</i>)	1



⁴⁹ Helmstetter, 2020.

II. LES PESTICIDES GÉNÉTIQUES : DES RISQUES INACCEPTABLES POUR L'ENVIRONNEMENT

1. LE SILENÇAGE : LES RESSORTS D'UNE TECHNOLOGIE D'EXTINCTION DES GÈNES

Le « **silencage génétique** » ou « **silencage génique** » désigne le processus modélisé en laboratoire par lequel un gène, et la fonction biologique qu'il remplit, sont rendus volontairement inactifs. Son objectif est donc de provoquer la mort de l'organisme ciblé en bloquant le produit de l'expression d'un gène indispensable à sa survie, tel que le gène de l'hormone de la mue (ecdysone), par exemple, chez certains insectes ciblés.

Le silencage génétique s'appuie entre autres sur le mécanisme de l'interférence ARN⁵⁰, processus biologique naturel par lequel les organismes vivants (plantes, animaux, etc.) peuvent notamment réduire les gènes au silence pour se prémunir contre les attaques de virus, les empêchant ainsi de se répliquer. Les ARN interférents peuvent bloquer la synthèse de protéines essentielles dans les cellules de l'organisme ciblé, ouvrant un champ de possibilités qualifié dès 2013 comme « *l'un des progrès en agriculture les plus excitants de sa carrière* » par Robb Fraley, alors directeur de recherche pour Monsanto⁵¹.

Rendu accessible par les ciseaux moléculaires CRISPR/Cas9, le silencage a d'abord été expérimenté en biotechnologie végétale pour modifier génétiquement des plantes et leur faire produire des ARNi spécifiques capables de tuer des insectes ravageurs. C'est le cas du maïs MON 87411 de Monsanto, tolérant au glyphosate et contenant un ARNi capable d'inactiver un gène essentiel de la chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera*).

Aujourd'hui, les pesticides à ARNi ne sont plus uniquement produits par des plantes génétiquement modifiées dans ce but. La technique est désormais déclinée sous d'autres formes : des sprays contenant des brins d'ARNi prêts à être vaporisés directement dans les champs, ou des molécules encapsulées dans des micro-organismes tels que des bactéries ou des virus, dont l'utilisation en plein champ pourrait transformer la nature en un vaste terrain d'expérimentation génétique.

⁵⁰ Eamens *et al.*, 2008.

⁵¹ Deluzarche, 2018.

L'INTERFÉRENCE ARN

La fabrication des protéines indispensables au bon fonctionnement des cellules nécessite l'intervention d'une molécule appelée l'ARN messenger (ARNm). Dans le noyau de la cellule, où est conservé l'ADN, l'ARNm est synthétisé par un gène qui est une copie du « *plan de fabrication* » de la protéine requise. L'ARN messenger est ensuite exporté hors du noyau de la cellule, et va transmettre ce plan de fabrication de la protéine dans le cytoplasme où se trouvent les ribosomes, ces particules universelles qui – en traduisant le plan – vont fabriquer les protéines. C'est cette transmission qui peut être interrompue par des ARN dits « interférents » (ARNi), qui vont se lier à l'ARN messenger, et entraîner sa destruction.

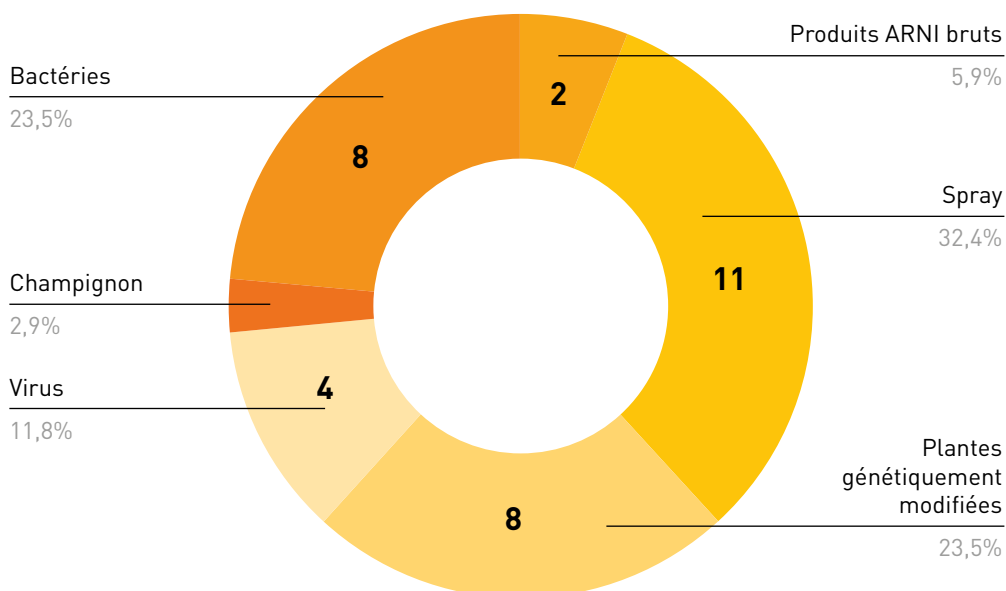
LES PESTICIDES
GÉNÉTIQUES :
DES RISQUES
INACCEPTABLES
POUR L'ENVIRONNEMENT

2. DES PESTICIDES DIFFUSÉS PAR PLANTES OGM, SPRAY ET MICRO-ORGANISMES

En agriculture conventionnelle, la lutte contre les ravageurs des cultures s'opère via l'utilisation de pesticides (insecticides, acaricides, fongicides, etc.) pouvant être appliqués par pulvérisation, épandage, enrobage de semence ou encore fumigation sur les cultures. L'ARN interférent, lui, est administré au ravageur selon trois méthodes principales. La méthode la plus aboutie est celle des **plantes génétiquement modifiées** pour transmettre l'ARN interférent par la sève, le pollen ou le nectar des fleurs. Plus récemment, le développement de **sprays, des pesticides ARNi conçus pour être pulvérisés** (effet par contact direct avec le ravageur), et de **micro-organismes** (bactéries, virus, champignons) qui transmettent l'ARNi au ravageur ciblé, a permis de compléter cet arsenal.

Parmi les pesticides génétiques identifiés par POLLINIS, deux sont encore au stade de molécule d'ARNi injectée dans les larves des ravageurs ou ingérées sous forme de nourriture. Le pesticide n'étant donc pas diffusé par un support défini, ils sont dénommés dans ce rapport « Produits ARNi bruts ».

MODES DE DIFFUSION DES PRODUITS ARNi RÉFÉRENCÉS PAR POLLINIS



→ Les plantes OGM

Les plantes génétiquement modifiées sont à ce jour le vecteur de transmission de l'ARN interférent le plus abouti⁵², avec au moins trois produits en voie de commercialisation⁵³ : le maïs MON 87411 (Bayer), le maïs DP 23211 (Corteva Agriscience) ou encore la technologie ARNi SmartStax Pro de Bayer-Monsanto. Synthétisé par la plante elle-même, et exprimé dans la sève, le nectar ou le pollen des fleurs, l'ARNi tue les insectes qui s'en nourrissent. Il peut alors s'agir d'un silençage génétique induit par l'hôte produit (HIGS, *host-induced gene silencing*, selon l'appellation anglaise adoptée par l'OCDE⁵⁴), ou d'un protecteur à ARNi incorporé dans la plante (PIP-RNAi, *plant-incorporated protectant RNAi*, en anglais).

Ce mode de diffusion permet de cibler les ravageurs présents dans les sols ou se nourrissant des racines de végétaux, comme la chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera*), visée par au moins 6 produits ARNi⁵⁵. L'exposition des organismes ravageurs des cultures à l'ARNi dépend moins dans ce cas de facteurs externes, comme les rayons ultraviolets, le pH, ou la chaleur, que les sprays.

→ Les sprays

Les pesticides en spray contenant un ARN interférent sont conçus pour être pulvérisés sur les cultures : ils touchent alors directement les organismes dont on souhaite éteindre le gène ciblé. On parle alors de silençage génétique induit par spray (SIGS, *spray-induced gene silencing*, en anglais).

L'ARNi présent dans le spray s'infiltré également dans les plantes aspergées et se répand à tous leurs niveaux cellulaires. Les insectes peuvent ainsi être touchés par contact secondaire, via la sève du végétal, le nectar ou le pollen de ses fleurs⁵⁶.

S'ils sont simples d'utilisation, la stabilité et la persistance dans l'environnement des ARNi diffusés en spray peuvent être sensiblement affectés par différents facteurs, comme les rayons ultraviolets, la chaleur ou le pH à la surface des feuilles⁵⁷ – compliquant donc la quantification de l'exposition des ravageurs aux ARN interférents. Des doutes demeurent, par ailleurs, sur l'efficacité globale de cette méthode et sur sa reproductibilité⁵⁸.

Le SIGS profite toutefois d'un flou législatif : l'application directe d'ARNi ne nécessite pas la création d'organismes génétiquement modifiés viables⁵⁹, une différence pouvant être utilisée pour échapper au cadre réglementaire des OGM.

⁵² Meunier, 2015.

⁵³ Li *et al.*, 2022, Halder *et al.*, 2022.

⁵⁴ OECD, 2023.

⁵⁵ Voir tableau en annexe.

⁵⁶ Biedenkopf *et al.*, 2020.

⁵⁷ Hoang *et al.*, 2022.

⁵⁸ Zand Karimi & Innes, 2022.

⁵⁹ Dalakouras *et al.*, 2020.

→ Les bactéries, les virus et les champignons

Le troisième mode d'administration des ARN interférents repose sur l'utilisation de **micro-organismes** génétiquement modifiés (bactéries, virus et champignons) qui, une fois répandus sur les cultures, vont affecter le ravageur. Parmi les études référencées par POLLINIS, on distingue deux modes d'action des micro-organismes sur les ravageurs :

- **Par contact direct** : les micro-organismes sont répandus par spray et transmettent l'ARN interférent directement aux ravageurs qui les ingèrent.
- **Par contact indirect** : les micro-organismes sont répandus par sprays sur les plantes qui les assimilent et transmettent indirectement l'ARN aux ravageurs. En 2013, deux chercheurs de l'Université de Californie ont ainsi montré que le virus de la mosaïque du tabac pouvait transmettre un ARN interférent à la psylle de la pomme de terre (*Bactericera cockerelli*) par le biais de plants de tomate, de tomatillo et de tabac contaminés⁶⁰.

3. DES RISQUES DOCUMENTÉS POUR L'ENVIRONNEMENT

Quel que soit son mode de diffusion, cette nouvelle génération de pesticides génétiques entraîne plusieurs effets avérés pour l'environnement : le silençage de gènes non ciblés initialement chez l'insecte dont on souhaite se débarrasser ; les effets imprévus sur des espèces non ciblées ; et la transmission incontrôlée de ces effets imprévus entre générations avec, parfois, des mutations inattendues et incontrôlables⁶¹.

→ Persistance dans l'environnement

Appliqués dans l'environnement, les pesticides génétiques peuvent persister dans l'ensemble de la plante traitée (feuilles, racines, mais aussi pollen⁶²), ce qui accentue l'exposition potentielle d'organismes et d'insectes non ciblés, en particulier des insectes pollinisateurs lorsqu'il s'agit du pollen.

La persistance des molécules ARNi dans les racines des plantes peut aussi contaminer les sols, dans lesquels se trouvent les micro-organismes⁶³, ainsi que les eaux qui seront ensuite consommées par les pollinisateurs, les oiseaux, les rongeurs et autres mammifères – dont les humains⁶⁴. Ainsi, leur application en milieu agricole pourrait exposer l'ensemble des insectes et des autres organismes qui y vivent aux effets de ces molécules.

Cette persistance dans l'environnement pourrait entraîner des effets en cascade potentiellement incontrôlables sur l'ensemble des écosystèmes, avec des conséquences potentiellement désastreuses pour la biodiversité.

⁶⁰ Wuriyangan & Falk, 2013.

⁶¹ Jackson & Linsley, 2010.

⁶² US EPA, 2013.

⁶³ Parker *et al.*, 2019.

⁶⁴ US EPA, 2013.

→ Effets hors cible sur d'autres espèces

La recherche scientifique a aussi mis en évidence des incidences imprévues inhérentes à la technique du silençage génétique. Lorsque les gènes de deux espèces différentes présentent une forte similitude, le silençage d'un gène induisant la létalité chez une espèce peut également être létal pour l'autre⁶⁵. Les gènes de certaines espèces d'insectes peuvent présenter des degrés élevés de similarité, notamment lorsqu'elles ont une origine évolutive commune. Cette homologie de séquence peut notamment exister entre les gènes de certaines espèces de pollinisateurs et ceux des insectes ravageurs ciblés par les pesticides génétiques, qui peuvent être exposés aux ARNi par de multiples canaux : par la consommation de la plante traitée (sève, pollen, nectar), via le contact avec un sol ou encore de l'eau exposés au produit⁶⁶.

Ainsi, des expériences menées sur un maïs génétiquement modifié pour s'attaquer à la vATPase A et E de la chrysomèle des racines du maïs (*Diabrotica virgifera*), ont montré que la survie de la chrysomèle maculée des racines du concombre (*Diabrotica undecimpunctata*) et du doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*)⁶⁷ était aussi impactée. Un autre essai en laboratoire a aussi mis en évidence l'incidence significative sur le taux de survie et le développement⁶⁸ de deux espèces de coccinelles (*Adalia bipunctata* et *Coccinella septempunctata*), précieuses auxiliaires des cultures⁶⁹.

→ Effets hors cible sur l'espèce ciblée

Au sein du génome de l'insecte qu'elles visent, les molécules ARNi peuvent réduire au silence un autre gène que celui qui était initialement ciblé. Des études ont également montré qu'elles pouvaient créer une réaction du système immunitaire chez les organismes impactés, et saturer la machinerie ARNi d'une cellule, réduisant ainsi l'efficacité avec laquelle la cellule régule l'expression de ses gènes⁷⁰. Enfin, par des mécanismes encore inconnus des chercheurs, les ARNi de silençage génétique sont aussi transmissibles de génération en génération, parfois avec des mutations inattendues et incontrôlables⁷¹.

En l'état actuel des connaissances scientifiques concernant les similitudes génétiques entre les différentes espèces, notamment d'insectes, l'ampleur de ces effets hors cibles et leurs répercussions potentielles sur les chaînes trophiques et les écosystèmes sont impossibles à évaluer⁷².

⁶⁵ Chen *et al.*, 2021.

⁶⁶ Lu *et al.*, 2023.

⁶⁷ Baum *et al.*, 2007.

⁶⁸ L'étude porte cette fois uniquement sur l'effet d'un ARNdb ciblant uniquement la vATPase A.

⁶⁹ Haller *et al.*, 2019.

⁷⁰ Chen *et al.*, 2021, Lundgren & Duan, 2013.

⁷¹ Heinemann, 2019, Hourii-Zeevi & Rechavi, 2017.

⁷² Pollinis, 2022.

4. UNE IMPOSSIBLE ÉVALUATION DU RISQUE POUR LES INSECTES

Au-delà des effets identifiés, l'ensemble des impacts potentiels des pesticides ARNi pour les organismes non ciblés devrait faire l'objet d'une évaluation systématique, fiable et exhaustive avant toute mise sur le marché.

L'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), qui s'est penchée en 2020 sur la question de l'évaluation du risque environnemental de ces nouveaux pesticides, préconise ainsi de procéder à des comparaisons de séquences génétiques entre l'insecte cible et les organismes non ciblés afin d'identifier de potentielles victimes collatérales de ces pesticides nouvelle génération⁷³. Si cette technique ne permet pas d'écarter l'ensemble des risques et d'assurer l'innocuité de ces produits, elle permet en revanche d'identifier les insectes qui pourraient être le plus impactés par les molécules développées à des fins agricoles^{74,75}.

Pour pouvoir évaluer réellement les effets néfastes engendrés par l'utilisation du silençage génétique dans la lutte contre les insectes ravageurs, la connaissance du matériel génétique propre à chaque espèce d'insecte pollinisateur – et notamment les espèces menacées – est indispensable.

Mais si cette connaissance augmente de manière exponentielle grâce aux multiples projets de séquençage du génome⁷⁶, elle ne recouvre aujourd'hui qu'une petite partie de la diversité des insectes⁷⁷. Ainsi, en 2021, seuls 601 insectes avaient vu leur génome entièrement séquencé et référencé dans la base de données GenBank⁷⁸, soit une proportion infinitésimale de la diversité des espèces. L'ADN de l'écrasante majorité des insectes en voie d'extinction présents sur la liste rouge de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) n'a pas été séquencé, tout comme celui des 10 % des espèces d'insectes menacées de disparition selon la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES).

La méconnaissance du patrimoine génétique de l'immense majorité des espèces d'insectes pollinisateurs rend impossible l'évaluation des effets potentiels des pesticides génétiques pour ce pan entier de la biodiversité.

⁷³ OECD, 2023, Roberts *et al.*, 2015.

⁷⁴ Good *et al.*, 2016.

⁷⁵ Lundgren & Duan, 2013.

⁷⁶ Le séquençage du génome permet de déterminer la séquence nucléotidique de l'ADN présent dans chaque cellule d'un organisme donné.

⁷⁷ Casacuberta *et al.*, 2015.

⁷⁸ Hotaling *et al.*, 2021, Sayers *et al.*, 2021.

III. DES EFFETS IMPRÉVUS ET DANGEREUX SUR LES POLLINISATEURS

1. HOMOLOGIE SÉQUENTIELLE, EFFET MORTEL

La question du degré de similarité nécessaire entre les séquences de gènes de deux espèces pour évaluer le risque d'effet hors cible ne fait pas l'objet d'un consensus. L'OCDE⁷⁹ tout comme l'autorité sanitaire européenne (EFSA)⁸⁰ ne fournissent pas d'indications précises sur le degré d'homologie jugé significativement inquiétant. Selon l'EFSA, le seuil de similarité nécessaire au fonctionnement du silençage génétique n'est « *pas aisé à évaluer* ».

Pour autant, le silençage imprévu peut se produire dans des conditions de similarité forte mais pas absolue, ce qui laisse une marge d'incertitude élevée sur les effets réels de ces pesticides en plein champ sur les insectes non-ciblés.

Un article publié en novembre 2021⁸¹ établit que, si deux gènes présentent une grande similarité, il y a une forte probabilité que ces gènes, de même fonction et provenant d'espèces différentes, soient tous deux affectés par l'extinction des gènes. Selon cette étude, **l'extinction imprévue de gènes chez une espèce non ciblée peut se produire au-delà d'un seuil de similarité de 80 % de la séquence ciblée.**

POLLINIS a utilisé ce seuil pour passer en revue l'ensemble des séquences disponibles dans les études scientifiques faisant état de molécules de silençage génétique à des fins de lutte contre les insectes ravageurs des cultures, dont la liste se trouve en ANNEXE 1.

2. LES POLLINISATEURS EN DANGER : RÉSULTATS DE L'ÉTUDE DE POLLINIS

Dans son analyse, POLLINIS a étudié les effets de 26 produits ARNi (plantes, spray ou micro-organismes) ou produits bruts ciblant des ravageurs des cultures, sur plusieurs centaines de pollinisateurs. Ces séquences ont été tirées d'études scientifiques récentes (2011-2022).

Parmi les 26 produits étudiés, plus de 50 % provoqueraient des effets mortels sur des pollinisateurs non-ciblés (14 sur 26). Les degrés de similarité relevés se situent au-delà de 80 %, dépassant parfois 95 %. Les détails de cette méthodologie se trouvent ANNEXE 2 du rapport.

L'ensemble des données de l'étude est accessible ICI.

⁷⁹ OECD, 2023.

⁸⁰ EFSA, 2014.

⁸¹ Chen *et al.*, 2021.

DISCLAIMER

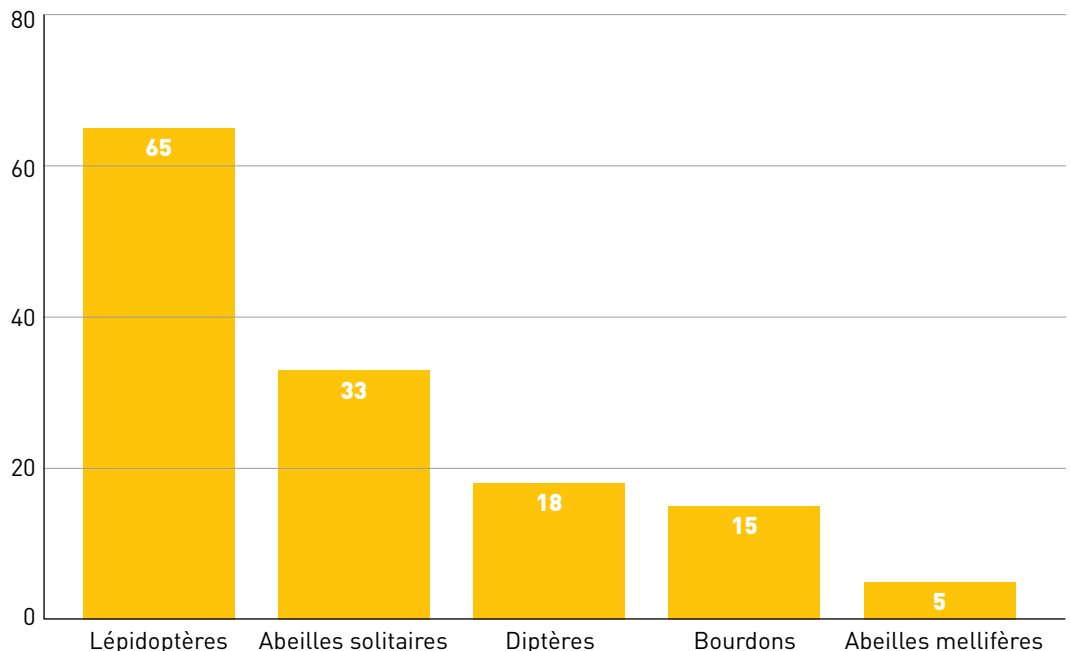
L'étude des effets hors cible proposée dans ce rapport repose sur 31 études scientifiques analysées par POLLINIS, dont 26 dans lesquelles les séquences génétiques ciblées étaient disponibles. Cependant, une quantification plus précise des effets hors cible n'est pas possible en raison du manque de littérature scientifique indépendante consacrée à ce sujet. Les résultats présentés dans ce rapport ne reposent donc que sur la littérature scientifique indépendante disponible au 1^{er} décembre 2022 et sur les données compilées grâce au logiciel BLAST au 20 avril 2023.

→ LES CHIFFRES CLÉS DE L'ÉTUDE

- **Abeilles mellifères** : potentiellement touchées par 4 produits analysés
- **Abeilles solitaires** : potentiellement touchées par 10 produits analysés
- **Bourdons** : potentiellement touchés par 8 produits analysés
- **Lépidoptères** : potentiellement touchés par 10 produits analysés
- **Diptères** : potentiellement touchés par 7 produits analysés

Au total, **136 espèces différentes de pollinisateurs sauvages** identifiées pourraient être victimes d'effets hors cible.

BOURDONS, ABEILLES, PAPILLONS : QUELS SERAIENT LES POLLINISATEURS LES PLUS IMPACTÉS PAR LES PESTICIDES GÉNÉTIQUES

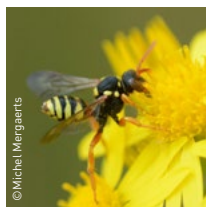


5 EXEMPLES DES ESPÈCES LES PLUS EXPOSÉES AUX EFFETS DES PESTICIDES GÉNÉTIQUES



Abeilles à miel

Cinq espèces d'abeilles à miel, dont l'abeille mellifère européenne *Apis mellifera* (ici en photo) seraient touchées par 4 des produits ARNi référencés par POLLINIS (également : *Apis cerana*, *Apis dorsata*, *Apis florea*, *Apis laboriosa*, *Apis mellifera*).



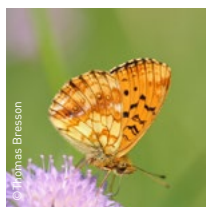
Abeilles solitaires

9 des 14 produits ARNi avec effets hors cible référencés par POLLINIS toucheraient *Nomada fucata*, une abeille solitaire cleptoparasite : la femelle (ici en photo) pond ses oeufs dans le nid d'une autre abeille, qui les élèvera à sa place.



Bourdon

Le bourdon des prés (*Bombus pratorum*) un hyménoptère commun en Europe, serait touché par 8 des 14 produits ARNi avec des effets hors cible référencés par POLLINIS.



Lépidoptères

Les papillons sont les pollinisateurs les plus touchés par les produits ARNi référencés par POLLINIS. 11 des 14 produits avec des effets hors cible affecteraient le Nacré de la Sanguisorbe (*Brenthis Ino*), une espèce univoltine dont le vol peut surtout être observé en été.



Diptères

18 espèces différentes de diptères seraient potentiellement touchées par les pesticides ARNi référencés par POLLINIS. Le syrphe *Blera fallax* serait la victime potentielle de six d'entre eux.

3. BLOQUER LA MUE DES PAPILLONS

Les lépidoptères seraient l'ordre d'insectes pollinisateurs le plus touché par les pesticides génétiques analysés dans le cadre de ce rapport (suivis par les abeilles solitaires). Ainsi, 11 des 26 produits ARNi étudiés auraient des effets létaux imprévus sur les lépidoptères.

La Noctuelle de la tomate (*Helicoverpa armigera*) est un papillon de nuit dont les chenilles sont des ravageurs redoutés de nombreuses plantes cultivées en agriculture conventionnelle telles que le coton, le maïs ou encore la tomate. Dans un article publié en 2017⁸², les auteurs se sont penchés sur le développement d'un pesticide ARNi diffusé par plante OGM ciblant le gène HaHR3 chez la chenille de la noctuelle. Ce gène, qui génère la protéine régulatrice de la mue et de la métamorphose de certains insectes, pilote

⁸² Han et al., 2017.

un processus biologique vital et commun à de nombreux papillons, par lequel ils évoluent en stades successifs de larve à chrysalide à imago.

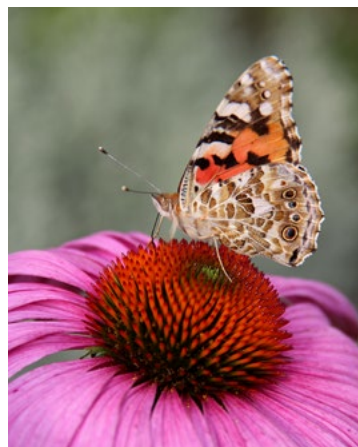
La séquence du gène de la mue ciblée chez la Noctuelle présente une similarité égale ou supérieure à 80 % à celle de 26 lépidoptères référencés, ce qui laisse craindre un impact identique lors de leur exposition.

Plusieurs papillons communs d'Europe, comme le Vulcain (*Pararge aegeria*), le Collier de corail (*Aricia agestis*), ou encore le Myrtil (*Maniola jurtina*), présentent ainsi une séquence génétique similaire à plus de 80 % avec le gène HahR3 de la Noctuelle de la tomate. Plusieurs papillons dont l'aire de répartition est située en Asie (*Papilio polytes*, *Papilio xuthus*) pourraient aussi être la cible non-voulue du silençage génétique du gène de la mue chez la Noctuelle de la tomate.

→ DES PAPILLONS EMBLÉMATIQUES CIBLES POTENTIELLES

En Europe, le **Machaon** (*Papilio machaon*), aussi appelé « *Grand porte-queue* » est l'un des papillons les plus communs, reconnaissable grâce à ses ailes dentelées et colorées. Son aire de répartition couvrant la quasi-totalité de l'hémisphère nord, il est également présent en Afrique du Nord ainsi qu'aux Etats-Unis. La similarité des séquences oscille entre 82 % et 99 %.

Le **Monarque migrateur** (*Danaus plexippus plexippus*), papillon emblématique des Amériques qui parcourt chaque année plus de 4 000 kilomètres entre le Mexique et le Canada, partage aussi entre 79 % et 97 % de similarité avec le gène-cible de la Noctuelle. Ce grand papillon migrateur, dont la population a rapidement décru sous l'effet combiné de la perte d'habitat et du déclin des plantes hôtes, figure sur la liste rouge des espèces en danger de l'UICN depuis 2022. Une étude publiée en 2016 estime que le déclin des populations observables de Monarque (dont le Monarque migrateur est une sous-espèce) s'élève à 84 % entre 1996 et 2014⁸³.



La **Belle-Dame** (*Vanessa cardui*), papillon de jour migrateur qui possède l'aire de répartition la plus étendue du monde, est présent sur l'ensemble des continents à l'exception de l'Australie et de l'Antarctique et s'adapte à une large variété d'habitats. Il présente une séquence similaire à 81,5%.

⁸³ Semmens *et al.*, 2016.

4. EMPÊCHER L'ACTIVITÉ MUSCULAIRE CHEZ LES BOURDONS

La lutte contre le doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*), le principal ravageur du tubercule, est un enjeu central pour les firmes agrochimiques. Ce coléoptère aux rayures jaunes et noires originaire du Mexique a colonisé progressivement les zones de culture de la pomme de terre (Europe, Moyen-Orient, Amérique du Nord). Sa capacité d'adaptation et de résistance rapide à l'ensemble des classes d'insecticides (il est aujourd'hui résistant à 54 insecticides différents⁸⁴) en fait une cible de choix pour les fabricants de pesticides génétiques.

Une étude publiée en 2020 dans la revue «*Pesticide Biochemistry and Physiology*»⁸⁵ a testé un traitement folial visant le gène producteur de l'actine, une protéine centrale dans de nombreuses fonctions cellulaires vitales (mobilité des cellules, division cellulaire, etc.) mais aussi dans la contraction musculaire. Vaporisé sur les plants de pommes de terre, mais potentiellement sur d'autres solanacées dont se nourrit le doryphore telles que les tomates ou les aubergines, l'ARNi est ensuite absorbé par le coléoptère lorsqu'il consomme les feuilles des plants.

La persistance de l'ARNi vaporisé, qui imprègne l'ensemble de la plante, peut également exposer les pollinisateurs au pesticide qui reste diffusé par le pollen. La comparaison de la séquence génétique utilisée dans ce pesticide a donné des résultats alarmants : 37 espèces d'abeilles – dont 5 espèces d'abeilles mellifères – seraient des victimes potentielles.

Les bourdons, principaux pollinisateurs de la tomate, seraient particulièrement exposés par l'utilisation de ce spray. 14 espèces de bourdons présentent une séquence génétique suffisamment similaire à celle ciblée chez le doryphore, parmi lesquelles se trouvent par exemple le **bourdon des champs** (*Bombus pascuorum*), une des espèces les plus répandues dans le monde et la plus abondante en Europe, qui compte 23 sous-espèces recensées, ou le **bourdon fébrile** (*Bombus impatiens*) et le bourdon à tâche rousse (*Bombus bifarius*), présents en Amérique du Nord.



Bourdon des champs (*Bombus pascuorum*).

⁸⁴ Molnar & Rakosy-Tican, 2021.

⁸⁵ Mehlhorn *et al.*, 2020.

5. L'ABEILLE MELLIFÈRE, CIBLE À HAUT RISQUE

Originnaire de l'Europe de l'Ouest, l'abeille mellifère (*Apis mellifera*) européenne est dotée d'un patrimoine génétique extraordinaire qui lui a permis de survivre à la dernière époque glaciaire. Domesticquée par l'homme pour la production de miel et de cire, l'abeille mellifère, fait partie des butineurs aux goûts les plus divers, permettant la fécondation de 80 % des espèces sauvages et 75 % des plantes cultivées, dont 90 % des arbres fruitiers⁸⁶. Une étude menée en 2017 a permis d'identifier 101 ARN à visée insecticide présentant une grande similarité de séquence avec des régions génomiques de l'abeille mellifère (*Apis mellifera*)⁸⁷, pouvant donc potentiellement impacter cette précieuse butineuse.



L'abeille à miel européenne (*Apis mellifera*).

Les recherches de POLLINIS ont aussi mis en évidence 4 pesticides génétiques potentiellement mortels pour les abeilles mellifères européennes, mais aussi d'autres espèces d'abeilles sociales productrices de miel telles que l'abeille asiatique (*Apis dorsata*), aussi connue sous le nom d'abeille géante, l'abeille naine (*Apis florea*), l'*Apis cerana*, l'abeille hôte naturelle de *Varroa destructor* ou encore l'abeille géante de l'Himalaya (*Apis laboriosa*).

Dans une étude publiée en 2013, les auteurs ont utilisé un virus recombinant de la mosaïque du tabac (TMV) pour cibler la psylle de la pomme de terre⁸⁸ (*Bactericera cockerelli*), un insecte ravageur des cultures de pomme de terre, de tomate ou encore d'aubergine ou de poivron présent en Amérique du Sud, au Mexique et aux Etats-Unis. Inoculé aux plants de tomates, le virus va infecter la plante qui réduira au silence deux gènes vitaux chez l'insecte (Actine et V-ATPase). Le même mécanisme de silençage génétique pourrait se produire chez les 5 espèces d'abeilles à miel.

Ce risque couvre aussi les dix sous-espèces référencées d'*Apis mellifera*, dont l'abeille italienne *Apis ligustica* mais aussi l'abeille noire *Apis mellifera mellifera*.

⁸⁶ Tautz, 2009.

⁸⁷ Mogren & Lundgren, 2017.

⁸⁸ Wuriyanghan & Falk, 2013.



LE LEDPRONA, SUBSTANCE ACTIVE BIENTÔT COMMERCIALISÉE MALGRÉ DES EFFETS HORS CIBLE POTENTIELS SUR LES ABEILLES SAUVAGES

Le spray développé par l'entreprise américaine GreenLight Biosciences est le pesticide génétique le plus proche d'obtenir une autorisation de mise sur le marché. Alors que l'entreprise table sur une autorisation au cours de l'année 2023 aux États-Unis et a annoncé vouloir l'introduire rapidement sur le marché européen, la substance active (ledprona) de son spray pourrait avoir des effets hors cible sur 3 abeilles solitaires (*Stelis phaeoptera*, *Mimumesa dahlbomi*, *Coelioxys conoideus*) ainsi que sur le Bourdon des prés (*Bombus pratorum*, ici en photo). De son côté, l'entreprise assurait en avril 2023 au journal « Libération » que ce produit était « sûr pour les abeilles mellifères, papillons et plusieurs autres insectes et mammifères non ciblés⁸⁹ ».

CONCLUSION

Les risques potentiels pour les abeilles, les pollinisateurs sauvages et l'ensemble des insectes que posent les pesticides génétiques rendent nécessaire une approche basée sur le principe de précaution.

Il est actuellement impossible de comprendre toutes les connexions complexes entre et parmi les espèces au sein d'un écosystème. Des recherches écologiques récentes révèlent qu'un seul gène clé – ou gène cathédrale – peut créer les conditions d'existence d'un réseau alimentaire entier. La mutation d'un seul gène pourrait ainsi modifier la structure et la fonction d'un écosystème⁹⁰.

Dans ce contexte et en l'état actuel de la science, expérimenter en pleine nature voire autoriser l'utilisation commerciale de ces pesticides génétiques enfreindrait le principe de précaution. Face à ce constat, POLLINIS demande :

- L'exclusion explicite des pesticides ARNi de la définition des produits de biocontrôle, tels que définis dans le règlement sur l'utilisation durable des pesticides (SUR) ;
- Une évaluation des risques drastique et rigoureuse des pesticides ARNi par une agence indépendante, et la stricte application du principe de précaution, pour confiner la recherche scientifique aux laboratoires et protéger l'environnement et les pollinisateurs ;
- La suspension immédiate de tous les essais en plein champ pratiqués en Europe, jusqu'à la mise en œuvre de cette évaluation.

⁸⁹ Schaub, 2023.

⁹⁰ Barbour *et al.*, 2022.

La surveillance et la réglementation des applications de l'ARN interférent devraient inclure une évaluation indépendante et transparente de la santé et de l'environnement, y compris l'examen des impacts potentiels à long terme, avant d'être autorisés à entrer sur le marché ou d'être expérimentés dans l'environnement.

Alors que les insectes pollinisateurs sont déjà confrontés à un déclin alarmant, l'utilisation de pesticides génétiques non-évalués aggravera les pressions qu'ils subissent déjà et pourrait précipiter leur extinction.

QUI SOMMES-NOUS ?

POLLINIS est une ONG française qui agit pour stopper l'extinction des abeilles et des autres pollinisateurs dont dépend l'ensemble de la biodiversité. L'association à but non lucratif fait pression sur les pouvoirs publics pour les obliger à restaurer d'urgence un environnement favorable à tous les arthropodes, finance la recherche scientifique indépendante et contribue elle-même à cette restauration grâce à des projets de terrain.

Entièrement fondée sur l'engagement et le soutien des citoyens, POLLINIS appuie toutes ses actions de conservation ou de transformation des politiques publiques sur le constat des scientifiques : partout dans le monde, les insectes – indispensables aux écosystèmes, à l'agriculture et à la sécurité alimentaire – sont en train de disparaître à un rythme effarant. Créée en 2012, l'association rassemble aujourd'hui 1,3 million de sympathisants à travers l'Europe.



RÉFÉRENCES

- AgBioInvestor. (2022). *Cost and Time Required for the Discovery, Development and Authorisation of a New Plant Biotechnology-Derived Genetic Trait*. <https://croplife.org/wp-content/uploads/2022/05/AgbioInvestor-Trait-RD-Branded-Report-Final-20220512.pdf>
- Ai, X., Wei, Y., Huang, L., Zhao, J., Wang, Y., & Liu, X. (2018). Developmental control of *Helicoverpa armigera* by ingestion of bacteria expressing dsRNA targeting an arginine kinase gene. <https://doi.org/10.1080/09583157.2018.1441368>, 28(3), 253–267
- Anderson, J. A., Mickelson, J., Challender, M., Moelling, E., Sult, T., TeRonde, S., Walker, C., Wang, Y., & Maxwell, C. A. (2020). Agronomic and compositional assessment of genetically modified DP23211 maize for corn rootworm control. *GM Crops & Food*, 11(4), 206–214. <https://doi.org/10.1080/21645698.2020.1770556>
- Bachman, P. M., Bolognesi, R., Moar, W. J., Mueller, G. M., Paradise, M. S., Ramaseshadri, P., Tan, J., Uffman, J. P., Warren, J. A., Wiggins, B. E., & Levine, S. L. (2013). Characterization of the spectrum of insecticidal activity of a double-stranded RNA with targeted activity against Western Corn Rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte). *Transgenic Research*, 22(6), 1207–1222. <https://doi.org/10.1007/S11248-013-9716-5/TABLES/4>
- Barbour, M. A., Kliebenstein, D. J., & Bascompte, J. (2022). A keystone gene underlies the persistence of an experimental food web. *Science*, 376(6588), 70–73. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABF2232/SUPPL_FILE/SCIENCE.ABF2232_MBAR_REPRODUCIBILITY_CHECKLIST.PDF
- Baum, J. A., Bogaert, T., Clinton, W., Heck, G. R., Feldmann, P., Ilagan, O., Johnson, S., Plaetinck, G., Munyikwa, T., Pleau, M., Vaughn, T., & Roberts, J. (2007). Control of coleopteran insect pests through RNA interference. *Nature Biotechnology* 25:11, 25(11), 1322–1326. <https://doi.org/10.1038/nbt1359>
- Bayer. (2021). *Bayer's Third Generation Corn Rootworm Trait Gains Final Approval; SmartStax® PRO Technology to Launch in US in 2022*. <https://www.bayer.com/en/us/smartstaxr-pro-technology-launch>
- Benbrook, C.M. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environ Sci Eur* 28, 3 (2016). <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0070-0>
- Biedenkopf, D., Will, T., Knauer, T., Jelonek, L., Furch, A. C. U., Busche, T., & Koch, A. (2020). Systemic spreading of exogenous applied rna biopesticides in the crop plant hordeum vulgare. *ExRNA*, 2(July-August-September), 1–10. <https://doi.org/10.1186/S41544-020-00052-3/FIGURES/7>
- Bolognesi, R., Ramaseshadri, P., Anderson, J., Bachman, P., Clinton, W., Flannagan, R., Ilagan, O., Lawrence, C., Levine, S., Moar, W., Mueller, G., Tan, J., Uffman, J., Wiggins, E., Heck, G., & Segers, G. (2012). Characterizing the Mechanism of Action of Double-Stranded RNA Activity against Western Corn Rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte). *PLOS ONE*, 7(10), e47534. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0047534>
- Bramlett, M., Plaetinck, G., & Maienfisch, P. (2020). RNA-Based Biocontrols—A New Paradigm in Crop Protection. *Engineering*, 6(5), 522–527. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2019.09.008>
- Casacuberta, J. M., Devos, Y., du Jardin, P., Ramon, M., Vaucheret, H., & Nogué, F. (2015). Biotechnological uses of RNAi in plants: risk assessment considerations. *Trends in Biotechnology*, 33(3), 145–147. <https://doi.org/10.1016/J.TIBTECH.2014.12.003>
- CBD. (2022). *Cadre Mondial de la biodiversité de Kunming à Montréal - Projet de décision proposé par le président*. <https://www.cbd.int/doc/c/0bde/b7c0/00c058bbfd77574515f170bd/cop-15-L-25-fr.pdf>
- CCE. (2020). *Rapport spécial Protection des pollinisateurs sauvages dans l'Union européenne-Les initiatives de la Commission n'ont pas porté leurs fruits*. <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/pollinators-15-2020/fr/>

- Chen, J., Peng, Y., Zhang, H., Wang, K., Zhao, C., Zhu, G., Reddy Palli, S., & Han, Z. (2021). Off-target effects of RNAi correlate with the mismatch rate between dsRNA and non-target mRNA. *RNA Biology*, 18(11), 1747–1759. <https://doi.org/10.1080/15476286.2020.1868680>
- Chen, X., Li, L., Hu, Q., Zhang, B., Wu, W., Jin, F., & Jiang, J. (2015). Expression of dsRNA in recombinant *Isaria fumosorosea* strain targets the TLR7 gene in *Bemisia tabaci*. *BMC Biotechnology*, 15(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/S12896-015-0170-8/FIGURES/6>
- Communication de la Commission au Parlement européen, au Conseil, au Comité économique et social européen et au comité des régions. (2018). Initiative européenne sur les pollinisateurs. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0395&from=FR>
- Cordis Europa. (2022). *Risk Assessment Innovation for low-risk pesticides | RATION Project | Fact Sheet | HORIZON | CORDIS | European Commission*. <https://doi.org/10.3030/101084163>
- Dalakouras, A., Wassenegger, M., Dadami, E., Ganopoulos, I., Pappas, M. L., & Papadopoulou, K. (2020). Genetically Modified Organism-Free RNA Interference: Exogenous Application of RNA Molecules in Plants. *Plant Physiology*, 182(1), 38–50. <https://doi.org/10.1104/PP.19.00570>
- Deluzarche, C. (2018). Usbek & Rica - Les pesticides à ARN, nouvelle « révolution agricole » controversée. *Usbek & Rica*. <https://usbeketrica.com/fr/article/les-pesticides-a-arn-nouvelle-revolution-agricole-controversee>
- Donald Danforth Plant-Science Center. (2023). <https://www.danforthcenter.org/news/growing-safe-sustainable-and-precise-pest-control/>
- Eamens, A., Wang, M. B., Smith, N. A., & Waterhouse, P. M. (2008). RNA Silencing in Plants: Yesterday, Today, and Tomorrow. *Plant Physiology*, 147(2), 456–468. <https://doi.org/10.1104/PP.108.117275>
- EC Europa. (2022). *Transparency Register - Biotechnology Innovation Organization*. <https://ec.europa.eu/transparencyregister/public/consultation/displaylobbyist.do?id=884534647247-77>
- EC Europa. (2022). *Transparency Register - GreenLight Biosciences*. <https://ec.europa.eu/transparencyregister/public/consultation/displaylobbyist.do?id=027420347605-10>
- European Parliament. (2022). *REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the sustainable use of plant protection products and amending Regulation (EU) 2021/2115*. [https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2022/0305/COM_COM\(2022\)0305_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_europeenne/com/2022/0305/COM_COM(2022)0305_EN.pdf)
- European Parliament. (2023). *Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council on the sustainable use of plant protection products and amending Regulation (EU) 2021/2115*. https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/ENVI-AM-745541_EN.pdf
- EFSA. (2014). International scientific workshop ‘Risk assessment considerations for RNAi-based GM plants.’ *EFSA Supporting Publications*, 11(12). <https://doi.org/10.2903/SP.EFSA.2014.EN-705>
- EFSA. (2018). *Network on Pesticide Steering meeting - Minutes of the 23rd meeting (Parma, 12.-13. june 2018)*. https://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/event/180612-m_0.pdf
- FOE. (2020). *Gene-Silencing Pesticides Risks and Concerns*. https://foe.org/wp-content/uploads/2020/10/RNAi_FullReport.pdf
- Ganbaatar, O., Cao, B., Zhang, Y., Bao, D., Bao, W., & Wuriyangan, H. (2017). Knockdown of *Mythimna separata* chitinase genes via bacterial expression and oral delivery of RNAi effectors. *BMC Biotechnology*, 17(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/S12896-017-0328-7/TABLES/1>
- Ghosh, S. K. B., & Gundersen-Rindal, D. E. (2017). Double strand RNA-mediated RNA interference through feeding in larval gypsy moth, *Lymantria dispar* (Lepidoptera: Erebidae). <http://Www.Eje.Cz/Doi/10.14411/Eje.2017.022.Html>, 114(1), 170–178 <https://doi.org/10.14411/EJE.2017.022>

- Gong, L., Chen, Y., Hu, Z., & Hu, M. (2013). Testing Insecticidal Activity of Novel Chemically Synthesized siRNA against *Plutella xylostella* under Laboratory and Field Conditions. *PLOS ONE*, 8(5), e62990. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0062990>
- Good, R. T., Varghese, T., Golz, J. F., Russell, D. A., Papanicolaou, A., Edwards, O., & Robin, C. (2016). OfftargetFinder: a web tool for species-specific RNAi design. *Bioinformatics*, 32(8), 1232–1234. <https://doi.org/10.1093/BIOINFORMATICS/BTV747>
- GreenLight Biosciences. (2021a). *How to scale RNA production*. <https://www.greenlightbiosciences.com/how-to-scale-rna-production/>
- GreenLight Biosciences. (2021b). *Science Day Presentation - Analyst teach-in*. <https://investors.greenlightbio.com/static-files/81249ff0-9bc0-4cb0-aded-e759b67303cb>
- GreenLight Biosciences. (2022a). *One tool for One Health: Healthy people and planet through RNA innovation*. <https://investors.greenlightbio.com/static-files/18375f4b-5d1e-4352-8afb-1a98afad70a5>
- GreenLight Biosciences. (2022b). *Présentation aux investisseurs (p. 23)*. <https://investors.greenlightbio.com/static-files/18375f4b-5d1e-4352-8afb-1a98afad70a5>
- Guo, W., Bai, C., Wang, Z., Wang, P., Fan, Q., Mi, X., Wang, L., He, J., Pang, J., Luo, X., Fu, W., Tian, Y., Si, H., Zhang, G., & Wu, J. (2018). Double-Stranded RNAs High-Efficiently Protect Transgenic Potato from *Leptinotarsa decemlineata* by Disrupting Juvenile Hormone Biosynthesis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(45), 11990–11999. <https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.8B03914>
- Hajeri, S., Killiny, N., El-Mohtar, C., Dawson, W. O., & Gowda, S. (2014). Citrus tristeza virus-based RNAi in citrus plants induces gene silencing in *Diaphorina citri*, a phloem-sap sucking insect vector of citrus greening disease (Huanglongbing). *Journal of Biotechnology*, 176(1), 42–49. <https://doi.org/10.1016/J.JBIOTECH.2014.02.010>
- Halder, K., Chaudhuri, A., Abdin, M. Z., Majee, M., & Datta, A. (2022). RNA Interference for Improving Disease Resistance in Plants and Its Relevance in This Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats-Dominated Era in Terms of dsRNA-Based Biopesticides. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.885128>
- Haller, S., Widmer, F., Siegfried, B. D., Zhuo, X., & Romeis, J. (2019). Responses of two ladybird beetle species (Coleoptera: Coccinellidae) to dietary RNAi. *Pest Management Science*, 75(10), 2652–2662. <https://doi.org/10.1002/PS.5370>
- Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., Stenmans, W., Müller, A., Sumser, H., Hörren, T., Goulson, D., & De Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE*, 12(10), e0185809–e0185809. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0185809>
- Han, Q., Wang, Z., He, Y., Xiong, Y., Lv, S., Li, S., Zhang, Z., Qiu, D., & Zeng, H. (2017). Transgenic Cotton Plants Expressing the HaHR3 Gene Conferred Enhanced Resistance to *Helicoverpa armigera* and Improved Cotton Yield. *International Journal of Molecular Sciences*, 18(9). <https://doi.org/10.3390/IJMS18091874>
- Harel-Bellan, A. (2006). Prix Nobel de Médecine 2006 Andrew Z. Fire et Craig C. Mello : Silence, on désactive les gènes. *Médecine/Sciences*, 22(11), 993–994. <https://doi.org/10.1051/MEDSCI/20062211993>
- Head, G. P., Carroll, M. W., Evans, S. P., Rule, D. M., Willse, A. R., Clark, T. L., Storer, N. P., Flannagan, R. D., Samuel, L. W., & Meinke, L. J. (2017). Evaluation of SmartStax and SmartStax PRO maize against western corn rootworm and northern corn rootworm: efficacy and resistance management. *Pest Management Science*, 73(9), 1883–1899. <https://doi.org/10.1002/PS.4554>
- Heinemann, J. A. (2019). Should dsRNA treatments applied in outdoor environments be regulated? *Environment International*, 132, 104856. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2019.05.050>

- Helmstetter, M. (2020). *RNAi-Based Pesticides Contribute To The Promise Of A New Green Revolution*. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/michaelhelmstetter/2020/08/06/rnai-based-pesticides-contribute-to-the-promise-of-a-new-green-revolution/?sh=5046489178e7>
- Hoang, B. T. L., Fletcher, S. J., Brosnan, C. A., Ghodke, A. B., Manzie, N., & Mitter, N. (2022). RNAi as a Foliar Spray: *Efficiency and Challenges to Field Applications*. *International Journal of Molecular Sciences* 2022, Vol. 23, Page 6639, 23(12), 6639. <https://doi.org/10.3390/IJMS23126639>
- Hotaling, S., Sproul, J. S., Heckenhauer, J., Powell, A., Larracuente, A. M., Pauls, S. U., Kelley, J. L., & Frandsen, P. B. (2021). Long Reads Are Revolutionizing 20 Years of Insect Genome Sequencing. *Genome Biology and Evolution*, 13(8). <https://doi.org/10.1093/GBE/EVAB138>
- Hou, Q., Xu, L., Liu, G., Pang, X., Wang, X., Zhang, Y., You, M., Ni, Z., Zhao, Z., & Liang, R. (2019). Plant-mediated gene silencing of an essential olfactory-related Gq α gene enhances resistance to grain aphid in common wheat in greenhouse and field. *Pest Management Science*, 75(6), 1718–1725. <https://doi.org/10.1002/PS.5292>
- Houri-Zeevi, L., & Rechavi, O. (2017). A Matter of Time: Small RNAs Regulate the Duration of Epigenetic Inheritance. *Trends in Genetics : TIG*, 33(1), 46–57. <https://doi.org/10.1016/J.TIG.2016.11.001>
- In the pipeline: Colorado potato beetle | Greenlight Bioscience. (n.d.). Retrieved June 15, 2023, from <https://www.greenlightbiosciences.com/in-the-pipeline-colorado-potato-beetle/>
- Jackson, A. L., & Linsley, P. S. (2010). Recognizing and avoiding siRNA off-target effects for target identification and therapeutic application. *Nature Reviews Drug Discovery* 2010 9:1, 9(1), 57–67. <https://doi.org/10.1038/nrd3010>
- Khan, A. M., Ashfaq, M., Khan, A. A., Naseem, M. T., & Mansoor, S. (2018). Evaluation of potential RNA-interference-target genes to control cotton mealybug, *Phenacoccus solenopsis* (Hemiptera: Pseudococcidae). *Insect Science*, 25(5), 778–786. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12455>
- Khan, A. M., Ashfaq, M., Kiss, Z., Khan, A. A., Mansoor, S., & Falk, B. W. (2013). Use of Recombinant Tobacco Mosaic Virus To Achieve RNA Interference in Plants against the Citrus Mealybug, *Planococcus citri* (Hemiptera: Pseudococcidae). *PLoS ONE*, 8(9), e73657. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0073657>
- Kim, E., Park, Y., & Kim, Y. (2015). A Transformed Bacterium Expressing Double-Stranded RNA Specific to Integrin β 1 Enhances Bt Toxin Efficacy against a Polyphagous Insect Pest, *Spodoptera exigua*. *PLoS ONE*, 10(7). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0132631>
- Kruminis-Kaszkiel, E., Juranek, J., Maksymowicz, W., & Wojtkiewicz, J. (2018). CRISPR/Cas9 Technology as an Emerging Tool for Targeting Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS). *International Journal of Molecular Sciences*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/IJMS19030906>
- Leenhardt, S., Mamy, L., Pesce, S., and Sanchez, W. (2022): The impacts of plant protection products on biodiversity and ecosystem services. Summary of the collective scientific expertise, 14 p. <https://doi.org/10.17180/D7A0-F411>
- Lettre de la Direction générale de la santé et de la sécurité alimentaire de la Commission européenne à POLLINIS. (2022). <https://www.pollinis.org/admin/wp-content/uploads/2023/05/no-documents-held-reply-ease-2022-5906.pdf>
- Li, X., Liu, X., Lu, W., Yin, X., & An, S. (2022). Application progress of plant-mediated RNAi in pest control. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10, 1364. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2022.963026/BIBTEX>
- Li, X., Zhang, M., & Zhang, H. (2011). RNA Interference of Four Genes in Adult *Bactrocera dorsalis* by Feeding Their dsRNAs. *PLoS ONE*, 6(3), e17788. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0017788>
- Lü, J., Yang, C., Liu, Z., Vélez, A. M., Guo, M., Chen, S., Qiu, B., Zhang, Y., Zhou, X., & Pan, H. (2021). Dietary RNAi toxicity assay suggests α and γ subunits of HvCOPI as novel molecular targets for *Henosepilachna vigintioctopunctata*, an emerging coccinellid pest. *Journal of Pest Science*, 94(4), 1473–1486. <https://doi.org/10.1007/S10340-021-01350-X/METRICS>







- Lu, Y., Deng, X., Zhu, Q., Wu, D., Zhong, J., Wen, L., & Yu, X. (2023). The dsRNA Delivery, Targeting and Application in Pest Control. *Agronomy*, 13(3), 714. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13030714/S1>
- Lundgren, J. G., & Duan, J. J. (2013). RNAi-Based Insecticidal Crops: Potential Effects on Nontarget Species. *BioScience*, 63(8), 657–665. <https://doi.org/10.1525/BIO.2013.63.8.8>
- Mao, J., & Zeng, F. (2014). Plant-mediated RNAi of a gap gene-enhanced tobacco tolerance against the Myzus persicae. *Transgenic Research*, 23(1), 145–152. <https://doi.org/10.1007/S11248-013-9739-Y>
- McDougall, P. (2016). *The Cost of New Agrochemical Product Discovery, Development and Registration in 1995, 2000, 2005-8 and 2010-2014. R&D expenditure in 2014 and expectations for 2019 - A Consultancy Study for CropLife International, CropLife America and the European Crop Protection Association.* <https://croplife.org/wp-content/uploads/2016/04/Cost-of-CP-report-FINAL.pdf>
- Mehlhorn, S., Geibel, S., Bucher, G., & Nauen, R. (2020). Profiling of RNAi sensitivity after foliar dsRNA exposure in different European populations of Colorado potato beetle reveals a robust response with minor variability. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 166, 104569. <https://doi.org/10.1016/J.PESTBP.2020.104569>
- Mehlhorn, S., Ulrich, J., Baden, C. U., Buer, B., Maiwald, F., Lueke, B., Geibel, S., Bucher, G., & Nauen, R. (2021). The mustard leaf beetle, *Phaedon cochleariae*, as a screening model for exogenous RNAi-based control of coleopteran pests. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 176, 104870. <https://doi.org/10.1016/J.PESTBP.2021.104870>
- Meunier, E. (2015). Interférence ARN : 20 ans d'autorisations commerciales... sans évaluation – Inf'OGM. *Inf'OGM*. <https://www.infogm.org/interference-arn-20-ans-d-autorisations-commerciales-sans-evaluation>
- Mogilicherla, K., Howell, J. L., & Palli, S. R. (2018). Improving RNAi in the Brown Marmorated Stink Bug: Identification of target genes and reference genes for RT-qPCR. *Scientific Reports* 2018 8:1, 8(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22035-z>
- Mogren, C. L., & Lundgren, J. G. (2017). In silico identification of off-target pesticidal dsRNA binding in honey bees (*Apis mellifera*). *PeerJ*, 2017(12), e4131. <https://doi.org/10.7717/PEERJ.4131/SUPP-1>
- Molnar, I., & Rakosy-Tican, E. (2021). Difficulties in Potato Pest Control: The Case of Pyrethroids on Colorado Potato Beetle. *Agronomy* 2021, Vol. 11, Page 1920, 11(10), 1920. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11101920>
- Nieto, A., Roberts, S. P. M., Kemp, J., Rasmont, P., Kuhlmann, M., Criado, M. G., Biesmeijer, J. C., Bogusch, P., Dathe, H. H., de La Rúa, P., de Meulemeester, T., Dehon, M., Dewulf, A., Javier Ortiz-Sánchez, F., Lhomme, P., Pauly, A., Potts, S. G., Praz, C., Quaranta, M., Radchenko, V. G., Scheuchl, E., Smit, J., Straka, J., Terzo, M., Tomozii, B., Window, J., and Michez, D. (2014): European Red List of Bees. <https://doi.org/10.2779/77003>
- OECD. (2021). *BioTrack Product Database - DP23211*. <https://biotrackproductdatabase.oecd.org/Product.aspx?id=DP-%C3%9823211-2>
- OECD. (2023). Considerations for the Environmental Risk Assessment of the Application of Sprayed or Externally Applied ds-RNA-Based Pesticides. In *Series on pesticides no. 104*. [https://one.oecd.org/document/env/jm/mono\(2020\)26/en/pdf](https://one.oecd.org/document/env/jm/mono(2020)26/en/pdf)
- Pan, H., Yang, X., Bidne, K., Hellmich, R. L., Siegfried, B. D., & Zhou, X. (2017). Dietary risk assessment of v-ATPase A dsRNAs on monarch butterfly larvae. *Frontiers in Plant Science*, 8, 242. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2017.00242/BIBTEX>
- Parker, K. M., Barragán Borrero, V., Van Leeuwen, D. M., Lever, M. A., Mateescu, B., & Sander, M. (2019). Environmental Fate of RNA Interference Pesticides: Adsorption and Degradation of Double-Stranded RNA Molecules in Agricultural Soils. *Environmental Science and Technology*, 53(6), 3027–3036. https://doi.org/10.1021/ACS.EST.8B05576/ASSET/IMAGES/LARGE/ES-2018-05576D_0004.JPEG

- Parlement européen et Conseil, directive 2001/18/CE du 12 mars 2001. (2001). <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:2001L0018:20080321:FR:PDF>
- Petek, M., Coll, A., Ferenc, R., Razinger, J., & Gruden, K. (2020). Validating the Potential of Double-Stranded RNA Targeting Colorado Potato Beetle Mesh Gene in Laboratory and Field Trials. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1250. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.01250>
- Pollinis. (2022). *APPEL INTERNATIONAL - LES BIOTECHNOLOGIES DANGEREUSES METTENT LES POLLINISATEURS EN DANGER ET MENACENT LES SERVICES QUE NOUS REND LA NATURE*. <https://www.pollinis.org/admin/wp-content/uploads/2023/01/pollinis-biotechnologies-appel-fr-v1.pdf>
- Reinders, J. D., Reinders, E. E., Robinson, E. A., Moar, W. J., Price, P. A., Head, G. P., & Meinke, L. J. (2022). Characterizing the sublethal effects of SmartStax PRO dietary exposure on life history traits of the western corn rootworm, *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte. *PLOS ONE*, 17(5), e0268902. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0268902>
- Réponse de la Commission européenne à l'eurodéputé Eric Andrieu, 3 mai 2023. (2023). <https://www.pollinis.org/admin/wp-content/uploads/2023/05/answer-p-001063-2023.pdf>
- Roberts, A. F., Devos, Y., Lemgo, G. N. Y., & Zhou, X. (2015). Biosafety research for non-target organism risk assessment of RNAi-based GE plants. *Frontiers in Plant Science*, 6(NOVEMBER), 958. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2015.00958/BIBTEX>
- Rodrigues, T. B., Mishra, S. K., Sridharan, K., Barnes, E. R., Alyokhin, A., Tuttle, R., Kokulapalan, W., Garby, D., Skizim, N. J., Tang, Y. W., Manley, B., Aulisa, L., Flannagan, R. D., Cobb, C., & Narva, K. E. (2021). First Sprayable Double-Stranded RNA-Based Biopesticide Product Targets Proteasome Subunit Beta Type-5 in Colorado Potato Beetle (*Leptinotarsa decemlineata*). *Frontiers in Plant Science*, 12, 2619. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2021.728652/BIBTEX>
- San Miguel, K., & Scott, J. G. (2016). The next generation of insecticides: dsRNA is stable as a foliar-applied insecticide. *Pest Management Science*, 72(4), 801–809. <https://doi.org/10.1002/PS.4056>
- Sayers, E. W., Beck, J., Bolton, E. E., Bourexis, D., Brister, J. R., Canese, K., Comeau, D. C., Funk, K., Kim, S., Klimke, W., Marchler-Bauer, A., Landrum, M., Lathrop, S., Lu, Z., Madden, T. L., O'Leary, N., Phan, L., Rangwala, S. H., Schneider, V. A., ... Sherry, S. T. (2021). Database resources of the National Center for Biotechnology Information. *Nucleic Acids Research*, 49(D1), D10–D17. <https://doi.org/10.1093/NAR/GKAA892>
- Schaub, C. (2022). Qu'est-ce que les ARNi, cette nouvelle famille de pesticides qui inquiète ? *Libération*. https://www.liberation.fr/environnement/agriculture/quest-ce-que-les-arni-cette-nouvelle-famille-de-pesticides-qui-inquiete-20230411_PRMT6Z2ORJG7LGHGMSF6R5FBQQ/
- SEC. (2022). *Prospectus financier de GreenLight Biosciences Holdings*. <https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/1822691/000119312522043188/d151758d424b31.pdf>
- Semmens, B. X., Semmens, D. J., Thogmartin, W. E., Wiederholt, R., López-Hoffman, L., Diffendorfer, J. E., Pleasants, J. M., Oberhauser, K. S., & Taylor, O. R. (2016). Quasi-extinction risk and population targets for the Eastern, migratory population of monarch butterflies (*Danaus plexippus*). *Scientific Reports* 2016 6:1, 6(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep23265>
- Tan, J., Levine, S. L., Bachman, P. M., Jensen, P. D., Mueller, G. M., Uffman, J. P., Meng, C., Song, Z., Richards, K. B., & Beevers, M. H. (2016). No impact of DvSnf7 RNA on honey bee (*Apis mellifera* L.) adults and larvae in dietary feeding tests. *Environmental Toxicology and Chemistry / Setac*, 35(2), 287. <https://doi.org/10.1002/ETC.3075>
- Tautz, J. (2009). *L'étonnante abeille* (1st ed.). De Boeck Supérieur. <https://www.deboecksuperieur.com/ouvrage/9782804101312-L-etonnante-abeille>
- The Economist. (2021). *RNA, good for vaccines, can also be used as a pesticide*. *The Economist*. <https://www.economist.com/science-and-technology/2021/05/20/rna-good-for-vaccines-can-also-be-used-as-a-pesticide>

- Tian, H., Peng, H., Yao, Q., Chen, H., Xie, Q., Tang, B., & Zhang, W. (2009). Developmental Control of a Lepidopteran Pest *Spodoptera exigua* by Ingestion of Bacteria Expressing dsRNA of a Non-Midgut Gene. *PLoS ONE*, 4(7), e6225. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0006225>
- US EPA. (2013). White Paper on RNAi Technology as a Pesticide: Problem Formulation for Human Health and Ecological Risk Assessment Submitted to the FIFRA Science Advisory Panel For Review and Comment]. In U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.thecre.com/premium/wp-content/uploads/2012/04/RNAi-White-Paper.pdf>
- US-EPA. (2015). *Final Regulatory Decision for New Active Ingredients Double-stranded Ribonucleic Acid Transcript Comprising a DvSnj7 Inverted Repeat Sequence Derived from Western Corn Rootworm (Diabrotica virgifera virgifera) and Bacillus thuringiensis Cry3Bb1 Protein and the Genetic Material (vector PV-ZMIR10871) Necessary for Their Production in MON 87411 Corn.* <https://www.regulations.gov/document/EPA-HQ-OPP-2014-0293-0398>
- VBio. (2020). *Genome Editing: Faktenbasierte Regulierung durch differenzierte Betrachtungsweise.* <http://curia.europa.eu/juris/documents.jsf?num=C-528/16>
- Wells, M., and Steinbrecher, R. A. (2022). Current and proposed insect targets for gene drive development - A horizon scanning survey. In EcoNexus. <https://www.econexus.info/publication/current-and-proposed-insect-targets-gene-drive-development>
- Willow, J., Soonvald, L., Sulg, S., Kaasik, R., Silva, A. I., Taning, C. N. T., Christiaens, O., Smaghe, G., & Veromann, E. (2021). RNAi efficacy is enhanced by chronic dsRNA feeding in pollen beetle. *Communications Biology* 2021 4:1, 4(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s42003-021-01975-9>
- Wu, J. J., Mu, L. L., Kang, W. N., Ze, L. J., Shen, C. H., Jin, L., Anjum, A. A., & Li, G. Q. (2021). RNA interference targeting ecdysone receptor blocks the larval–pupal transition in *Henosepilachna vigintioctopunctata*. *Insect Science*, 28(2), 419–429. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12777>
- Wuriyangan, H., & Falk, B. W. (2013). RNA Interference towards the Potato Psyllid, *Bactericera cockerelli*, Is Induced in Plants Infected with Recombinant Tobacco mosaic virus (TMV). *PLoS ONE*, 8(6), e66050. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0066050>
- Ye, Z. F., Liu, X. L., Han, Q., Liao, H., Dong, X. T., Zhu, G. H., & Dong, S. L. (2017). Functional characterization of PBP1 gene in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) by using the CRISPR/Cas9 system. *Scientific Reports* 2017 7:1, 7(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08769-2>
- Zand Karimi, H., & Innes, R. W. (2022). Molecular mechanisms underlying host-induced gene silencing. *The Plant Cell*, 34(9), 3183–3199. <https://doi.org/10.1093/PLCELL/KOAC165>
- Zhao, Y., Sui, X., Xu, L., Liu, G., Lu, L., You, M., Xie, C., Li, B., Ni, Z., & Liang, R. (2018). Plant-mediated RNAi of grain aphid CHS1 gene confers common wheat resistance against aphids. *Pest Management Science*, 74(12), 2754–2760. <https://doi.org/10.1002/PS.5062>
- Zheng, J. C., Yue, X. R., Kuang, W. Q., Li, S. L., Tang, R., Zhang, Z. F., Kurban, A., Saif-Ur-Rehman, Zhao, C., Liu, T. X., & Jing, X. (2020). NPC1b as a novel target in controlling the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *Pest Management Science*, 76(6), 2233–2242. <https://doi.org/10.1002/PS.5761>
- Zhu, F., Xu, J., Palli, R., Ferguson, J., & Palli, S. R. (2011). Ingested RNA interference for managing the populations of the Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. *Pest Management Science*, 67(2), 175–182. <https://doi.org/10.1002/PS.2048>

ANNEXE 1 :

TABLEAU RÉCAPITULATIF DES AVANCÉES RÉCENTES SUR LES PESTICIDES GÉNÉTIQUES

LÉGENDE					
					
Plante génétiquement modifiée	Bactérie	Virus	Spray	Champignon	
					<ol style="list-style-type: none"> 1 Travaux théoriques ou de modélisation sur une molécule ou un produit ARNi ayant fait l'objet d'une publication scientifique 2 Tests en laboratoire contre un ravageur spécifique montrant des résultats probants de mortalité (dans des boîtes de pétri ou petites boîtes confinées) 3 Essais sous serre offrant une simulation plus précise des conditions en milieu naturel 4 Essais en plein champ, ne signifiant pas que la technologie a été démontrée comme étant efficace ou sûre 5 Demande d'approbation déposée auprès d'une autorité sanitaire 6 Autorisation de commercialisation pour alimentation humaine et/ou animale 7 Autorisation de culture dans un ou plusieurs pays 8 Produit ARNi sur le marché
					 Annonce d'un produit ou molécule ARNi par une entreprise sans autres informations disponibles sur le sujet






ESPÈCES CIBLÉES	PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	TYPE DE PRODUIT	FINANCEMENTS	EFFET SUR LES ESPÈCES NON-CIBLÉES	ÉTAT D'AVANCEMENT DU PRODUIT
COLÉOPTÈRES					
DORYPHORE DE LA POMME DE TERRE (<i>Leptinotarsa decemlineata</i>)	Guo <i>et al.</i> , 2018		Fondation des sciences naturelles de Chine Fonds du Gouvernement Chinois	Aucun	<ol style="list-style-type: none"> 1 2 3 4 Tests plein champ en Chine en 2014 et 2015 (comté de Changji, région autonome de Xinjiang Uygur) et 2017 (comté de Tekesi)
	Petek <i>et al.</i> , 2020		Agence de recherche de Slovénie (ARRS)	Aucun	<ol style="list-style-type: none"> 1 2 3 4 Tests plein champ en Slovénie (2019)
	Bramlett <i>et al.</i> , 2020		Syngenta	Séquence génétique non disponible : analyse des effets hors cible impossible	<ol style="list-style-type: none"> 1 2 3 4 Tests plein champ : localisation et date inconnues
	San Miguel & Scott, 2016		Cornell University (États-Unis)	Abeilles mellifères Abeilles solitaires Bourdon Lépidoptères Diptères	<ol style="list-style-type: none"> 1 2 3 Tests en serre au Québec (date inconnue)
	Rodrigues <i>et al.</i> , 2021		GreenLight Biosciences depuis (États-Unis)	Abeilles solitaires Bourdon	<ol style="list-style-type: none"> 1 2 3 4 5 Demande d'approbation déposée auprès de l'EPA* (en 2022) Tests en serre dans le Maine aux États-Unis Tests en plein champ en Amérique du Nord (États Unis et Canada) et Europe (Allemagne, France, Espagne) - (dates inconnues)

TABLEAU RÉCAPITULATIF
DES AVANCÉES
RÉCENTES
SUR LES PESTICIDES
GÉNÉTIQUES








ESPÈCES	PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	TYPE DE PRODUIT	FINANCEMENTS	EFFET SUR LES ESPÈCES NON-CIBLÉES	ÉTAT D'AVANCEMENT DU PRODUIT
COLÉOPTÈRES (suite)					
DORYPHORE DE LA POMME DE TERRE <i>(Leptinotarsa decemlineata)</i>	Zhu <i>et al.</i> , 2011		Département de l'Agriculture des États-Unis, Service d'État coopératif de recherche, d'éducation et de vulgarisation (USDA-CSREES)	Abeilles mellifères Abeilles solitaires Bourdons Lépidoptères Diptères	1 2
	Mehlhorn <i>et al.</i> , 2020		Bayer	Abeilles mellifères Abeilles solitaires Bourdons Lépidoptères Diptères	1 2
CHRYSOMÈLE DES RACINES DU MAÏS <i>(Diabrotica virgifera)</i>	Bolognesi <i>et al.</i> , 2012 Bachman <i>et al.</i> , 2013 Tan <i>et al.</i> , 2016 Plante génétiquement modifiée	 Nom commercial de la 1 ^{ère} version : Maïs MON 87411	Monsanto (Bayer depuis 2018)	Aucun	1 2 3 4 5 6 7
	Head <i>et al.</i> , 2017 Reinders <i>et al.</i> , 2022	 Nom commercial de la deuxième version : SmartStax PRO (SSP)	Monsanto (Bayer depuis 2018) Université du Nebraska (États-Unis)		
	Anderson <i>et al.</i> , 2020	 Nom commercial : Maïs DP23211	Corteva Agriscience (Dow AgroSciences)	Séquence génétique non disponible : analyse des effets hors cible impossible	1 2 3 4 5 6 7 Approuvé en 2021 par la FSANZ** Tests plein champ (États-Unis et Canada (2018): United States and Canada
	Bramlett <i>et al.</i> , 2020		Syngenta	Séquence génétique non disponible : analyse des effets hors cible impossible	1 2
CHRYSOMÈLE DE LA MOUTARDE <i>(Phaedon cochleariae)</i>	Mehlhorn <i>et al.</i> , 2021		Bayer	Abeilles solitaires Bourdons Lépidoptères Diptères	1 2

TABLEAU RÉCAPITULATIF
DES AVANCÉES
RÉCENTES
SUR LES PESTICIDES
GÉNÉTIQUES








ESPÈCES	PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	TYPE DE PRODUIT	FINANCEMENTS	EFFET SUR LES ESPÈCES NON-CIBLÉES	ÉTAT D'AVANCEMENT DU PRODUIT
COLÉOPTÈRES (suite)					
COLÉOPTÈRE DU POLLEN <i>(Brassicoglyphus aeneus)</i>	Willow <i>et al.</i> , 2021		Conseil de recherche Estonien Projet européen C-IPM du réseau public ERA-NET, FEDER, (Union européenne) Université de Ghent (Belgique) Fondation pour la recherche - Flandres	Aucun	1 2
COCCINELLE <i>(Henosepilachna vigintioctopunctata)</i>	Wu <i>et al.</i> , 2021		Ministère de l'Agriculture et des Affaires Rurales de Chine Programme national de Recherche & Développement Chinois	Coccinelles non ravageuses***	1 2 3 Tests en serre en Chine (date inconnue)
	Lü <i>et al.</i> , 2021		Fondation nationale des sciences naturelles de Chine Programme national de Recherche & Développement chinois	Aucun	1 2
LÉPIDOPTÈRES					
TEIGNE DES CHOUX <i>(Plutella xylostella)</i>	Gong <i>et al.</i> , 2013		Fondation nationale des sciences naturelles de Chine	Aucun	1 2 3 4 Tests en plein champ en Chine (date inconnue)
NOCTUELLE DE LA TOMATE ET DU COTON <i>(Helicoverpa armigera)</i>	Han <i>et al.</i> , 2017		Fondation Nationale des sciences naturelles de Chine Fonds du Gouvernement Chinois	Lépidoptères	1 2 3 Tests sous serres contrôlées en Chine (date inconnue)
	Zheng <i>et al.</i> , 2020		Fondation Nationale des sciences naturelles de Chine Research Start-up Fund of Shaanxi Province (Chine) Research Start-up of Northwest A&F University (Chine)	Aucun	1 2
	Ai <i>et al.</i> , 2018		Fondation de la science de la région autonome ouïghoure du Xinjiang (Chine)	Séquence génétique non disponible : analyse des effets hors cible impossible	1 2

TABLEAU RÉCAPITULATIF
DES AVANCÉES
RÉCENTES
SUR LES PESTICIDES
GÉNÉTIQUES









ESPÈCES	PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	TYPE DE PRODUIT	FINANCEMENTS	EFFET SUR LES ESPÈCES NON-CIBLÉES	ÉTAT D'AVANCEMENT DU PRODUIT
LÉPIDOPTÈRES (suite)					
CHENILLE LÉGIONNAIRE ORIENTAL <i>(Mythimna separata)</i>	Ganbaatar <i>et al.</i> , 2017)		Fondation nationale des sciences naturelles de Chine Université de Mongolie-Intérieure (IMU)	Aucun	1 2
SPONGIEUSE <i>(Lymantria dispar)</i>	Ghosh & Gundersen-Rindal, 2017		Agence Régionale de Santé du département de l'Agriculture des États-Unis (USDA-ARS)	Lépidoptères	1 2
NOCTUELLE AIGUË <i>(Spodoptera exigua)</i>	Kim <i>et al.</i> , 2015		Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de Corée du Sud Institut Coréen pour la planification et l'évaluation de la technologie dans l'alimentation, l'agriculture, la foresterie et les pêcheries	Aucun	1 2
	Tian <i>et al.</i> , 2009		Fondation nationale des sciences naturelles de Chine Programme national de recherche fondamentale de Chine	Lépidoptères	1 2
DIPTÈRES					
MOUCHE ORIENTALE DES FRUITS <i>(Bactrocera dorsalis)</i>	Li <i>et al.</i> , 2011		Fonds spécial pour la recherche agro-scientifique d'intérêt public de Chine	Abeilles solitaires Lépidoptères Diptères	1 2
HÉMIPTÈRES					
PUCERON DES CÉRÉALES <i>(Sitobion avenae)</i>	Zhao <i>et al.</i> , 2018		Académie chinoise des sciences agricoles Institut de recherche en médecine chinoise Henan Shennong	Aucun	1 2 3 4 Tests plein champ en Chine (China Agricultural University, Beijing) (2017)
PUCERON VERT DU PÊCHER <i>(Myzus persicae)</i>	Mao & Zeng, 2014		Fondation nationale des sciences naturelles de Chine	Aucun	1 2 3 Tests sous serre en Chine à Pékin (date inconnue)
	Biedenkopf <i>et al.</i> , 2020		Fondation allemande pour la recherche (DFG)	Séquence génétique non disponible : analyse des effets hors cible impossible	1 2

TABLEAU RÉCAPITULATIF
DES AVANCÉES
RÉCENTES
SUR LES PESTICIDES
GÉNÉTIQUES









ESPÈCES	PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	TYPE DE PRODUIT	FINANCEMENTS	EFFET SUR LES ESPÈCES NON-CIBLÉES	ÉTAT D'AVANCEMENT DU PRODUIT
HÉMIPTÈRES (suite)					
PUCERON VERT DU PÊCHER <i>(Myzus persicae)</i>	Hou <i>et al.</i> , 2019		Ministère de l'agriculture et des affaires rurales Chinoise Département du développement rural et social du ministère des sciences et de la technologie (Chine)	Abeilles solitaires Bourdons Diptères Lépidoptères	1 2
PUNAISE DU SOJA <i>(Plusieurs espèces)</i>	Bramlett <i>et al.</i> , 2020		Syngenta	Pas de Séquence génétique non disponible : analyse des effets hors cible impossible	1 2
PSYLLE ASIATIQUE DES AGRUMES <i>(Diaphorina citri)</i>	Hajeri <i>et al.</i> , 2014		Fondation pour la recherche et le développement des agrumes de Floride, CRDS (États-Unis) Dotation de recherche de la famille J.R. et Addie Graves (États-Unis)	Aucun	1 2
PSYLLE DE LA POMME DE TERRE / TOMATE <i>(Bactericera cockerelli)</i>	Wuriyanghan & Falk, 2013		Université de Californie (États-Unis) Fondation pour la recherche et le développement des agrumes de Floride, CRDS (États-Unis)	Abeilles mellifères Abeilles solitaires Bourdon Lépidoptères Diptères	1 2
COCHENILLE DU COTON <i>(Phenacoccus solenopsis)</i>	Khan <i>et al.</i> , 2018		Commission de l'éducation supérieure du Pakistan (HEC)	Abeilles solitaires	1 2
COCHENILLE DES AGRUMES <i>(Planococcus citri)</i>	Khan <i>et al.</i> , 2013		Commission de l'éducation supérieure du Pakistan (HEC) Université de Californie (États-Unis)	Séquence génétique non disponible : analyse des effets hors cible impossible	1 2
PARASITE DU TABAC L'ALEURODE <i>(Bemisia tabaci)</i>	X. Chen <i>et al.</i> , 2015		Programme national de recherche et développement en haute technologie de haute technologie numéro 863 (Chine)	Aucun	1 2
PUNAISE DIABOLIQUE <i>(Halyomorpha halys)</i>	Mogilicherla <i>et al.</i> , 2018		Département de l'Agriculture des États-Unis : Service d'État coopératif de recherche, d'éducation et de vulgarisation (USDA HATCH)	Abeilles solitaires Bourdon	1 2

TABLEAU RÉCAPITULATIF
DES AVANCÉES
RÉCENTES
SUR LES PESTICIDES
GÉNÉTIQUES



ESPÈCES	SOURCE	TYPE DE PRODUIT	FINANCEMENTS	EFFET SUR LES ESPÈCES NON-CIBLÉES	ÉTAT D'AVANCEMENT DU PRODUIT
LES PROJETS DE PESTICIDES GÉNÉTIQUE DES FIRMES *					
*Les informations ci-dessous sont extraites de communications d'entreprises impliquées, au moins partiellement, dans le développement de produits ARNi à des fins agricoles. Elles témoignent de l'intérêt économique suscité par ces produits et des initiatives privées dont ils font l'objet, mais n'ont pas pu être reliées aux travaux scientifiques dédiés (gène ciblé, avancées des recherches...).					
CHRYDOMÈLE DES RACINES DU MAÏS <i>(Diabrotica virgifera)</i>	«VT4 PRO with RNAi Technology», Informations extraites du site web de Bayer.		Bayer	Séquences génétiques non disponibles : analyse des effets hors cible impossible	Commercialisation prévue par l'entreprise en 2024 aux États-Unis
TEIGNE DES CHOUX <i>(Plutella xylostella)</i>	GreenLight Biosciences, One Tool for One Health [Un outil pour une santé], Présentation aux investisseurs nov. 2022	DONNÉES MANQUANTES	GreenLightBiosciences		Commercialisation prévue par l'entreprise en 2026
TÉTRANYQUE TISSERAND <i>(Tetranychus urticae)</i>		DONNÉES MANQUANTES	GreenLightBiosciences		Commercialisation prévue par l'entreprise en 2026
LÉGIONNAIRE D'AUTOMNE <i>(Spodoptera frugiperda)</i>		DONNÉES MANQUANTES	GreenLightBiosciences		Commercialisation prévue par l'entreprise en 2027
COLÉOPTÈRE DU POLLEN <i>(Brassicoglyphus aeneus)</i>		DONNÉES MANQUANTES	GreenLightBiosciences		Commercialisation prévue par l'entreprise en 2028
TEIGNE DES CHOUX <i>(Plutella xylostella)</i>		Site de l'entreprise RNAÏSSANCE AG			RNAÏSSANCE AG

TABLEAU RÉCAPITULATIF
DES AVANCÉES
RÉCENTES
SUR LES PESTICIDES
GÉNÉTIQUES

ESPÈCES	SOURCE	TYPE DE PRODUIT	FINANCEMENTS	EFFET SUR LES ESPÈCES NON-CIBLÉES	ÉTAT D'AVANCEMENT DU PRODUIT
LES PROJETS DE PESTICIDES GÉNÉTIQUE DES FIRMES (suite)					
CHRYDOMÈLE DES RACINES DU MAÏS <i>(Diabrotica virgifera)</i>	Site de l'entreprise Trillium Ag	DONNÉES MANQUANTES	Trillium Ag	Séquences génétiques non disponibles : analyse des effets hors cible impossible	⊗
PUNAISES (plusieurs espèces)		DONNÉES MANQUANTES			⊗
LÉGIONNAIRE D'AUTOMNE <i>(Spodoptera frugiperda)</i>		DONNÉES MANQUANTES			⊗
LÉGIONNAIRE D'AUTOMNE <i>(Spodoptera frugiperda)</i>	Résultats du programme de recherche en faveur de l'innovation dans les petites entreprises, de la Fondation nationale pour la science (États-Unis)	DONNÉES MANQUANTES	AgroSpheres		⊗

*EPA : Environmental Protection Agency, Agence de protection de l'environnement des États-Unis.

**FSANZ : Food Standards Australia New Zealand, en charge de l'établissement des normes alimentaires en Australie et en Nouvelle-Zélande.

*** Ces tests ont été menés dans le cadre de l'étude scientifique et non par POLLINIS

****Produit ARNi brut :
Molécules d'ARNi injectées dans les larves des ravageurs ciblés ou ingérées sous forme de nourriture.
Le produit ARNi n'est donc pas diffusé via un support de transmission défini (spray, bactérie, virus...)

Ce tableau est inspiré des travaux menés par les docteurs Ricarda Steinbrecher et Mark Wells sur le forçage génétique⁹¹.



⁹¹ Wells and Steinbrecher, 2022.

ANNEXE 2 : MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

Afin de mettre en évidence les effets hors cible des pesticides ARNi listés dans ce rapport, POLLINIS a comparé la similarité séquentielle entre les gènes des pollinisateurs et ceux des molécules ARNi visant le gène d'un ravageur avec une méthode bioinformatique appliquée grâce au logiciel de comparaison de séquence BLAST.

BLAST permet de comparer les séquences de nucléotides ou de protéines tirées des articles scientifiques listés en ANNEXE 1 à des bases de données de séquences, et ainsi de donner le pourcentage de similarité entre les séquences (et sa significativité statistique).

POLLINIS a défini plusieurs paramètres afin d'identifier les insectes impactés par les pesticides ARNi cités en **ANNEXE 1**.

Percent Identity : sur la base des études scientifiques disponibles, le seuil de 80 % de similarité de séquence entre ARNi et la séquence d'un gène d'un insecte a été fixé pour identifier les insectes potentiellement touchés (cibles ou non). Si plusieurs séquences ont été trouvées lors de la recherche nous avons indiqué la fourchette de similarité.^{85, 86, 87, 88}

Query Coverage : Un faible pourcentage de recouvrement signifie que seule une infime partie des deux séquences est alignée⁸⁹. Nous avons donc choisi une longueur minimale d'alignement des deux séquences comparées au-dessus de 50 % dans BLAST.

E-Value (Expect threshold) : la e-value correspond à la marge d'erreur. Afin d'obtenir une analyse et des résultats fiables, il est nécessaire d'avoir une e-value aussi proche de 0 que possible. Pour cette étude, nous avons choisi une e-value inférieure à 1E-30, pour limiter au maximum le nombre de fausses correspondances.

Max target sequences : ce paramètre permet de définir le nombre maximum de séquences auxquelles la séquence source sera comparée. Nous avons choisi un nombre maximum de 1000.

Les taxids (identité des taxons) recherchés sur BLAST dans le cadre de cette étude sont les suivants :

- Apoidea (taxid :34735)
- Papilionoidea (taxid :37572)
- Hesperidae (taxid :40093)
- Lycaenidae (taxid :124406)
- Zygaenidae (taxid :115354)
- Syrphidae (taxid :34680)
- Bombyliidae (taxid :50674)

⁹¹ Chen *et al.*, 2021.

⁹² Kruminis-Kaszkiel *et al.*, 2018.

⁹³ EFSA, 2017.

⁹⁴ Haller *et al.*, 2019.

⁹⁵ A Guide to BLAST.

Le taxid Spheciformes (taxid :2753468) a été exclu de la recherche.

La viabilité de cette méthodologie a été validée par plusieurs publications scientifiques qui ont utilisé la bioinformatique afin d'évaluer l'efficacité d'un produit ou d'une molécule ARNi sur les insectes ciblés.

Ces publications utilisent la bioinformatique pour identifier chez l'espèce ciblée le gène à inactiver. La méthodologie consiste alors à identifier, dans d'autres études scientifiques, des ravageurs proches homologiquement de l'insecte ciblé. La similarité entre les gènes efficacement inactivés chez les ravageurs ciblés est ensuite testée pour évaluer le potentiel de silençage de ce même gène chez le nouvel insecte. L'évaluation de cette similarité de séquence entre les deux espèces s'opère en utilisant des logiciels tels que BLAST. Si la similarité est élevée, ils concluent que le silençage en visant ce gène avec l'ARNi est également possible chez leur ravageur cible.^{96, 97, 98}

L'OCDE préconise également de procéder à des comparaisons de séquences génétiques entre insectes ciblés et organismes non ciblés, afin d'identifier de potentielles espèces affectées par les pesticides ARNi⁹⁹.

ANNEXE 3 : LEXIQUE

ADN : Acide désoxyribonucléique. Support des informations génétiques d'un organisme, constitué de deux brins enroulés en double hélice et formés chacun d'une succession de nucléotides.

ARN : Acide ribonucléique. Copie d'un des deux segments d'ADN qui est synthétisé lors de la transcription et notamment utilisé par les cellules pour permettre la création de protéines.

- **ARN messenger (ARNm)** : Copie transitoire d'une portion de l'ADN correspondant à un ou plusieurs gènes, utilisé comme intermédiaire par les cellules pour la synthèse des protéines nécessaires à l'expression de fonctions vitales pour l'organisme.
- **ARN interférent (ARNi)** : Acide ribonucléique (ARN) dont l'interférence avec un ARN messenger spécifique conduit à sa dégradation et à la diminution de sa traduction en protéines. Dans la mesure où l'ARN joue un rôle crucial dans l'expression des gènes, l'ARN interférent permet de bloquer celle-ci en rendant le gène « *silencieux* ».
- **ARN double brin (ARNdb)** : ARN double brin. ARN composé de deux brins complémentaires, impliqué dans l'initiation du processus d'interférence par ARN.

CBD : La Convention sur la diversité biologique est un traité international adopté lors du sommet de la Terre à Rio de Janeiro (1992), qui couvre notamment le domaine de la biotechnologie à travers son protocole de Cartagena sur la prévention des risques biotechnologiques. La Conférence des Parties (COP) réunit, tous les deux ans, 196 pays, dont 168 sont signataires de la convention.

⁹⁶ Ghosh & Gundersen-Rindal, 2017.

⁹⁷ Mogilicherla *et al.*, 2018.

⁹⁸ Mehlhorn *et al.*, 2021.

⁹⁹ OECD, 2023, Roberts *et al.*, 2015.

CRISPR/Cas9 : Les ciseaux moléculaires (également appelés « *ciseaux génétiques* ») CRISPR-Cas9 sont un complexe formé d'un brin d'ARN, de séquence homologue à celle de l'ADN que l'on veut modifier, et de l'autre, une enzyme, le Cas9. Ils permettent de couper une zone spécifique du génome et/ou d'y insérer une séquence souhaitée. Les scientifiques à l'origine de ces ciseaux, la microbiologiste Emmanuelle Charpentier et la biochimiste Jennifer Doudna, ont obtenu le prix Nobel de Chimie en 2020.

Cytoplasme : Ensemble des éléments d'une cellule qui se trouvent à l'intérieur de la cellule, à l'exclusion du noyau.

Organismes génétiquement modifiés de première génération (**OGM**) : Produits par transgénèse (introduction d'un gène étranger dans le génome d'un organisme).

NTMG : nouvelles techniques de modification génétique. L'appellation regroupe l'ensemble des nouvelles biotechnologies apparues dans le sillage des progrès réalisés en matière d'ingénierie génétique depuis les années 2000 – notamment suite à l'invention des ciseaux moléculaires CRISPR/Cas9 en 2013. S'y retrouvent les technologies de silençage génétique détaillées dans ce rapport, ainsi que les organismes qui en sont issus.

Ribosome : Petite formation sphérique composée d'ARN et de protéines présente dans le cytoplasme d'une cellule. Les ribosomes synthétisent les protéines en décodant l'information contenue dans les ARN messagers.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Dr. Nicolas Defarge pour son travail de relecture du rapport ainsi que pour la vérification de l'ensemble des données scientifiques issues de BLAST.

Nous remercions également tous les scientifiques qui, par leurs précieux conseils et éclairages, ont permis l'élaboration de ce rapport.

Nous remercions enfin l'ensemble des sympathisants de POLLINIS qui nous ont donné les moyens de réaliser ce travail de recherche.

À PROPOS

PUBLICATION DATE MAI 2023

AUTEURS

Cécile Barbière avec Léo Lamotte et Vanessa Mermet

RECHERCHES SCIENTIFIQUES

Elise Buard

CRÉDITS PHOTOS

Thomas Bresson / Dave Massey / Michel Mergaerts (via Observations.be) / Hugues Mouret / Frank Vassen

*Reproduction of this study is permitted provided that the source [POLLINIS] is mentioned.
Please see www.pollinis.org for more information.*

CONTACT

Cécile Barbière
cecileb@pollinis.org
06 63 93 84 85

POLLINIS

10, rue Saint Marc, 75002 Paris
www.pollinis.org

