

atteignant 4 mois, soit la majeure partie de la saison d'activité des abeilles. De plus, les néonicotinoïdes provenaient majoritairement du pollen de fleurs sauvages, signe que les cultures traitées contaminent les plantes sauvages alentour.

Les chercheurs ont ensuite étudié l'effet du néonicotinoïde le plus répandu dans cette étude, la clothianidine. Dans un rucher expérimental éloigné des cultures, ils ont introduit des abeilles dont les larves avaient été exposées pendant trois semaines aux doses mesurées. Leur espérance de vie a été réduite de un quart par rapport à celle de leurs consœurs. Et si on exposait des colonies entières pendant 12 semaines, leurs comportements mettaient en danger la survie des colonies. Par exemple, elles ne remplaçaient plus leur reine quand elle mourait. Enfin, associé à un fongicide fréquent, le boscalid, la clothianidine devenait deux fois plus toxique pour les abeilles... Conclusion: près des cultures de maïs, que les insectes ne butinent pourtant pas (le pollinisateur du maïs est principalement le vent), les abeilles sont en moins bonne santé.

Dans l'autre étude, menée durant un à deux ans au Royaume-Uni, en Hongrie et en Allemagne sur 33 exploitations de colza isolées, Alex Woodcock, du Centre pour l'écologie et l'hydrologie, au Royaume-Uni, et ses collègues ont étudié l'effet de néonicotinoïdes (clothianidine ou thiaméthoxame) sur diverses espèces d'abeilles vivant à proximité, dans des conditions usuelles de culture (pesticides, fertilisants...). Résultat: les effets dépendaient de l'espèce d'abeille et du pays considérés. Par exemple, les ouvrières de l'espèce domestique *Apis mellifera* proches des champs traités à la clothianidine survivaient moins bien à l'hiver en Hongrie, alors qu'aucun effet similaire n'a été observé en Allemagne. Et chez les abeilles sauvages, plus l'exposition aux néonicotinoïdes était élevée, moins *Bombus terrestris* produisait de reines et moins *Osmia bicornis* produisait d'œufs. En d'autres termes, si l'effet des néonicotinoïdes sur les abeilles est indéniable, il n'est pas le même selon les espèces; il est en outre modulé par des facteurs extérieurs, qui parfois augmentent leur nocivité ou réservent de bonnes surprises, comme en Allemagne... mais qui restent à confirmer et à expliquer. ■

MARIE-NEIGE CORDONNIER

N. Tsvetkov *et al.*, B. A. Woodcock *et al.*, J. T. Kerr, *Science*, vol. 356, pp. 1331-1332 et 1393-1397, 2017

ÉPIDÉMIOLOGIE

Les moustiques OGM ont-ils de l'avenir ?

Le lâcher dans la nature de moustiques génétiquement modifiés pourrait contribuer à réduire les maladies transmises par ces insectes, responsables de un million de décès chaque année. Le 7 juin dernier, le Haut conseil des biotechnologies (HCB) a recommandé d'évaluer de manière approfondie cette approche tout en informant les populations.



Propos recueillis par JEAN-JACQUES PERRIER

FRÉDÉRIC DARRIET
entomologiste médical
à l'IRD de Montpellier
(UMR MIVEGEC)

Comment fonctionnent les techniques de lâchers de moustiques génétiquement modifiés ?

Frédéric Darriet : On lâche des moustiques mâles porteurs d'un gène artificiel, ou transgène, qui s'accouple ensuite avec les femelles sauvages. Le transgène passe alors chez un grand nombre des descendants. Il existe deux grands types de moustiques transgéniques. Dans l'un, le transgène bloque le développement des larves et entraîne leur mort ; c'est ce que propose la société britannique Oxitec avec des souches d'*Aedes aegypti*, le vecteur des virus de la dengue, du chikungunya, de la fièvre jaune et de la fièvre Zika. Dans l'autre approche, le transgène inhibe le cycle de vie du parasite au sein du moustique. Dans les deux cas, on vise à réduire les densités de moustiques vecteurs de pathogènes, mais à chaque fois pour une seule espèce donnée.

Ces approches peuvent-elles constituer une stratégie d'éradication des vecteurs ?

F. D. : Certaines techniques dites de forçage génétique (le gène inséré porte un mécanisme qui favorise sa propagation aux générations suivantes) rendent le transgène très invasif, et visent à l'éradication d'une espèce cible. Mais je n'y crois pas : on peut éradiquer beaucoup d'espèces, mais pas les moustiques ! Quand l'Organisation mondiale de la santé a voulu, dans les années 1950 à 1960, éradiquer le paludisme à grand renfort de DDT, on a juste réussi à sélectionner des moustiques résistants à cet insecticide et à polluer durablement l'eau et les sols. De plus, si l'on élimine un moustique, sa niche écologique risque d'être occupée par une autre espèce, avec des conséquences inconnues. Ainsi, on peut se demander si l'essai à grande échelle mené au Brésil par Oxitec contre *Aedes aegypti* ne va

pas stimuler les populations d'*Aedes albopictus*, le moustique tigre.

Comment faut-il évaluer ces techniques ?

F. D. : Leur efficacité, bien sûr, reste à prouver, notamment sur la propagation des maladies. Surtout, il faudrait étudier de près la « dynamique » du transgène dans les populations naturelles. On ignore ce que devient un gène que l'on intègre dans une population ; rien ne dit qu'il ne passera pas chez une autre espèce en occasionnant des conséquences imprévisibles. La prudence doit être de mise.

Si ces techniques passent la rampe, quel pourrait être leur rôle dans la lutte antivectorielle ?

F. D. : Le HCB souligne à juste titre qu'un seul outil ne réglera pas le problème des maladies à transmission vectorielle. Quand on les utilise bien, les méthodes actuelles de lutte antivectorielle, telles que les moustiquaires imprégnées d'insecticide, limitent les populations de moustiques et les piqûres. Ces méthodes mériteraient d'être plus largement utilisées en Afrique, le continent le plus touché par le paludisme, d'autant qu'elles sont simples à mettre en œuvre et peu coûteuses. La transgénèse de moustiques pourra s'ajouter à cette panoplie si l'on en maîtrise les effets écologiques et les coûts. Elle aurait l'intérêt de diminuer les utilisations d'insecticides, qui entraînent pollutions et phénomènes de résistance. Toutefois, ceux qui en auront l'usage risquent de devenir dépendants d'entreprises privées, comme c'est le cas pour les plantes OGM. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si c'est le Brésil, deuxième producteur mondial de plantes OGM, qui a autorisé les lâchers expérimentaux de moustiques OGM. À l'inverse, en France, les études sur les mâles du moustique tigre rendus stériles par irradiation n'ont à ce jour pas été menées à terme ; à la Réunion, par exemple, après dix ans d'étude, pas un seul moustique stérile n'a encore été lâché dans la nature. ■

Avis du HCB : http://bit.ly/PLS478_HCB

GÉNÉTIQUE

LES SAUTS INDÉSIRABLES DE CRISPR-CAS9

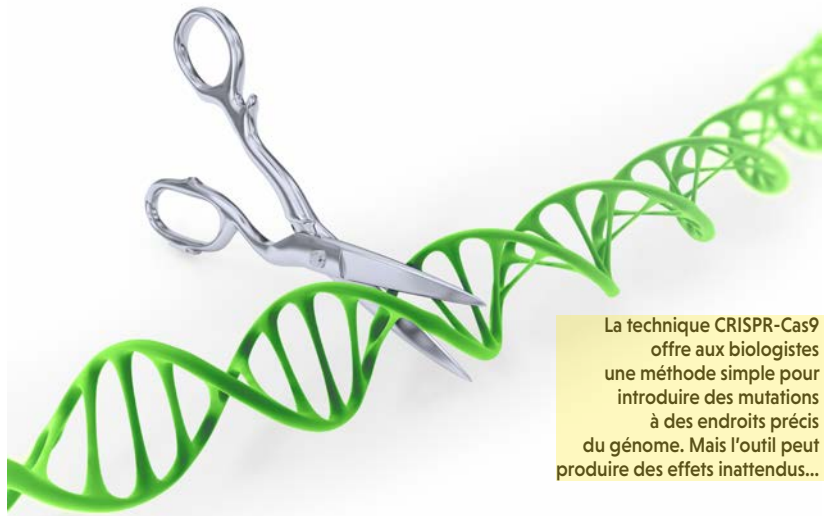
Réputée pour sa précision, cette technique récente de modification du génome perturbe pourtant une étape clé de l'expression des gènes.

CRISPR, une nouvelle marque de céréales? Non, un système de défense immunitaire bactérien qui, depuis quelques années, révolutionne la génétique en offrant un outil simple et précis pour éditer le génome de n'importe quelle cellule. Précis jusqu'à quel point? C'est la question qu'ont récemment soulevée Haiwei Mou, de l'université du Massachusetts, à Worcester, aux États-Unis, et ses collègues en montrant que cette technique entraîne des effets indésirables: des sauts involontaires lorsque la cellule se met à lire et traduire son génome.

Chez les bactéries, CRISPR constitue une sorte de bibliothèque de fragments d'ADN provenant des virus rencontrés. En cas de nouvelle infection virale, les bactéries comparent l'ADN du virus aux fragments de leur bibliothèque. Si une séquence est reconnue, une enzyme, nommée Cas9, coupe l'ADN viral dans cette séquence, ce qui le détruit. Aujourd'hui, nombre de biologistes détournent ce mécanisme pour couper l'ADN des cellules à un endroit ciblé. La technique, nommée CRISPR-Cas9, consiste à associer à l'enzyme Cas9, comme chez les bactéries, un guide – un petit ARN reconnaissant la région du génome à modifier. L'enzyme Cas9 coupe alors l'ADN à l'endroit ciblé, ce qui déclenche sa réparation, soit par recollement des deux bouts séparés, soit par recombinaison avec un fragment d'ADN homologue introduit dans la cellule.

Les biologistes savent que le guide peut reconnaître d'autres séquences ressemblant à sa cible et, en conséquence, développent des techniques pour limiter ce type d'erreur. Mais Haiwei Mou et ses collègues ont pointé une autre difficulté. Habituellement, lorsqu'un gène d'eucaryote est transcrit en ARN messager (l'intermédiaire qui sera traduit en protéine), certains fragments de sa séquence, nommés introns, sont éliminés, tandis que d'autres, les exons, sont conservés. Cet «épissage» est fondamental, car la protéine produite dépend des fragments conservés. Ces chercheurs ont montré que la technique CRISPR-Cas9 produit des épissages non souhaités et pas toujours faciles à détecter.

Ils ont utilisé cette technique pour créer, à partir de cellules cancéreuses de souris, deux



La technique CRISPR-Cas9 offre aux biologistes une méthode simple pour introduire des mutations à des endroits précis du génome. Mais l'outil peut produire des effets inattendus...

35 %

DES MALADIES DUES À UNE MUTATION PONCTUELLE SONT LIÉES À UN ÉPISSAGE DÉFECTUEUX : LA MUTATION PERTURBE LES SAUTS HABITUELLEMENT FAITS LORS DE LA LECTURE DES GÈNES. SOUVENT, LA PERTURBATION CONCERNE UN EXON, C'EST-À-DIRE UNE RÉGION QUI D'ORDINAIRE N'EST PAS SAUTÉE.

lignées où un gène était modifié: dans l'une, un nucléotide (un constituant des gènes) était éliminé d'un exon; dans l'autre, deux nucléotides. Dans les cellules, un gène est lu par triplets de nucléotides: chaque triplet code un acide aminé qui s'ajoute à la protéine en construction. Aussi, en ne supprimant qu'un ou deux nucléotides, on décale la lecture du gène de telle façon que, le plus souvent, la mutation annule son expression. C'était l'effet recherché ici. Toutefois, dans nombre des cellules des deux lignées, au lieu d'annuler l'expression du gène, ces mutations ont entraîné la suppression du seul exon modifié – et la production d'une protéine tronquée.

Mieux, en mutant de même un exon codant une autre protéine, la β -caténine, ils ont montré que non seulement cet exon était fréquemment supprimé, mais la protéine produite était toujours fonctionnelle... et à un mauvais endroit dans la cellule. De plus, des exons voisins étaient aussi touchés. Autrement dit, un gène muté afin qu'il ne soit plus exprimé peut produire une protéine active aux fonctions perturbées. Ces petites mutations introduisent-elles des éléments qui étiquettent l'exon comme devant être omis? Ou au contraire perturbent-elles la signalétique favorisant son épissage? En attendant d'en savoir plus, la recherche des exons «oubliés» va devoir faire partie des contrôles indispensables lors de l'utilisation de CRISPR-Cas9. ■

M.-N. C.

H. Mou et al., *Genome Biology*, vol. 18(1), article 108, 2017