

substitutions prises individuellement. Il y avait donc un effet de synergie entre les deux mutations, ce qu'on appelle en génétique de «l'épistasie».

Enthousiasmé par ces travaux, Noah Whiteman s'est à son tour impliqué dans cette recherche, en se focalisant sur la compréhension des phénomènes de convergence. En premier lieu, son groupe a découvert qu'il fallait ajouter la position 119 aux deux autres pour compléter la liste des sites clés de la résistance au glycoside. Se posait alors une question : les trois substitutions se sont-elles réalisées indépendamment les unes des autres au fil de l'évolution, ou y a-t-il eu un ordre privilégié, un chemin évolutif particulier ?

Les études comparatives chez les insectes montrent que les substitutions des sites 111 et 122 sont souvent associées. La substitution du site 119 a un statut particulier. Elle paraît coévoluer avec celle du site 111, mais, seule, ne provoque aucune résistance au glycoside, et on la trouve fréquemment chez d'autres insectes qui ne sont pas confrontés à cette molécule. Des chemins mutationnels privilégiés semblent donc exister. Mais quels sont-ils ?

Si de tels chemins existent, ils doivent répondre à trois prédictions : l'adaptation au glycoside doit augmenter au fur et à mesure des mutations (par exemple par une tolérance à des concentrations de poison de plus en plus élevées) ; par ailleurs, une séquestration de plus en plus importante du glycoside doit être autorisée ; enfin, l'épistasie doit jouer pour augmenter la résistance au glycoside. Vu l'ampleur du travail, Noah Whiteman et ses collègues se sont focalisés sur le chemin mutationnel du monarque, en tentant de le mimer chez la drosophile au moyen de la nouvelle technique d'édition du génome nommée CRISPR-Cas9. Ils ont ainsi trouvé un chemin possible qui permet d'obtenir une «drosophile-monarque» en satisfaisant pas à pas aux trois prédictions : tout d'abord la substitution en 111 ; en même temps ou après, celle en 119, puis celle en 122. Mais il est vraisemblable que d'autres existent.

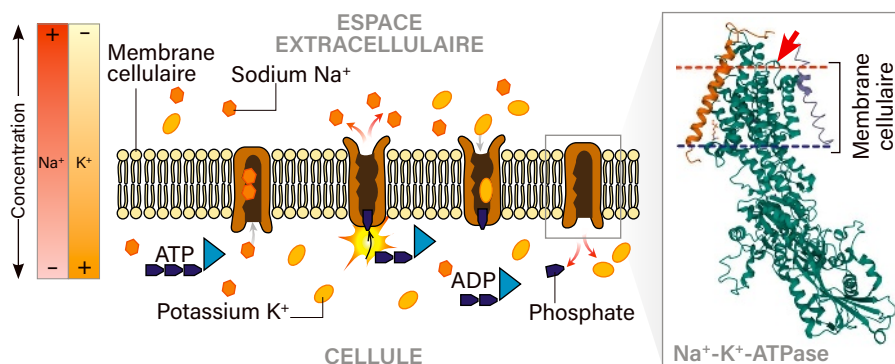
LE CARDINAL DÉMASQUÉ

C'est alors seulement que Noah Whiteman et Simon Groen se sont interrogés sur les prédateurs des monarques : ces insectivores pouvaient-ils, à leur tour, acquérir une protection contre le glycoside ? Les deux chercheurs ont donc séquencé chez certains prédateurs la portion du gène de l'enzyme correspondant

LE RÔLE ESSENTIEL DE LA POMPE $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$

Toute cellule vivante présente un potentiel de membrane (une différence de charges électriques, la face interne étant négative et la face externe, positive), assuré par un déséquilibre ionique entre le cytoplasme et l'extérieur de la cellule. Les ions potassium K^+ , entre autres, sont majoritaires à l'intérieur de la cellule et les ions sodium Na^+ , majoritaires à l'extérieur. Moyennant une dépense énergétique, la protéine $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-ATPase}$ maintient continuellement ces différences de concentration en rejetant des ions Na^+ hors de la cellule et en faisant entrer des ions K^+ dans la cellule. Le schéma ci-dessous présente les quatre états importants de l'enzyme. La pompe a une forte affinité avec l'ATP (source d'énergie) et les ions Na^+ ; elle récupère un groupe phosphate de l'ATP (phosphorylation), ce qui la referme sur trois ions Na^+ ; son affinité augmente alors pour les ions K^+ ; elle libère les trois ions Na^+ et gagne deux ions K^+ ; une déphosphorylation spontanée a alors lieu, qui libère les ions K^+ et rend à l'enzyme son état initial.

L'enzyme est une protéine complexe composée de plusieurs sous-unités. L'unité notée α comporte dix segments transmembranaires qui forment le pore par où voyagent les ions. Le glycoside toxique de l'asclépiade se lie à une boucle extracellulaire de cette unité (flèche), ce qui obture en partie le pore et altère le fonctionnement de la pompe.



à la fameuse boucle où, chez le monarque, ont lieu les substitutions. Résultat : les sites 111 et 119 sont substitués chez le cardinal à tête noire ! C'est aussi le cas chez la souris à oreilles noires. Et même chez la guêpe parasitoïde *Trichogramma pretiosum*, qui pond ses œufs dans la chenille du monarque.

Curieusement, toutes les espèces de nématodes (de minuscules vers) séquencées présentaient de telles substitutions, alors que bon nombre ne sont jamais confrontées au glycoside. Seule l'une d'elles, *Steinernema carpocapsae*, portait en plus une substitution au site 122. Une espèce justement connue pour consommer sans souci les chenilles du monarque... Ainsi, des prédateurs aussi différents que oiseaux, mammifères, insectes ou nématodes paraissent avoir suivi un chemin mutationnel mimant celui du monarque, de manière incomplète ou complète. D'un point de vue écologique, on assiste à un effet domino avec des convergences évolutives étonnantes. Jusqu'où ira-t-il ? ■

BIBLIOGRAPHIE

- S. Groen et N. Whiteman, **Convergent evolution of cardiac-glycoside resistance in predators and parasites of milkweed herbivores**, *Curr. Biol.*, 2021.
- M. Karageorgi et al., **Genome editing retraces the evolution of toxin resistance in the monarch butterfly**, *Nature*, 2019.
- N. Whiteman et K. Mooney, **Insects converge on resistance**, *Nature*, 2012.
- S. Dobler et al., **Community-wide convergent evolution in insect adaptation to toxic cardenolides by substitutions in the $\text{Na},\text{K}\text{-ATPase}$** , *PNAS*, 2012.

ABONNEZ-VOUS À


Pour la Science
3 FORMULES
AU CHOIXFORMULE
PAPIERFORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIEFORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

59€

Au lieu de 82,80€

79€

Au lieu de 114,40€

99€

Au lieu de 174,40€

29 %

de réduction *

31 %

de réduction *

43 %

de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Service Abonnement Groupe Pour la Science – 235 avenue Le Jour se Lève – 92100 Boulogne Billancourt – email : serviceclients@groupepourlascience.fr

PAG22STD


**OUI, je m'abonne
pour 1 an à**


1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE
PAPIER

• 12 n° du magazine papier

59€

Au lieu de 82,80€

1-F-PAP-N-12N-59€

☐ FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE
• 12 n° du magazine papier
• 4 Hors-série papier

79€

Au lieu de 114,40€

1-F-HSPAP-N-12N-79€

☐ FORMULE
INTÉGRALE
• 12 n° du magazine
(papier et numérique)
• 4 Hors-série
(papier et numérique)
• Accès illimité aux contenus en ligne

99€

Au lieu de 174,40€

1-F-INT-N-12N-99€

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal [] [] [] [] [] [] Ville :

Téléphone [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []

Email : (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science

☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science en nous retournant ce bulletin d'abonnement complété
**Pour un paiement par carte bancaire,
rendez-vous sur boutique.groupepourlascience.fr**

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2023 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site boutique.groupepourlascience.fr. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément les numéros de Pour la Science pour 6,90 € et les hors-séries pour 7,90 €.

En souscrivant à cette offre, vous acceptez nos conditions générales de vente disponibles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/CGV-PLS>. Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pouirlascience.fr.