

> Regardons ce qui se passe pour un anneau mince en rotation (une analyse plus générale aboutirait à la même conclusion). Pour comprendre la nature des contraintes mécaniques dans le matériau, une bonne image est celle du lasso avec sa corde en forme d'anneau (voir l'encadré page précédente). À cause de la rotation, chaque petit morceau de la corde subit une force centrifuge, dirigée vers l'extérieur, proportionnelle au produit du rayon de l'anneau par le carré de la vitesse de rotation. Cependant, la forme de la corde est déterminée par la tension qui y règne tout du long. En imposant l'équilibre des forces centrifuge et de tension, on détermine cette dernière ainsi que la contrainte dite «de traction», homogène à une pression, qui s'exerce dans la corde.

RÉSISTANCE DU MATÉRIAU À LA TRACTION...

On trouve que la contrainte de traction est égale au produit de la masse volumique du matériau par le carré de la vitesse, c'est-à-dire à deux fois la densité volumique d'énergie cinétique. Il s'ensuit qu'à volume donné, l'énergie maximale stockable dans un anneau en rotation (et plus généralement un volant d'inertie) est limitée par la contrainte de traction maximale que supporte le matériau, donc par sa résistance mécanique. Elle ne dépend pas, ce qui est inattendu, de la masse volumique ou de l'inertie (la masse) du volant.

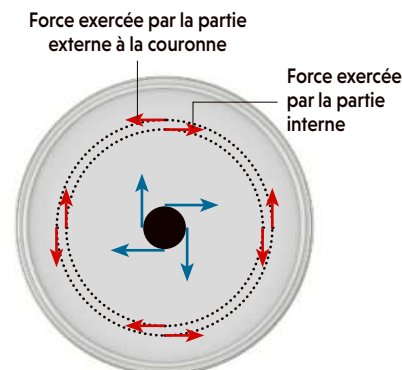
Il est ainsi avantageux d'utiliser un matériau d'une bonne résistance mécanique et peu dense, auquel on pourra imprimer une rotation plus rapide qu'avec un matériau plus dense. On préférera donc la fibre de carbone (1,6 tonne par mètre cube), qui résiste à une contrainte de 4900 mégapascals, à l'acier (8 tonnes par mètre cube), qui cède à 1450 mégapascals: les densités d'énergie maximale sont de 3 mégajoules par kilogramme pour la fibre de carbone et de 0,18 mégajoule par kilogramme pour l'acier.

... ET AU CISAILLEMENT

Pourquoi alors ne pas utiliser exclusivement de la fibre de carbone, légère et résistante? Parce qu'il faut exercer un couple important sur le volant pour l'accélérer ou le freiner. Cela se fait à partir de l'axe central, chaque couronne du volant exerçant sur la couronne suivante, vers l'extérieur, une force qui la met en mouvement, et ainsi de suite de proche en proche. Cela se traduit par l'apparition, dans tout le volume du volant, d'une autre contrainte, dite de cisaillement, qui

CISAILLEMENT DANS LE VOLANT

L'accélération ou le freinage d'un volant d'inertie s'effectue en exerçant un couple sur son axe (flèches bleues). Les forces correspondantes se transmettent alors de proche en proche, de l'axe à la périphérie. Elles sont tangentielles et décroissent à mesure que l'on s'écarte de l'axe. Il leur correspond une contrainte de cisaillement qui est maximale près de l'axe (on a représenté ici par des flèches rouges les contraintes de cisaillement s'exerçant sur une mince couronne cylindrique). C'est pourquoi on conçoit des volants d'inertie dont la partie centrale est en acier, bien résistant au cisaillement, tandis que la partie périphérique est en matériau composite, bien résistant aux contraintes de traction (qui augmentent avec la distance à l'axe).



est maximale près de l'axe et qui diminue jusqu'à s'annuler à la périphérie (voir l'encadré ci-dessus).

Or les matériaux composites résistent bien à la traction, mais très mal au cisaillement. On conçoit donc des volants d'inertie dont la partie centrale est en acier, pour un transfert efficace de puissance entre l'axe et la roue, tandis que cette partie centrale est entourée d'un matériau composite résistant bien aux contraintes de traction et supportant donc des vitesses de rotation très élevées.

Les volants rapides les plus performants ont ainsi une densité d'énergie maximale de 0,7 mégajoule par kilogramme, bien supérieure à celle de l'acier et désormais comparable à celle des batteries au lithium-ion. C'est le cas des volants d'inertie conçus en 2006 et destinés aux voitures de formule 1 pour récupérer l'énergie lors des freinages et la redonner lors des accélérations.

Par exemple, dans un modèle de chez Flybrid, un cylindre de 20 centimètres de diamètre, en acier et en fibre de carbone, tourne à 64500 tours par minute et emmagasine près de 0,6 mégajoule. Ces performances sont en fait limitées par le règlement de la formule 1, qui interdit aux volants d'inertie de dépasser une puissance de 60 kilowatts. On envisage cependant leur utilisation dans les voitures de tourisme dès 2020. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. E. Amiryar et K. R. Pullen, **A review of flywheel energy storage system technologies and their applications**, *Applied Sciences*, vol. 7(3), article 286, 2017.

M. Hedlund et al., **Flywheel energy storage for automotive applications**, *Energies*, vol. 8(10), pp. 10636-10663, 2015.

M. Krack et al., **Rotor design for high-speed flywheel energy storage systems**, in R. Carbone (dir.), *Energy Storage in the Emerging Era of Smart Grids*, InTech, 2011.

n° 34 : décembre 2019

Le moustique tigre histoire d'une conquête



Vente en kiosque,
par abonnement
et par correspondance

Sur notre nouveau site
especes.org

vous pouvez désormais
vous abonner au format
papier ou numérique,
commander nos numéros,
consulter les sommaires,
les compléments d'articles,
les actualités de la revue...



La revue de vulgarisation scientifique
entièrement dédiée aux sciences
de la vie et de la Terre

Revue trimestrielle publiée
par l'association Kyrnos publications
association.kyrnos@gmail.com

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne Université,
à Paris

L'IMPÉNÉTRABLE VENIN DU SERPENT À SONNETTES

Les crotales de Mojave, une espèce américaine de serpent à sonnettes, n'ont pas toujours le même venin, sans que l'on sache vraiment quels sont les critères de sa sélection...

Les recherches mènent parfois les scientifiques vers des contrées inattendues. Qui aurait pensé que la recherche médicale sur les venins de serpents conduirait les biologistes vers une curiosité de l'évolution? C'est pourtant ce qui s'est produit lorsque l'on s'est intéressé aux venins des serpents à sonnettes.

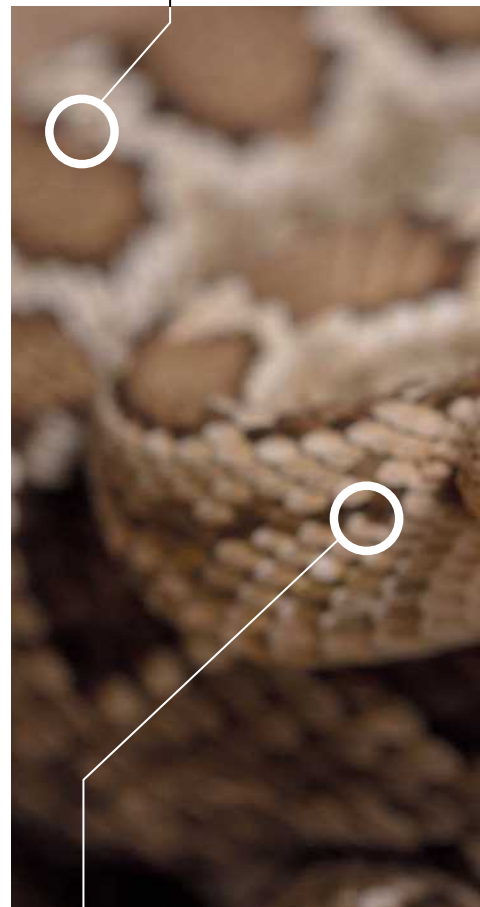
Depuis longtemps, on étudie les venins afin de produire des antidotes en cas de morsure. De plus, depuis une vingtaine d'années, on sait que certaines de leurs molécules ont des actions très spécifiques sur la communication entre neurones. Diverses équipes les utilisent donc aussi pour progresser dans la compréhension des mécanismes moléculaires de la transmission nerveuse.

Dans ce contexte, les crotales (ou serpents à sonnettes), des vipéridés du

continent américain, sont très étudiés, car ce sont eux qui infligent les principales morsures. En effet, dotés de robustes crochets, ils inoculent de puissants venins constitués de plusieurs dizaines de molécules toxiques, avec une relativement grande variabilité. En les examinant, les biologistes ont découvert que, chez les crotales, il existe deux grands types de venins, correspondant à deux stratégies de morsure. Le venin de type A, hautement létal, est caractérisé par la présence de phospholipases A₂, des enzymes neurotoxiques qui agissent très rapidement en paralysant la proie. Le venin de type B, moins toxique, contient des métalloprotéinases, des enzymes qui ont une activité protéolytique et hémorragique.

La distribution de ces types de venins dans la phylogénie des crotales (l'arbre de parenté des différentes espèces) est

La « sonnette » est appelée cascabelle. À chaque mue (entre une et trois fois par an), un anneau y est ajouté.



Les crotales de Mojave (à ne pas confondre avec les crotales diamantines) sont parmi les serpents les plus venimeux, mais leur morsure est moins douloureuse que celle des autres espèces nord-américaines.



Hervé Le Guyader
a récemment publié :
**L'Aventure de
la biodiversité**
(Belin, 2018).

EN CHIFFRES

41

On connaît 41 espèces de crotales.
Elles vivent toutes en Amérique.

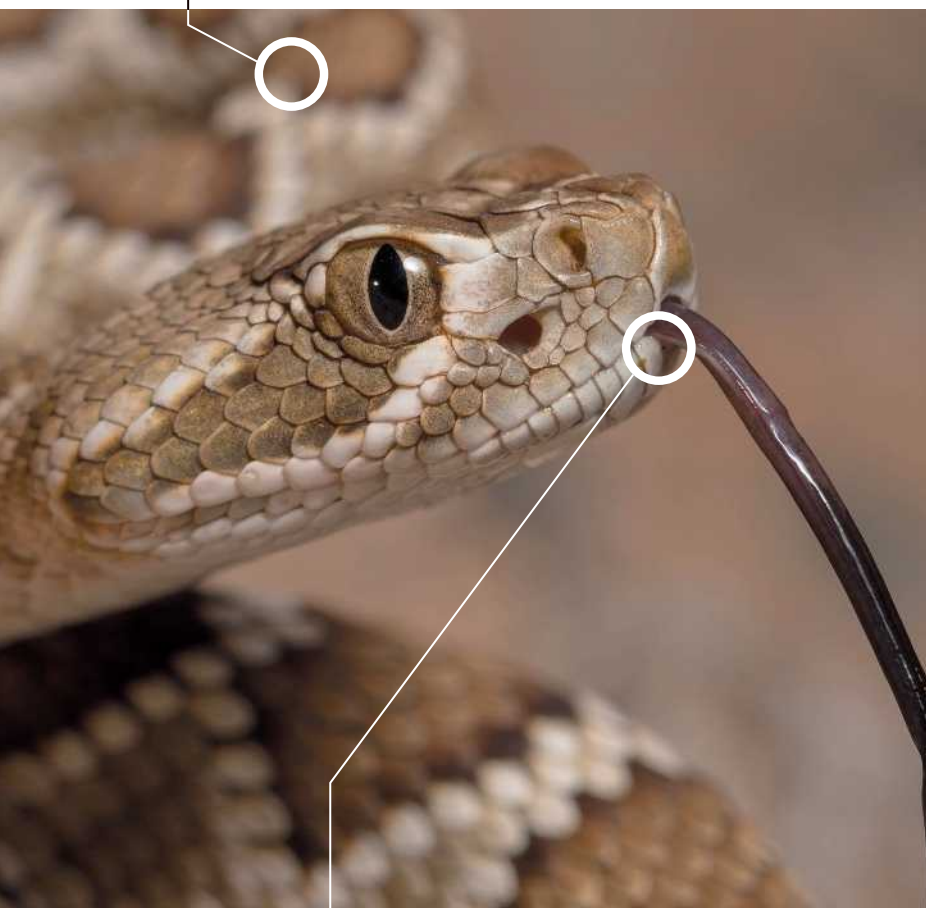
96

Dans le venin de type A,
on a répertorié 96 gènes codant
des toxines (115 dans celui de type B).

ENVIRON 0,3 MG/KG

La dose létale chez la souris est
de 0,22 à 0,46 mg/kg pour le venin A
et 2 à 6 mg/kg pour le venin B.

En général, une morsure suffit
à tuer la souris, que le crotale injecte
le venin A, le B ou un mélange des deux.



Les femelles sont
vivipares. Elles portent
entre 2 et 17 petits.

Les crotales de Mojave
à venin de type A
ont les crochets les
plus robustes.

très irrégulière, deux espèces apparen-
tées pouvant présenter des types diffé-
rents. On a tout d'abord pensé que chaque
espèce était homogène et que tous les
individus d'une même espèce avaient le
même type de venin. L'hypothèse com-
munément admise était que ces venins
étaient corrélés aux proies, le type A plu-
tôt pour les petits mammifères, le type B
plutôt pour les lézards. Mais le crotale
de Mojave (*Crotalus scutulatus*) a brouillé
les cartes.

UN CROTALE, DEUX VENINS

Ce serpent américain est l'un de ceux
que les zoologistes étudient depuis

longtemps. Quelle n'a pas été leur sur-
prise de découvrir qu'à l'intérieur de cette
espèce, il pouvait y avoir des animaux à
types de venin différents! On distinguait
en effet des individus de type A, de type B,
et même de type A + B.

Sur des critères morphologiques, les
zoologistes avaient par ailleurs décrit
deux sous-espèces de crotales de Mojave:
C. s. salvini se trouve dans le Mexique, tan-
dis que *C. s. scutulatus* est répartie plus au
nord. Tout naturellement, une équipe
américano-mexicaine, autour de
Christopher Parkinson, de l'université de
Clemson, en Caroline du Sud, s'est inté-
ressée à la structure des populations et a
recherché de possibles corrélations entre
les types de venins et l'environnement.
Les animaux se distribuent du nord au
sud suivant quatre populations distinctes
(voir l'encadré). Si la plus méridionale, de
la sous-espèce *salvini*, ne comprend que
des serpents de type A, les trois autres
populations sont hétérogènes. De plus,
celle qui borde la sous-espèce *salvini* com-
prend des individus de type A + B.

LE RÔLE DE LA TEMPÉRATURE

Très vite, l'équipe résout le problème
des animaux de type A + B. Ce ne sont pas
des serpents mieux outillés que les autres,
mais des hybrides qui ne présentent
aucun avantage sélectif (sinon, ils auraient ➤



Crotale de Mojave
(*Crotalus scutulatus*)

Longueur : environ 1 m (max. 1,4 m)

> envahi la population). Reste l'énigme des populations de type A et de type B. Une étude fine de l'environnement révèle que le facteur le plus important est la température, le type B préférant un climat plus modéré. Mais le point le plus décisif concerne l'échelle géographique de l'étude. À part la sous-espèce *salvini*, chacune des trois autres populations est hétérogène: il faut donc aller à une échelle plus fine pour trouver la corrélation avec l'environnement. En d'autres termes, le type de venin est sélectionné à l'échelle de micropopulations. Mais à cette échelle, la température est-elle vraiment un critère de sélection ou seulement corrélée à un critère inconnu?

UN COMPLEXE DE GÈNES

Une autre équipe internationale, autour de Wolfgang Wüster, de l'université de Bangor, au Royaume-Uni, s'est tout récemment penchée sur ce problème. L'étude a d'abord porté sur la génomique. L'équipe a ainsi observé que la présence ou l'absence de 14 toxines est corrélée non pas à l'expression ou non de certains gènes, mais à la présence ou l'absence des gènes correspondant aux toxines. De plus, dans le génome, nombre de ces gènes sont liés et forment des complexes sur les chromosomes. Curieusement, ces liaisons sont détruites dans le génome des animaux de type A + B. La sélection naturelle aurait donc favorisé les gènes assemblés en complexe.

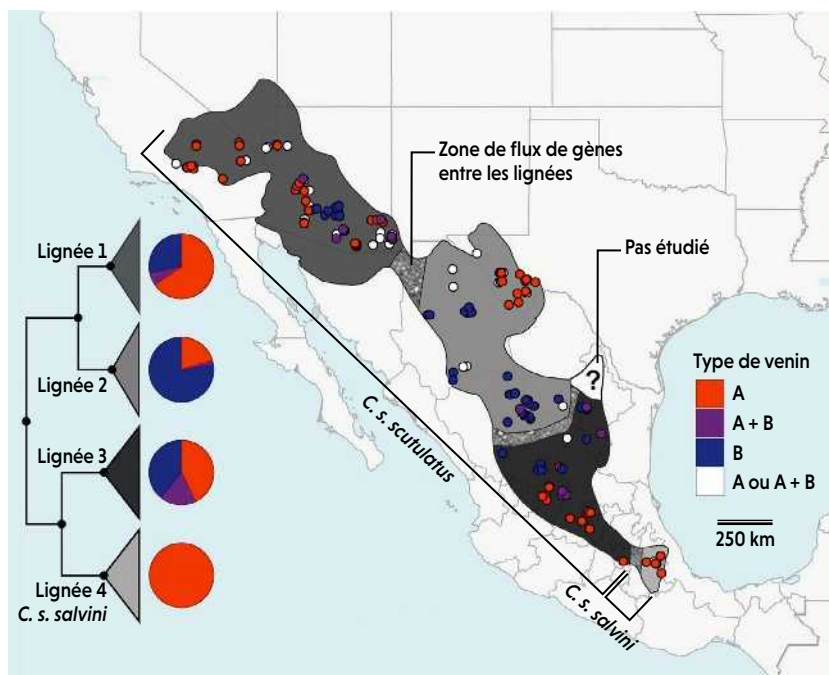
L'équipe de Wolfgang Wüster s'est aussi intéressée à l'hypothèse selon laquelle les deux types de venin seraient associés à des proies différentes. Elle a ainsi déterminé la composition des repas d'une cinquantaine de serpents. Ils se nourrissent majoritairement de rongeurs (78%), mais aucune corrélation n'apparaît entre le type de proie (rongeur ou lézard) et le type de venin.

ET TOUJOURS LA TEMPÉRATURE

Par ailleurs, l'équipe a recherché des corrélations avec des variables définissant l'environnement et, comme celle de Christopher Parkinson, elle a observé que la température était le facteur déterminant. Son étude, plus fine, montre que les zones où vivent les animaux de type B sont caractérisées par de plus grandes fluctuations thermiques diurnes, des hivers plus doux et une moindre variation saisonnière des précipitations. Mais quelle est la véritable pression de sélection? Un ou plusieurs facteurs, à leur tour corrélés à la température? Les chercheurs

DES VENINS À LA CARTE

Si l'on rencontre les crotales de Mojave dans les zones désertiques allant du sud de la Californie et du Nouveau-Mexique jusqu'au sud du Mexique, la sous-espèce *C. s. salvini* n'apparaît qu'au Mexique, à l'extrême sud de l'aire de répartition. Plus au nord, trois lignées, séparées géographiquement, appartiennent toutes à la sous-espèce *C. s. scutulatus*. Mais alors que les serpents *salvini* ont tous un venin de type A (en rouge), les serpents *scutulatus* arborent des venins A, B (en bleu) ou A + B (en violet).



se trouvent dans une situation intellectuelle étonnante: du fait de l'hétérogénéité spatiale ainsi décrite, ils sont capables de prédire le type de venin des serpents... mais la véritable pression de sélection reste toujours un mystère!

Comment résoudre le problème? Une première piste consiste à revenir à des comparaisons entre espèces, peut-être plus faciles à étudier que les micropopulations du crotale de Mojave. C'est ainsi que l'équipe de Sean Carroll, à l'université du Wisconsin, a séquencé les complexes de gènes de toxines des crotales de Mojave, mais aussi d'autres espèces proches, comme le crotale du Pacifique Sud (*Crotalus oreganus helleri*), vivant en Californie, et le crotale des bois (*Crotalus horridus*), de l'est du continent nord-américain. Mais tout est si compliqué qu'il a été impossible de savoir si le polymorphisme actuel du crotale de Mojave est le résultat d'un polymorphisme ancestral ou le fruit d'une hybridation d'espèces... comme celle, démontrée, entre les crotales de Mojave et du Pacifique Sud! Gageons que l'ajout de nouvelles espèces, allié à de nouvelles études d'écologie, fournira la solution du mystère. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. Zancolli et al., **When one phenotype is not enough : Divergent evolutionary trajectories govern venom variation in a widespread rattlesnake species**, *Proc. R. Soc. B*, vol. 286, article 20182735, 2019.

T. Jackson et al., **Snake venom in context : Neglected clades and concepts**, *Front. Ecol. Evol.*, vol. 7, article 332, 2019.

J. L. Strickland et al., **Evidence for divergent patterns of local selection driving venom variation in Mojave rattlesnakes (*Crotalus scutulatus*)**, *Scientific Reports*, vol. 8, article 17622, 2018.

N. L. Dowell et al., **Extremely divergent haplotypes in two toxin gene complexes encode alternative venom types within rattlesnake species**, *Curr. Biol.*, vol. 28, pp. 1016-1026, 2018.

DURÉE LIBRE

3 FORMULES AU CHOIX

BULLETIN D'ABONNEMENT

Pour la Science – Service abonnements – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email: pourlascience@abopress.fr

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

PAG19NOE

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐

FORMULE PAPIER

- 12 n° du magazine papier
- + **UN CADEAU**

DPV4E90K5

4,90€
PAR MOIS

☐

FORMULE PAPIER + HORS SÉRIE

- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier
- + **UN CADEAU**

PPV6E50K12

6,50€
PAR MOIS

☐

FORMULE INTÉGRALE

- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne
- + **UN CADEAU**

IPV8E20K12

8,20€
PAR MOIS

2 / Mes coordonnées

Nom:
Prénom:
Adresse:
.....
Code postal [] [] [] [] [] Ville:
Tél.: [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] [] []
E-mail:@.....
(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

Durée d'abonnement : 1 an. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/05/2020 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pourlascience.fr>. Photos non contractuelles. Vous pouvez acheter séparément chaque élément de cette offre : les numéros de *Pour la Science* pour 6,90 €, les numéros de *Pour la Science Hors-série* pour 7,90 € et le livre Une histoire de flou pour 20,00 €.

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 utilisons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et nous 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://ebran.fr/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@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 – Sarl au capital de 32 000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 58.14 Z

3 / Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal | | | | | Ville: | | | | |

Discussion

Designation du compte a debiter

BIC (Identification internationale de la banque) _____

[illegible]

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Etablissement teneur du compte

Nom:

Adresse:

Code postal Ville :

Date et signature **Organisme Créancier: Pour la Science**
170 bis bd du Montparnasse - 75014 Paris

170 bis, bd. du Montparnasse – 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900

N° de référence unique de mandat (RUM) _____

1 / MERCI DE JOINDRE

4 IMPERATIVEMENT UN RIB Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire