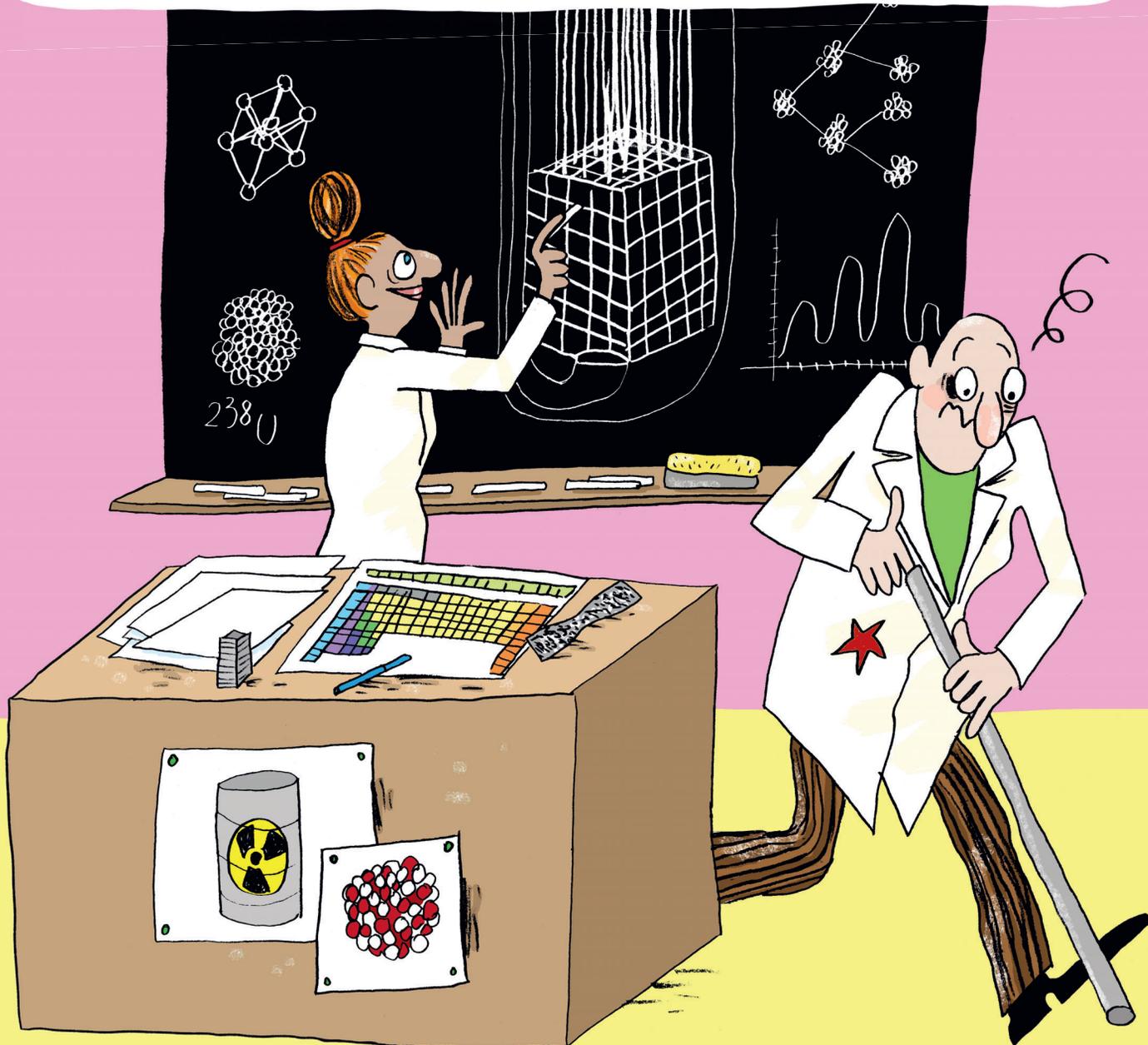


AU CŒUR DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

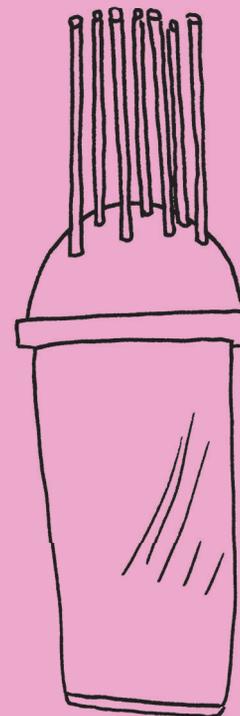


AYÉ, C'EST BIEN
TOUT FERMÉ, VOUS
POUVEZ LANCER
LE TEST !

Outre l'uranium, servant à la réaction nucléaire, on trouve dans le cœur d'une centrale nucléaire divers matériaux qui sont très sollicités pendant le cycle de production d'électricité.

En raison des conditions extrêmes de pression, température et irradiation qui y règnent, le réacteur nécessite un pilotage très précis, et il est indispensable de mesurer et de contrôler le plus finement possible la résistance de ses composants.

Cet album propose de comprendre la spécificité et les enjeux du cycle de production nucléaire, à travers le travail de onze doctorants du centre CEA Paris-Saclay : Valentin Drouet, Bertrand Leturcq, Stanislas de Lambert, Anaïs Baumard, Liangzhao Huang, Jean-Michel Scherer, Gabriel Spartacus, Meriem Bouguezzi, Erwan Dupuis, Kévin Touchet et Lizaveta Fralova.



Le Commissariat à l'énergie atomique a été créé à la sortie de la guerre afin de mener des recherches visant à développer des applications de l'énergie nucléaire dans les secteurs de la médecine, de l'énergie et de la défense.

Trois quarts de siècle plus tard, le CEA a élargi son domaine d'activité, et est devenu un des plus grands centres de recherche du monde. Il couvre dorénavant un grand nombre de champs : biologie, ingénierie, recherche fondamentale, génétique, intelligence artificielle ou encore énergies renouvelables, sous le nom, depuis 2010, de Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.



17 € - www.edpsciences.org



9782759825547

ISBN : 978-2-7598-2554-7

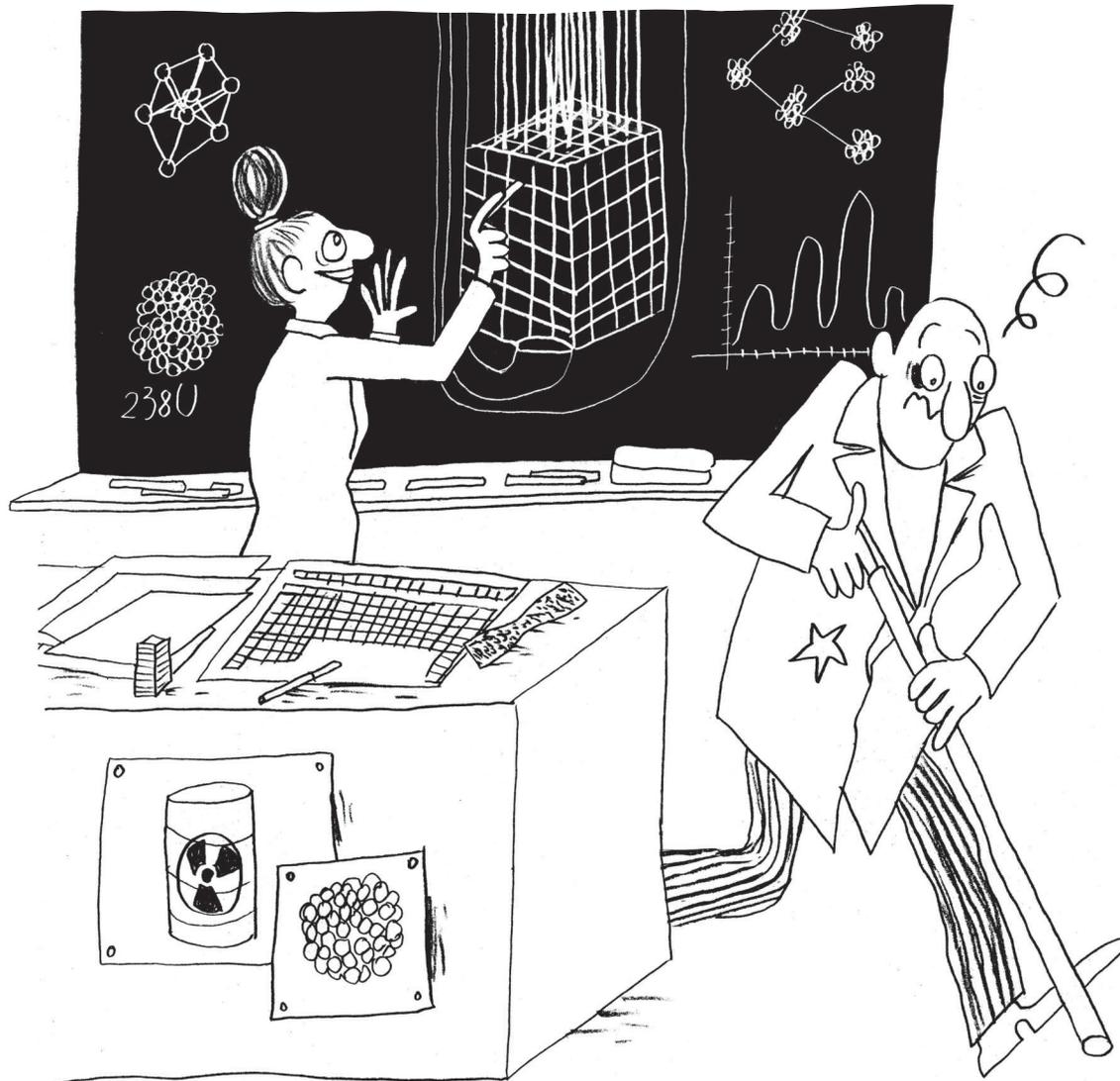
MA RECHERCHE AU cea

volume 1

Je dédie cette collection à PB.

PEB

AU CŒUR DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE



Ce livre a été réalisé à l'initiative du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), en collaboration avec les doctorants et encadrants du site de recherche de Paris-Saclay.

COMMUNIQUER auprès d'un large public sur la recherche, l'énergie nucléaire et les matériaux est à la fois une gageure et une nécessité pour contribuer à la diffusion des connaissances dans le secteur de la transition énergétique. C'est au travers de planches de bande dessinée, illustrant les travaux de onze doctorants ayant effectué leur thèse au CEA sur le site de Paris-Saclay CEA, que PEB et Zoé Thouron ont relevé le défi.

À la Direction des Énergies du CEA, nous accordons une importance particulière à la formation par la recherche, avec plus d'une centaine de nouvelles thèses chaque année. Durant trois ans, les doctorants, issus des meilleures formations scientifiques nationales et internationales, effectuent des recherches sur des sujets pointus, encadrés par des ingénieurs-chercheurs chevronnés. Au cours de la lecture de cet album, vous découvrirez les moyens à la pointe de la recherche dont ils disposent pour l'élaboration, la caractérisation et la modélisation numérique des matériaux pour le nucléaire.

Dans un réacteur nucléaire, les matériaux doivent résister à des conditions extrêmes : température, pression, irradiation par les neutrons issus des réactions nucléaires et corrosion par l'eau présente dans le réacteur. Pour maîtriser ces effets, qui peuvent être couplés entre eux, il est essentiel de pouvoir les étudier depuis l'échelle de la structure atomique jusqu'à celle des composants du réacteur. Il faut par ailleurs souligner que les connaissances développées pour les matériaux du nucléaire peuvent aussi intéresser d'autres secteurs industriels : l'aéronautique, l'automobile ou l'industrie chimique, mais aussi ceux des autres énergies bas carbone et du stockage de l'énergie.

J'espère que cet album, original dans son approche, scientifique dans son contenu et se voulant accessible à un lecteur curieux, vous permettra de mieux comprendre le fonctionnement d'une centrale nucléaire et les enjeux liés aux matériaux qui la constituent, ainsi que le métier de chercheur.

Puisse cette lecture susciter de nouvelles vocations dans le domaine de la science et de la technologie, sur lesquelles reposent les innovations dont nous avons plus que jamais besoin pour réussir la transition énergétique et construire le monde de demain.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce livre.

Philippe Stohr
Directeur des Énergies au CEA

LA Direction des Activités Nucléaires de Saclay a pour mission de développer les sciences de base pour l'énergie nucléaire. Elle s'appuie sur une palette de disciplines pour pouvoir en appréhender toutes les phases, depuis la mine d'uranium jusqu'au stockage ultime des déchets, en passant par la production d'électricité dans les réacteurs. Les grands domaines scientifiques et techniques abordés sont la physique des réacteurs, la mécanique, la thermohydraulique, la physico-chimie et les matériaux et leur comportement sous irradiation. La démarche mise en œuvre s'appuie sur la réalisation d'expériences analytiques destinées à comprendre les phénomènes et développer ainsi une science prédictive, grâce à des modélisations multi-échelles et couplant plusieurs disciplines.

Les recherches s'inscrivent dans un contexte d'optimisation et d'une sûreté encore plus poussée des réacteurs actuels, tout en justifiant les solutions envisagées pour une gestion responsable des déchets nucléaires. Elles visent également à préparer l'avenir en s'appuyant sur des études spécifiques aux réacteurs de petite taille (SMR - Small Modular Reactors) déployables à court et moyen termes et aux réacteurs de 4^e génération à plus long terme pour une meilleure utilisation des ressources et une gestion optimisée des déchets.

La conservation du niveau d'excellence requis sur ces programmes de recherche à fort enjeu s'appuie sur des chercheurs de premier plan et des équipements remarquables. Mais la créativité et la capacité d'innovation sont également particulièrement soutenues grâce aux 150 doctorants présents dans les laboratoires.

Lorsque le projet de Ma recherche au CEA m'a été proposé, il m'a semblé être le prolongement naturel de Ma thèse en 180 secondes, exercice délicat qui consiste à expliquer pour un doctorant le contexte et les enjeux de sa thèse en un temps très court et à un public de non-spécialistes. Neuf mois plus tard, j'avoue être époustoufflé par le résultat du travail de PEB et Zoé, qui ont su avec justesse et humour appréhender des sujets complexes et les restituer sous une forme accessible à tous.

La qualité de ce travail ouvre des perspectives pour la suite de ce projet. En effet, les outils et compétences développés sont transposables aux autres énergies bas carbone que sont les énergies renouvelables (ENR), et, dans un contexte d'urgence climatique, notre mission a évolué, comme en témoigne le changement récent de nom de notre direction, qui est devenue l'Institut des Sciences Appliquées et de la Simulation pour les énergies bas carbone. Nous pourrions ainsi mettre à profit toutes nos compétences pour développer les ENR et optimiser le bouquet énergétique français (nucléaire, hydraulique, éolien et solaire) très fortement décarboné. De la sorte, cet ouvrage et ceux qui suivront, je l'espère, permettront de communiquer auprès du plus grand nombre sur nos avancées scientifiques et leur contribution sociétale.

Pascal Yvon

Directeur de l'Institut des Sciences Appliquées
et de la Simulation pour les énergies bas carbone

QUAND Valérie L'Hostis et Damien Féron m'ont demandé, début 2019, si j'accepterais de solliciter PEB (Pierre-Étienne Bertrand) pour illustrer quelques pages de l'ouvrage hautement corrosif Pourquoi faut-il toujours repeindre la tour Eiffel ? Une histoire de rouille (EDP Sciences, 2019), cela a été pour moi le début d'une riche et passionnante aventure !

En découvrant tout d'abord son ouvrage Ma thèse en 2 planches, 33 thèmes de recherche à la portée de tous ! (EDP Sciences, 2018), et l'idée géniale de laisser à la postérité, à travers la bande dessinée, les travaux des doctorants de l'Université de Lorraine...

J'ai immédiatement pensé à nos doctorants, qui sont l'ADN du Département de Physico-Chimie à Saclay ! Et rapidement, nous avons vu le formidable intérêt que l'on pouvait avoir à proposer à nos doctorants, rompus à l'exercice de la publication scientifique écrite ou orale, codée et minutée, de déroger à la pratique et d'aborder nos sujets d'une autre manière, sous une forme en apparence plus légère et plus abordable... avec la bande dessinée. Un challenge tout de même pour les sujets nucléaires qui sont les nôtres !

Et PEB est venu nous voir ! Le contact est tout de suite passé avec les équipes qu'il a rencontrées dans les laboratoires, et sa curiosité naturelle et sans limite, son émerveillement pour toutes les choses du monde, qu'elles soient grandes, petites ou invisibles à l'œil nu, ont fait le reste...

Je ne révélerai pas ici ses secrets... Pourtant, bien qu'il ne soit pas un expert de nos sujets, il a su saisir les enjeux, les verrous scientifiques auxquels se confrontent avec pugnacité les doctorants, les encadrants, les techniciens et chercheurs de la Direction des Activités Nucléaires de Saclay.

Et pour finir, Zoé aura révélé l'histoire en apportant la magie du dessin, du trait et des couleurs, ainsi que de l'humour et des références à l'univers de la bande dessinée...

Je suis très fier de préfacier ce premier ouvrage qui expose, à travers les travaux de onze de nos doctorants en 2020, une partie des travaux menés au CEA à Saclay, dans le domaine de l'énergie nucléaire.

Merci PEB, merci Zoé.

Christophe Poussard
Chef du Département de Physico-Chimie

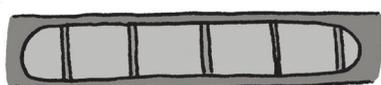
SOMMAIRE

Introduction au fonctionnement d'un réacteur.....	page 12
01. Le pilotage d'un réacteur.....	page 14
02. La déformation des assemblages.....	page 18
03. L'arrangement cristallin.....	page 24
04. Prédire la germination des grains.....	page 28
05. Irradiation et lacunes.....	page 32
06. Les dislocations : ténacité et plasticité.....	page 36
07. Le renforcement des aciers par les précipités.....	page 40
08. Les piqûres de rouille.....	page 44
09. La séparation des éléments.....	page 48
10. L'analyse chimique par laser.....	page 52
11. La diffusion de l'uranium dans l'argile.....	page 56

S'il existe plusieurs types de centrales nucléaires, la technologie la plus répandue dans le monde à l'heure actuelle est le REP (Réacteur à Eau sous Pression). Son cœur génère une réaction nucléaire dégageant une énergie considérable, sous forme de chaleur utilisée pour produire de l'électricité. Il est enfermé dans une cuve remplie d'une eau qui circule à la vitesse de 5 m/s, passant très rapidement de 290 °C à plus de 330 °C à travers les assemblages.

12 mm
Ø 8 mm

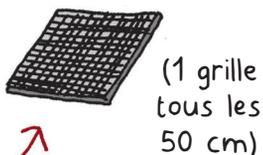
Le « combustible » utilisé est constitué de **PASTILLES** d'uranium⁽¹⁾, dont près de **4 % des atomes** ont des propriétés qui permettent une réaction de fission nucléaire.



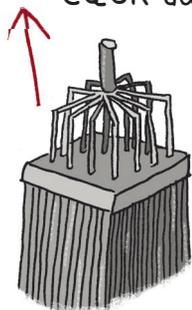
Environ 300-400 pastilles sont logées dans de longues **gaines** en métal (alliage de zirconium). Une fois scellées, elles prennent le nom de **CRAYONS**.

20 cm
5 m

264 de ces **CRAYONS** sont rassemblés et maintenus ensemble par des **grilles** dans un **ASSEMBLAGE**.

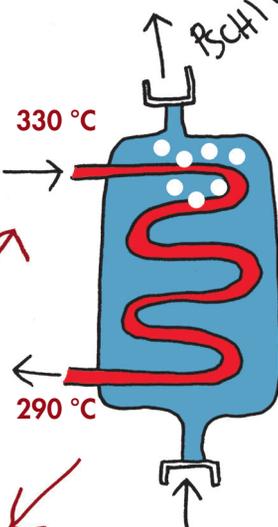
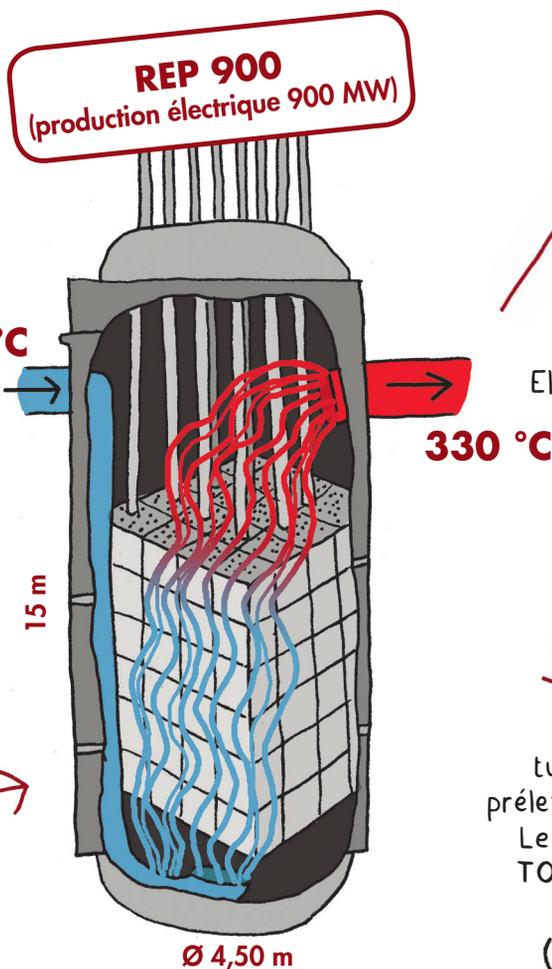


157 assemblages forment le **CŒUR** du réacteur.

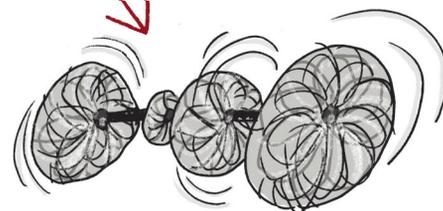


Des **BARRES DE CONTRÔLE** sont descendues au sein des assemblages pour piloter le réacteur (agir sur sa puissance ou le stopper), grâce au matériau⁽²⁾ qui les compose et qui **capture** une partie des **neutrons** responsables de la réaction de fission nucléaire.

D'une masse de 330 tonnes, la **cuve** est sous pression (environ 150 bars), si bien que l'eau reste à l'état liquide alors que sa température dépasse largement les 100 °C. L'eau sortant de la cuve traverse un autre volume d'eau grâce à des tuyaux étanches : le **GÉNÉRATEUR DE VAPEUR**. L'eau de la cuve y est refroidie avant de retourner à son point de départ. L'eau « froide » dans le générateur se met alors à bouillir, créant ainsi de la **vapeur** (sous pression elle aussi).



Cette vapeur est alors envoyée à travers les pales d'une **turbine** afin de faire tourner une grosse dynamo, l'**ALTERNATEUR** (qui crée l'électricité produite par la centrale). Elle regagne ensuite le générateur sous forme liquide.



Pour ce faire, elle circule dans des tuyaux étanches refroidis par de l'eau prélevée dans la mer ou un fleuve voisin. Le dispositif peut être complété par des **TOURS AÉROREFRIGÉRANTES** afin de ne pas trop réchauffer l'eau rejetée.



(1) UO_2 (dioxyde d'uranium).

(2) B_4C (carbure de bore, une céramique très résistante).

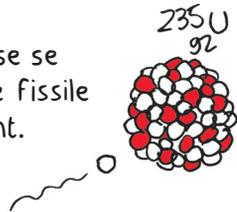
NOYAUX STABLES ET INSTABLES

Dans la nature, certains éléments sont dits **instables**, c'est-à-dire que leur noyau possède un effectif de protons et de neutrons qui ne respecte pas les proportions nécessaires pour que ces particules restent liées éternellement les unes aux autres. Ils cherchent donc à se rééquilibrer en **éjectant des particules** comme des neutrons, des protons, des électrons et des photons, et en **libérant de l'énergie**. C'est la **RADIOACTIVITÉ**.

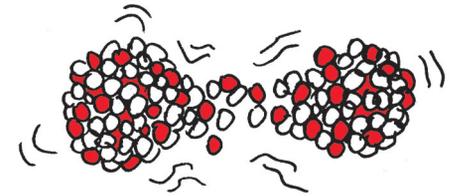
RÉACTION DE FISSION NUCLÉAIRE

Parmi ces éléments, certains sont même **FISSILES**, c'est-à-dire qu'on peut **casser leur noyau** pour qu'il éclate et se reforme en nouveaux noyaux, plus petits. Cette réaction de fission produit la chaleur utilisée pour la production d'électricité. Les pastilles de combustible sont constituées d'un des isotopes de l'uranium⁽¹⁾, le seul élément fissile présent dans la nature.

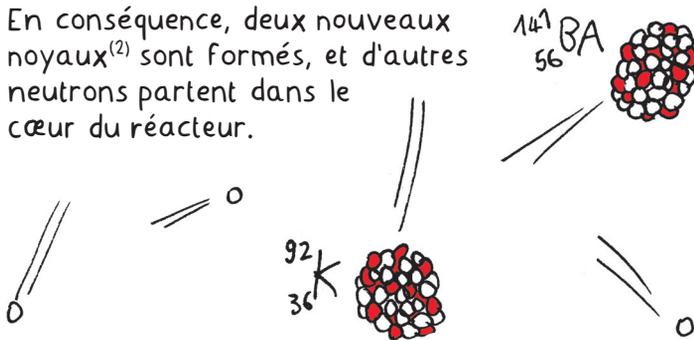
Pour que la réaction puisse se faire, il faut qu'un atome fissile et un neutron se percutent.



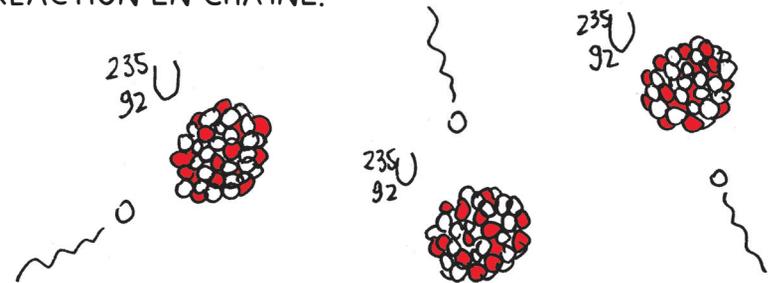
La structure du noyau est chamboulée. Il éclate en libérant une très grande énergie (chaleur).



En conséquence, deux nouveaux noyaux⁽²⁾ sont formés, et d'autres neutrons partent dans le cœur du réacteur.



Quand ces neutrons rencontrent à leur tour un noyau d'uranium fissile, le même phénomène se reproduit. C'est la **RÉACTION EN CHAÎNE**.

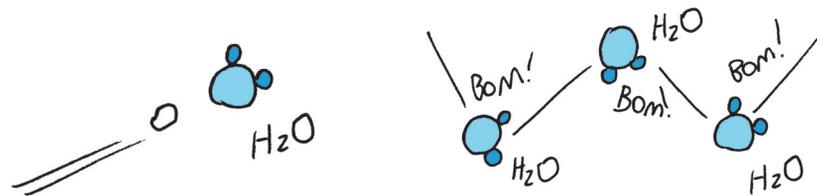


Un réacteur de type REP 900 produit **100 milliards de milliards de réactions de fission par seconde**, qui engendrent une chaleur de 2 700 MW (thermiques), convertie en 900 MW (électriques).

UN NEUTRON TROP RAPIDE

À son émission (lors de la réaction), la vitesse d'un neutron est tellement folle qu'il rebondit sur les noyaux sans les casser. Paradoxalement, il faut le **ralentir** pour qu'il parvienne à engendrer la fission de l'uranium en le percutant.

Un neutron a une durée de vie de 0,0001 s et file à 72 000 000 km/h.



Si bien qu'il finit par rétrograder à 7 200 km/h, vitesse compatible avec les réactions de fission.

L'eau a un rôle de **MODÉRATEUR** : le neutron se cogne une bonne dizaine de fois contre ses molécules et **perd** une grande partie de sa **vitesse** après chaque impact.

(1) L'uranium 235 (^{235}U), qui représente 0,75 % de l'uranium naturel (le reste étant du ^{238}U).

(2) On parle de produits de fission (ex. : baryum et krypton).

01. LE PILOTAGE D'UN RÉACTEUR

La France dispose d'une cinquantaine de réacteurs nucléaires que se partagent une petite vingtaine de centrales réparties sur le territoire. Leur mise en réseau leur permet de produire à eux seuls plus de 60 gigawatts d'électricité. Alors que les énergies renouvelables intermittentes, comme l'éolien ou le solaire, se développent, ces centrales doivent s'adapter à ce nouvel équilibre, et être prêtes à prendre le relais quand le soleil n'est plus là...



D'après la thèse de **Valentin Drouet** :
Optimisation du pilotage des Réacteurs à Eau Pressurisée au suivi de charge perturbé par l'intermittence des Énergies Nouvelles Renouvelables

DÉPARTEMENT DE MODÉLISATION DES SYSTÈMES ET STRUCTURES
Service d'Études des Réacteurs et de Mathématiques Appliquées
Encadrants : Jean-Michel Do et Jean-Charles Le Pallec / Directeur de thèse : Sébastien Verel (Université du Littoral Côte d'Opale)

Bien que les énergies renouvelables se développent, certaines d'entre elles ne peuvent pas produire d'électricité à la demande.



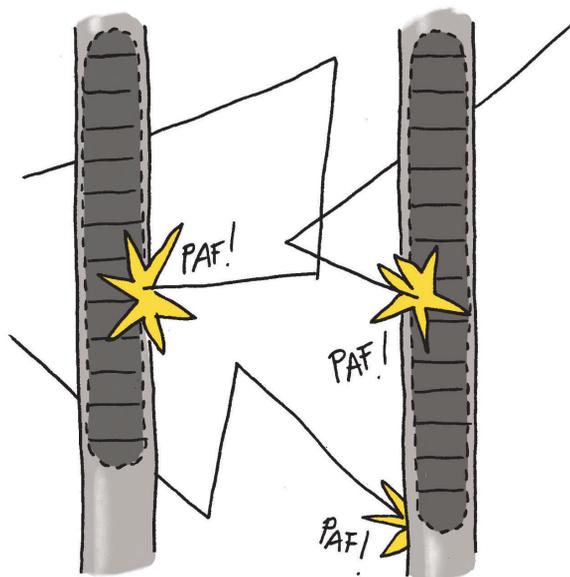
Elles sont dites « intermittentes ».

En revanche, quand les conditions leur sont favorables, il est nécessaire que les réacteurs nucléaires **adaptent leur production** de leur côté.

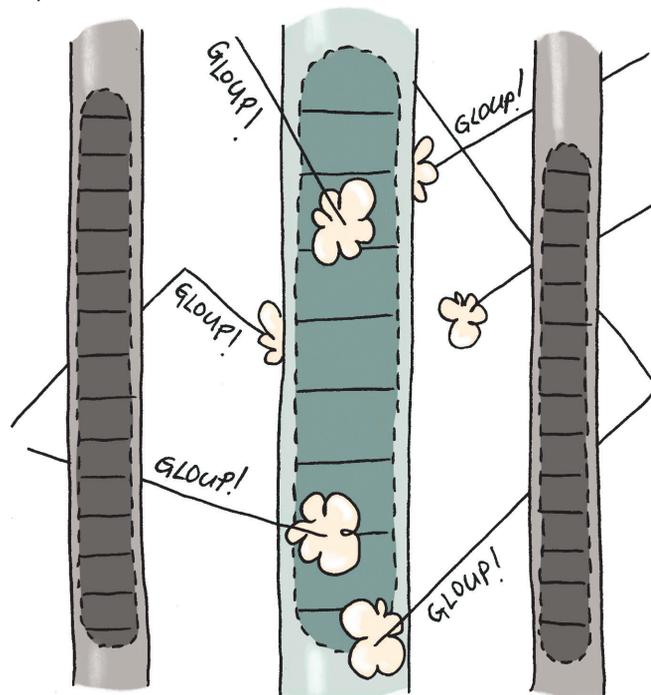


Par contre, en cas de grandes variations, un opérateur doit intervenir pour limiter le nombre de fissions dans le cœur de la centrale.

En descendant plus ou moins les barres de contrôle dans le cœur, et en changeant la nature de l'eau⁽¹⁾, les neutrons sont absorbés, **les réactions diminuent** et la production baisse.



Lors de la réaction, les neutrons percutent les noyaux d'uranium enfermés dans les crayons.



(1) Par ajout de bore.

Ce n'est pas facile de trouver comment bien gérer ces outils pour adapter la puissance.

ÇA SE FAIT PAS COMME ÇA, AU FEELING!

LE NOMBRE DE RÉACTIONS AUX DIFFÉRENTS ENDRITS DU CŒUR DOIT RESTER ASSEZ HOMOGENÈME...

LE COÛT DES OPÉRATIONS DOIT ÊTRE MINIMISÉ...

... ET, ACCESSOIREMENT, ON VOUDRAIT BIEN AUSSI QUE TOUT NE NOUS PÊTE PAS À LA TRONCHE!

- STABILITÉ
- ÉCONOMIES
- SÉCURITÉ



Le nombre de combinaisons (de GESTIONS) possibles est gigantesque ! Tout comme le temps nécessaire pour les calculer toutes en vue de choisir celle qui convient le mieux.

10^{12} GESTIONS \longrightarrow 60 MILLIONS D'ANNÉES DE CALCULS

CECI EST UN « PROBLÈME D'OPTIMISATION DES OBJECTIFS ».

POUR M'AIDER À LE RÉSOUDRE, J'UTILISE UN OUTIL MATHÉMATIQUE INSPIRÉ DE LA NATURE: LES ALGORITHMES « ÉVOLUTIONNAIRES ».



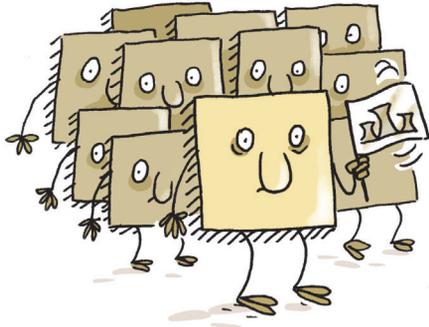
Mais entendons-nous bien... Quand on parle d'évolution, il ne s'agit pas d'un animal qui se transforme tout seul pour devenir meilleur...

Au sein d'une **espèce**, il arrive que certains individus naissent avec quelques **différences aléatoires** : ils mutent.

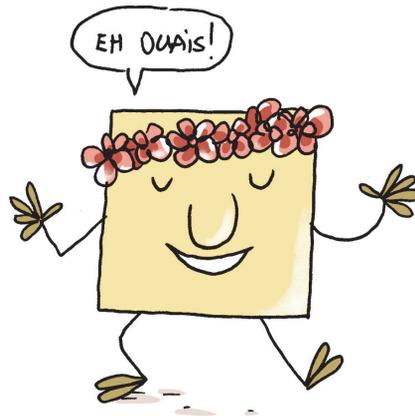
Et si la nature en conclut que ceux-ci sont mieux adaptés à leur environnement, alors les autres disparaîtront progressivement et l'espèce en entier aura évolué.



Un supercalculateur peut fonctionner un peu de cette façon. Dans cet ordinateur bien costaud, 1 000 processeurs vont jouer le rôle de 1 000 centrales. Cet **ensemble** est alors considéré comme une **ESPÈCE**.



La nature, elle, est simulée par un 1001^e processeur qui décide de qui survivra ou pas.



Chaque centrale calcule une gestion. Si un résultat est particulièrement intéressant, le chef des processeurs le sélectionne et le garde en mémoire.



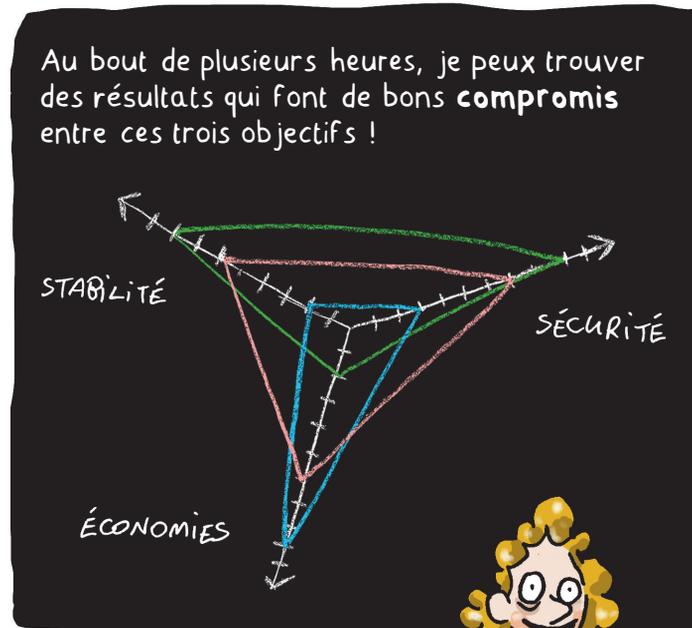
Sauf qu'il ne va pas attendre des milliers d'années : il va forcer tout le monde à **muter rapidement** !

Puis chacun copie sur lui, à quelques différences près : **ils mutent tous de façon aléatoire**.

L'opération est répétée plusieurs fois, avec des mutations s'enchaînant au rythme des gestions que les processeurs s'escriment à améliorer.



Au bout de plusieurs heures, je peux trouver des résultats qui font de bons **compromis** entre ces trois objectifs !



MAIS EN VRAI, AVEC TOUS LES AUTRES OBJECTIFS À PRENDRE EN COMPTE, C'EST PLUTÔT UN GENRE DE DODÉCAÈDRE QUE JE CHERCHE À TROUVER ...



CELUI QUI CORRESPOND AU TRIANGLE ROSE EST PLUTÔT SATISFAISANT.



02. LA DÉFORMATION DES ASSEMBLAGES

Un réacteur produit 100 milliards de milliards de réactions par seconde. Cette formidable puissance dégagée impose des procédures extrêmement rigoureuses de conception, de réalisation et de pilotage du réacteur afin de garantir la sûreté de l'installation et la sécurité des personnels. La recherche dans ce domaine n'a de cesse de comprendre le plus finement possible des phénomènes à peine visibles à l'œil nu, mais qui peuvent néanmoins lourdement endommager les matériaux sous irradiation, afin d'améliorer encore les bilans économiques et de sûreté.



D'après les thèses de **Bertrand Leturcq** :
*Réduction de modèles thermomécaniques non linéaires pour
l'évaluation des déformations d'un cœur de Réacteur à Eau Pressurisée*
et de **Stanislas de Lambert** :
*Contribution à l'analyse multiphysique de la
déformation statique d'assemblage de Réacteur à Eau Pressurisée*

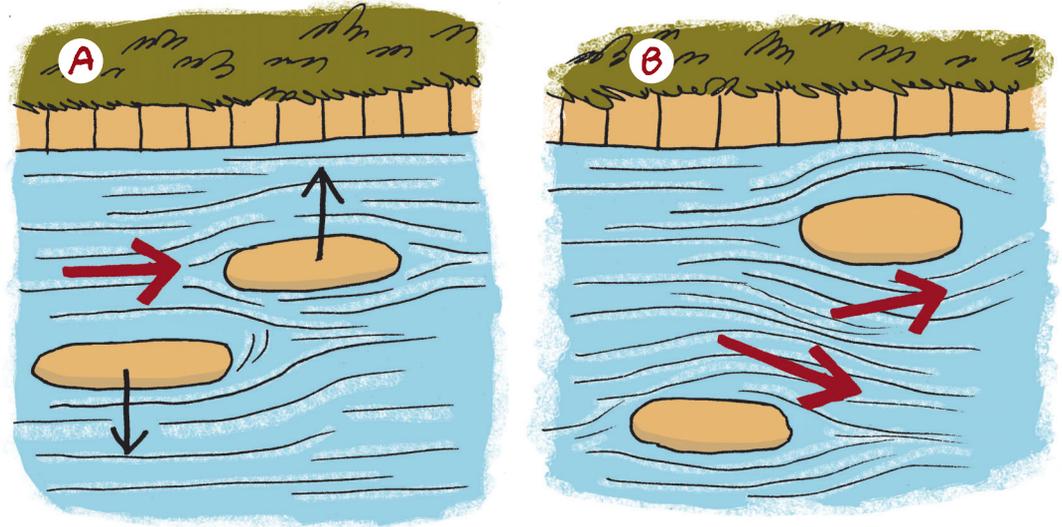
DÉPARTEMENT DE MODÉLISATION DES SYSTÈMES ET STRUCTURES
Service d'Études Mécaniques et Thermiques

Encadrants : Jérôme Cardolaccia, Serge Pascal et Guillaume Campioni / Directeurs de thèse : Patrick Le Tallec (École polytechnique) et Vincent Faucher (CEA - DES - DTN)

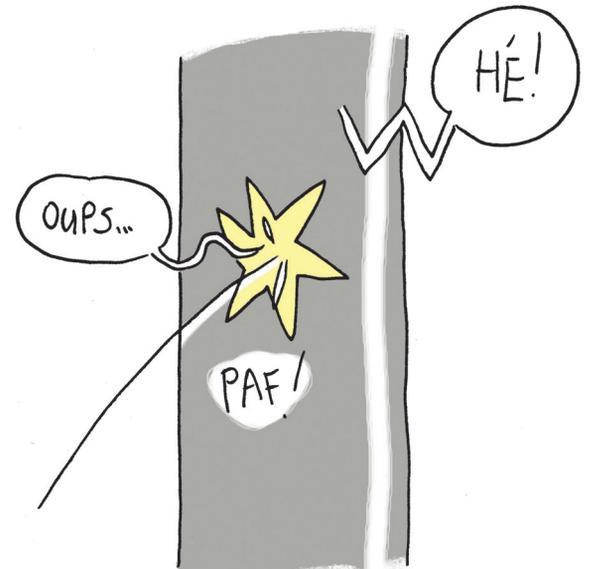
L'eau traverse le cœur du bas vers le haut en une seconde, mais son parcours est **contrarié** par les assemblages.



Cet enchevêtrement de composants peut être vu comme une rivière où des bancs de sable viennent perturber la progression rectiligne du courant. L'emplacement et la forme de ces obstacles changent à cause du passage de l'eau (A), et ces modifications influent à leur tour sur la circulation de l'eau (B).



Car, quand ils sont encore très rapides, les neutrons ne peuvent pas réagir avec l'uranium contenu dans les pastilles, mais peuvent tout de même taper dans le **métal** des grilles et des crayons.



Pourtant, cela suffit à engendrer des perturbations importantes de l'écoulement de l'eau. Par ailleurs, le matériau subit aussi d'autres contraintes.

Les conséquences ne sont pas visibles à l'œil nu, mais les atomes du métal qui compose les gaines des crayons sont bien bousculés⁽¹⁾...

(1) Voir O5. Irradiation et lacunes (page 32).

Si bien que, pendant les trois années de vie d'un assemblage, chacun des atomes qui le constituent est déplacé environ une dizaine de fois !



Inévitablement, la structure du métal est impactée par le phénomène.



La remontée express de l'eau au travers des assemblages engendre des **forces verticales et horizontales** qui les obligent à suivre une espèce de chorégraphie : ils se déforment lentement.



DÉFORMATION EN S

DÉFORMATION EN C

Or, leurs déformations peuvent poser des problèmes pour manipuler les assemblages (voire, à l'extrême, gêner le mouvement des barres de contrôle).



De plus, la chaleur dégagée par les crayons est moins homogène, et la **circulation de l'eau est modifiée**.

Des mêmes auteurs

PEB

Avec le Syndicat national de l'édition

- *Sciences en bulles*, volume 2 - peb & fox, 2020
- *Sciences en bulles*, volume 1 - peb & fox, 2019

Album réalisé en collaboration avec le ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, et le ministère de la Culture, dans le cadre de la *Fête de la science*

Chez EDP Sciences

- *Ma thèse en 2 planches* - peb & fox, 2018

Album réalisé en collaboration avec l'Université de Lorraine dans le cadre du concours *Ma thèse en 180 secondes*

Chez Le Potager Moderne

- *Jean-Paul n'est pas la moitié d'un imbécile* - peb & fox, 2017
- *Le téléporteur du P^r Schmitt n'est toujours pas au point* - peb & fox, 2015
- *Derrière le monument aux morts* - ouvrage collectif - peb & fox, 2014
- *Patate douce, sauce asiatique !* - ouvrage collectif - peb & fox, 2014
- *Jojo* - ouvrage collectif - peb & fox, 2013
- *Patate douce, en muet !* - ouvrage collectif - peb & fox, 2013
- *Le téléporteur du P^r Schmitt n'est pas vraiment au point* - peb & fox, 2012

Chez Diantre !

- *Cherche !* - avec Sylvain Euriot, 2010
- *Le Père No !* - peb & fox, 2009
- *Ouf !* - peb & fox, 2009

Chez Paquet

- *La Fabrique* - peb & fox, 2009

Zoé Thouron

Chez Paquet

- *Jacky Chat le chat* - avec Pierre Pelot, 2020

Chez Le Lombard

- *Le Burn out - Travailler à perdre la raison* - avec Danièle Linhart, 2019
- Album issu de la collection *La petite bibliothèque des savoirs*

Chez Dunod

- *Les Improbablogies* - d'après Pierre Barthélémy, 2018

Chez Fluide Glacial

- *Fluide Glacial au Louvre* - ouvrage collectif, 2018

Chez Casterman

- *Highway to love* - avec Jean Chauvelot, 2017

Dans La Revue Dessinée

- *Chronique scientifique* - avec Jean-Philippe Uzan, 2015-2017

Chez Dargaud

- *Florange, une lutte d'aujourd'hui* - avec Tristan Thil, 2014

Chez Le Potager Moderne

- *Derrière le monument aux morts* - ouvrage collectif, 2014
- *Patate douce, en muet !* - ouvrage collectif, 2013

Ouvrage dirigé par Pierre-Étienne Bertrand

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Imprimé en France par SEPEC, 01960 Péronnas, 04545201204

ISBN (papier) : 978-2-7598-2554-7

ISBN (ebook) : 978-2-7598-2560-8

Dépôt légal : décembre 2020

© **EDP Sciences, 2021**

17, avenue du Hoggar
91944 Les Ulis