

Les lettres Ummites et notamment les D 69 et D71 respectivement de 1968 et 1967 décrivent des ordinateurs appelés XANMOO dont les performances sont bien supérieures aux technologies terrestres de l'époque, notamment en termes de miniaturisation.

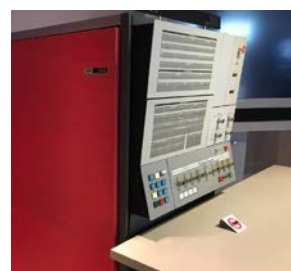
Leur fonctionnement repose sur deux concepts clés : une unité de calcul par réactions nucléaires au niveau atomique et une mémoire logée dans un cristal de titane adressée par trois faisceaux gamma.

Dans cette analyse, on va examiner les ordres de grandeur des énergies en jeu en nous basant sur les lois physiques bien terrestres des rayonnements nucléaires et de leur interaction avec la matière.

Examinons en premier lieu l'état des ordinateurs humains avant 1965.

1 Point sur les technologies humaines des ordinateurs avant 1965

Entre 1945 et 1965, l'évolution des ordinateurs numériques est essentiellement déterminée par **trois révolutions matérielles successives** : les tubes électroniques (ENIAC 1945), les transistors (PDP-1) et enfin les circuits intégrés avec l'arrivée de l'IBM 360 en 1964.



Ces progrès relèvent principalement de la physique des semi-conducteurs et de la microélectronique. Notons qu'à cette époque, les circuits intégrés viennent tout juste d'apparaître (fin des années 1950) mais leur potentiel de miniaturisation n'est pas encore pleinement exploité. L'idée d'un processeur complet sur une seule puce (le microprocesseur) n'apparaîtra concrètement qu'en 1971. Cela engendra une réalisation humaine tout à fait exceptionnelle notamment en termes de miniaturisation : voir l'Annexe 1.

Le calcul analogique est bien développé depuis les années 1930 mais sera vite supplanté par les calculateurs numériques dès le milieu des années 1960.



Remarque : Dans la D 71, les Ummites n'évoquent jamais l'avènement des circuits intégrés, comme dans l'IBM 360. Cela marque pourtant une troisième rupture majeure dans l'histoire de l'informatique comme montré ci-dessus : une architecture unique et compatible pour toute une gamme de machines, permettant aux entreprises de faire évoluer leur matériel sans réécrire leurs logiciels.

Avant 1965, la réflexion sur les moyens de calcul est presque entièrement limitée à deux paradigmes : l'analogique et le numérique électronique.

Personne n'a encore imaginé à cette époque l'avènement industriel des microprocesseurs : c'est la quatrième révolution. Comme je le montre en Annexe 1, la domination de l'électronique numérique telle qu'on la connaît et telle qu'on la percevait au tournant des années 1965-1971 avec notamment la loi de Moore de 1965, provient principalement des propriétés physiques fondamentales des électrons dans les solides: interaction efficace des électrons pour former des portes logiques, très haute miniaturisation envisageable, faible énergie consommée, fabrication industrielle maîtrisée. Ce dernier point est important car il a permis de concentrer sur une puce des milliards de transistors à très faible coût et très faible consommation énergétique.

Discussion sur les technologies humaines de l'époque et les choix Ummites

L'analogique et le numérique électronique sont deux paradigmes bien cités par les Ummites, qui, disent-ils, utilisent encore ces deux types de moyens.

La loi de Moore, exprimée en 1965, offrait à l'époque une potentialité extraordinaire pour la voie électronique, et d'une certaine manière une voie royale pour l'électronique et sa miniaturisation, ce que semblent totalement ignorer les Ummites. Ils n'évoquent jamais cette rupture de l'électronique très proche : ils ne connaissent d'ailleurs même pas le circuit intégré !

En revanche, ils évoquent l'emploi de l'énergie nucléaire pour leur calculateur, ce qui va totalement à l'envers de la révolution à venir des microprocesseurs, où la consommation est d'autant plus faible que la puissance de calcul est importante et que la miniaturisation est poussée, comme je le montre en Annexe1. Or, les réactions nucléaires impliquent des énergies énormes, des systèmes de sécurité complexes et massifs. C'est une technologie très difficile à miniaturiser pour l'intégrer dans des dispositifs courants. Cela va complètement à l'encontre de ce que font et feront les humains avec les microprocesseurs.

Les Ummites insistent en indiquant qu'en travaillant au niveau atomique (ordre de grandeur entre 0.1 et 1 nm), on peut obtenir des performances phénoménales : c'est exact, quand on voit qu'en 2026, nous parlons d'une gravure de 2 nm pour des puissances de plusieurs TFLOPS (Annexe 1).

Dans l'informatique moderne, la miniaturisation va de pair avec une réduction de l'énergie nécessaire pour chaque opération logique. La puissance de calcul augmente donc principalement grâce à l'intégration massive de transistors de moins en moins gourmands en énergie.

L'auteur des lettres semble au contraire associer la grande énergie des phénomènes nucléaires à une capacité de calcul supérieure, ce qui reflète une intuition répandue dans l'imaginaire scientifique de l'époque mais qui ne correspond pas aux contraintes réelles de l'ingénierie informatique

2 La proposition des ordinateurs Ummites

Comme déjà évoqué, l'électron n'est plus au centre du procédé Ummite, c'est maintenant l'échelle nucléaire c'est-à-dire le noyau de l'atome : cela permettrait une miniaturisation extrême et inégalée. La base n'étant plus électronique, elle est alors nucléaire : il faut faire intervenir pour gérer les

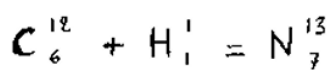
circuits non plus des électrons, mais des particules nucléaires comme les neutrons, les protons, des processus de fission, des rayonnements gammas très énergétiques, et comme souligné, des processus nucléaires analogues à ceux utilisés dans nos centrales nucléaires.

Mais manipuler l'énergie nucléaire implique des énergies énormes : ces énergies vont se manifester à travers toutes sortes de particules issues du procédé et qui vont rapidement détruire l'ordinateur Ummite comme nous le verrons.

Il m'a semblé tout d'abord utile de rappeler, en quelques repères simples, ce que représentent les ordres de grandeur mis en jeu dès que l'on fait intervenir l'énergie nucléaire. On verra ensuite ce qu'il adviendrait d'un ordinateur Ummite soumis à de tels flux énergétiques.

Pour illustrer ces ordres de grandeur, je vais utiliser des descriptions issues de la D71.

A Voyons tout d'abord la réaction suivante supposée faire la somme $12+1=13$.



Cette réaction nucléaire citée par les Ummites ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$ existe bel et bien.

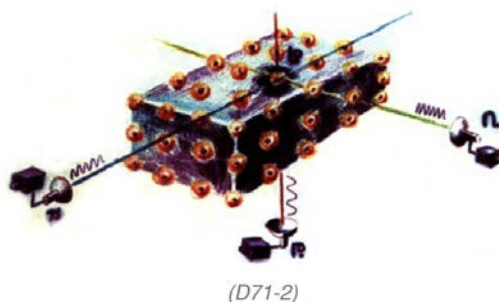
Mais les Ummites ne précisent jamais l'énergie du proton (H) pour qu'une telle réaction se produise en laboratoire à température ambiante dans un cristal. Sans rentrer dans le détail, cette réaction ${}^{12}\text{C}(p,\gamma){}^{13}\text{N}$ nécessite en réalité une énergie cinétique minimale du proton comprise entre ~0,3 et 0,5 MeV au laboratoire pour avoir une section efficace significative, c'est à dire avoir une chance non nulle de se réaliser. **Hors du laboratoire, il faut une température de plusieurs millions de degrés pour déclencher cette réaction.**

Dire que le proton a une énergie de 0,5 MeV signifie que son énergie cinétique vaut 0,5 million d'électronvolts (500 000 eV). Pour obtenir un tel proton en laboratoire, **il faut un accélérateur de particules (cyclotron, linac) délivrant une tension de l'ordre de 500 kV, soit une petite salle de laboratoire. Ce n'est pas une technologie intégrable dans une puce.**

B Des photons de 34 MeV pour lire la mémoire de Titane

Je rappelle le schéma de lecture de la mémoire donné par les Ummites dans la D 71.

*« Sur un bloc de TITANE tombent trois faisceaux (symbolisés sur le dessin avec les couleurs carmin, bleu et vert) de section infinitésimale et de fréquence très élevée, capables de traverser le bloc sans affecter les noyaux de ses atomes (bien qu'en affectant les couches électroniques respectives). On utilise par exemple des fréquences de l'ordre de **8,35.1021 cycles/seconde** et différentes pour chaque faisceau ».*



Un photon de $8.35 \cdot 10^{21}$ Hz correspond, via la relation $E=h \nu$, à une énergie d'environ **34 MeV**. Un photon gamma de 34 MeV est 17 millions de fois plus énergétique qu'un photon visible (2 eV), et 600 fois plus qu'un rayon X médical (~60 keV). **C'est gigantesque.**

Des photons gamma de cette énergie sont produits par exemple dans un cyclotron de 3m de diamètre et 2 m de haut. **En incluant le blindage en béton (indispensable pour les neutrons), la salle occupe environ 50 à 80 m². Et il en faudrait trois....**

Une telle énergie est dissipée dans le cristal de Titane sur quelques centimètres en créant de nombreuses ionisations : la longueur moyenne de parcours d'un tel gamma est de l'ordre de quelques centimètres. Lorsqu'il interagit, les processus dominants sont la création de paires (création d'un électron et d'un positon) et la diffusion Compton (transfert d'énergie à un électron, avec émission d'un photon gamma secondaire). Les électrons et positons ainsi produits, très énergétiques, vont à leur tour ioniser massivement le matériau sur leur trajet, créant une cascade d'ionisations et aussi quelques déplacements atomiques. L'énergie initiale du photon (34 MeV) finit donc convertie principalement en chaleur locale (agitation thermique) et en quelques défauts cristallins (vacances, interstitiels, dislocations). **Cette interaction se produit tout au long du trajet dans le matériau.**

Ce qu'il faut retenir notamment du point B est l'ordre de grandeur du dispositif nécessaire pour produire un tel photon gamma : il faut une salle de 50 à 80 m³, et on voit mal ici aussi comment intégrer cela dans une puce.

C Le XANMOO Ummite : Note Numéro 1 de la D69 et description dans la D 71

Approche globale de la Note 1 de la D 69

« Les XANMOO (vous les nommeriez calculateurs, ordinateurs) ne sont pas composés par des circuits électroniques comme les terrestres, c'est à dire, tubes de vide, composants à l'état solide comme des transistors ou diodes solides, conducteurs et semi-conducteurs, inducteurs, capacités, entre autres, mais par des organes intégrés topographiquement dans des cristaux stables, que nous appelons ODU GOOA (amplificateurs nucléiques). Leur caractéristique principale est constituée par le fait que ce ne sont pas les tensions ou intensités électriques qui sont amplifiées comme sur vos amplificateurs terrestre, mais la puissance. Une fonction énergétique d'entrée injectée dans le ODU GOOA, se traduit à la sortie par une autre fonction analytique identique, mais avec des valeurs énergétiques à chaque fois plus élevées. La libération contrôlée d'énergie s'effectue aux dépens de la masse intégrée dans l'amplificateur et le phénomène se réalise dimensionnellement à une échelle moléculaire. Dans le processus interviennent le nombre d'atomes suffisants pour que la fonction puisse être considérée macro physiquement comme continue. »

Les ordinateurs Ummites seraient construits dans des cristaux stables non spécifiquement nommés, dans lesquels sont intégrés des amplificateurs nucléiques (ODU GOOA ou **OG** dans la suite) qui constitueraient le cœur des XANMOO. J'ai souligné topographiquement car on comprend bien qu'il faut maîtriser parfaitement la position atomique de chaque noyau pour pouvoir l'adresser de manière logique par un neutron ou un proton pour obtenir une fonction logique. Si cet adressage disparaît pour une quelconque raison (par exemple dislocation du matériau, déplacements d'atomes, etc..), l'ordinateur ne fonctionne plus. Mais n'anticipons pas.

Approche détaillée de la D71

Les Ummites font ensuite dans la D 71 la comparaison entre une diode électronique terrestre en partant de l'amplification d'un électron et de l'organe OG évoqué ci-dessus, en rentrant dans le détail du dispositif : il serait constitué d'un déclencheur à base d'un neutron ou d'un proton sur une cible de matériau fissile constituées de quelques atomes dudit matériau fissile.

La description de leurs amplificateurs nucléiques est la suivante et représentée sur la figure (D 71 1).

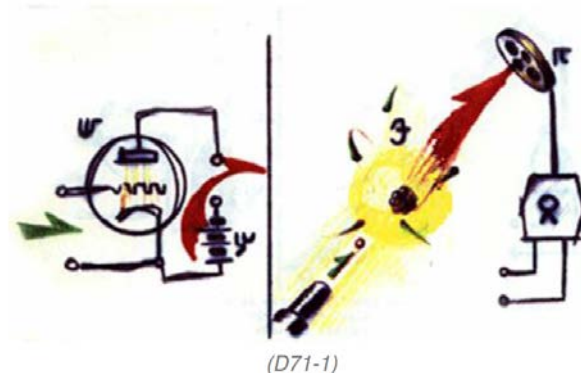
« Les éléments ODU - GOAA (amplificateurs nucléiques) ont des caractéristiques totalement différentes:

Primo : La base n'est pas électronique (ni de vide, ni en état de cristal solide) ; elle est nucléique (noyau de l'atome). Une faible énergie d'entrée (neutrons ou protons unitaires tombant sur quelques atomes) provoquent par fission du noyau une grande énergie.

Secundo : Nous voyons donc que le rendement est nettement supérieur à l'unité. A la sortie de l'amplificateur élémentaire, nous obtenons cette énergie sous forme THERMIQUE et non ÉLECTRIQUE, quoique dans un processus postérieur, cette chaleur se transforme en ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

TERTIO : La base de ces éléments étant purement atomique (seules quelques unités entrent en jeu au lieu de trillions d'atomes), le degré de miniaturisation est extraordinaire, pouvant emmagasiner de très complexes circuits dans des volumes très réduits. »

Comment fonctionneraient ces fonctions élémentaires OG, sachant donc qu'un ordinateur Ummite va être constitué d'un assemblage de tels éléments ODU GOOA ?



(D71-1)

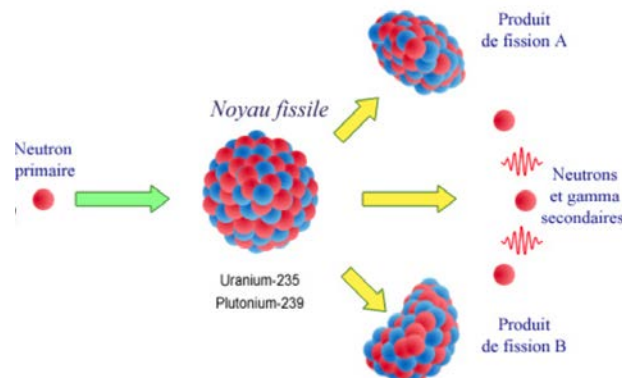
Je cite ici la D 71: « Dans l'ODU GOAA, une très faible énergie (NEUTRON) (FLÈCHE VERTE) provoque une scission nucléaire en un seul atome dont la fission libère **une énergie énorme** »

Pour le lecteur novice dans ce domaine, le terme scission nucléaire a un sens très précis : il s'agit de la fission ou de l'éclatement d'un atome lourd en atomes plus légers sous l'effet d'un bombardement neutronique. Cela correspond complètement à la description ci-dessus, sachant que de simples neutrons thermiques de 0.025 eV peuvent fissionner un matériau comme l'uranium 235, présent dans la nature, ou le plutonium 239 créé artificiellement.

Chaque fonction logique est donc produite par une fission nucléaire ! L'énergie dégagée est certes énorme (~200 MeV) mais cela ne représenterait que $3.2 \cdot 10^{-11}$ Joules par calcul élémentaire.

Voici ce qui se passe dans notre physique et qui ne remet pas en cause le schéma ci-dessus : un neutron thermique primaire engendre dans un noyau fissile (U5 ou Pu9) une fragmentation (la

fission) qui dégage en effet une **énergie énorme** (200 MeV), répartie dans les fragments de fission A et B, et diverses particules, comme des gammas et des neutrons supplémentaires, entre deux et trois. Inutile de préciser que ces fragments vont interagir avec la matière environnante et vont comme nous l'avons déjà compris créer des dislocations dans la structure du matériau environnant.



Notons que les neutrons ainsi libérés peuvent à leur tour et de manière totalement incontrôlée générer d'autres fissions. Mais en général, leur libre parcours moyen est suffisamment important pour qu'ils puissent s'échapper en majorité du bloc fissile sans dispositions ad hoc (ralentissement des neutrons comme dans les réacteurs nucléaires).

Au final, au moins un atome fissile constitutif du XANMOO est détruit définitivement à chaque opération logique, sans parler des effets secondaires incontrôlables : on se demande bien comment agencer dans ces conditions des portes logiques si chaque opération en détruit un certain nombre à chaque cycle, ce qui n'est pas le cas des fonctions électroniques terrestres.

Les lettres D69 et D71 donnent une description qualitative du XANMOO, mais restent peu explicites sur son architecture interne exacte. Les hypothèses qui suivent ne prétendent donc pas reconstruire le dispositif réel ; elles proposent des lectures compatibles avec les éléments explicitement décrits : miniaturisation atomique, organes intégrés, réactions nucléaires et forte densité fonctionnelle.

Hypothèse 1 Le XANMOO est constitué entièrement d'un cristal d'U5

C'est une hypothèse extrême fortement simplifiée

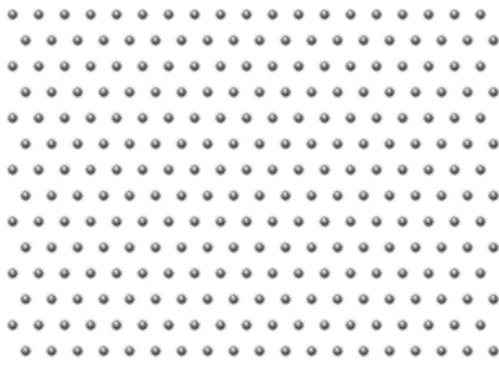
L'hypothèse 1 constitue un cas limite volontairement simplifié : on suppose ici que le milieu calculatoire est entièrement constitué d'un matériau participant directement aux réactions nucléaires. Cette configuration n'est pas explicitement décrite dans les textes, mais elle permet d'examiner les contraintes physiques extrêmes associées.

Les Ummites parlent en effet de matière fissile sans jamais la désigner. Mais comme il n'y a pas beaucoup de choix possibles, le plus simple est de supposer l'emploi d'U5 que l'on trouve dans la nature. Pour cette première hypothèse, on suppose donc que le XANMOO est un cristal d'U5.

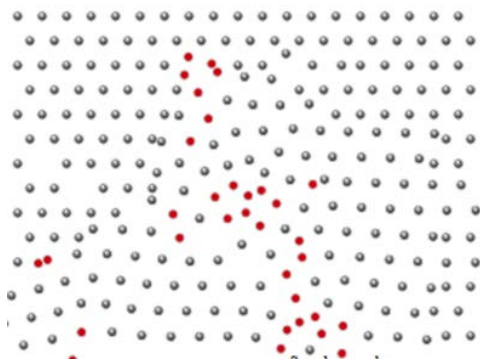
Pour bien comprendre ce qui se passe physiquement en détail, il faut se reporter à l'Annexe 2.

En résumé, chaque fission (que l'on peut assimiler à une opération logique) va déplacer environ 54 000 atomes d'uranium et briser la belle cohérence du cristal.

Cristal d'U5 avant fission



Cristal d'U5 après une fission



La valeur de $5.4 \cdot 10^4$ déplacements (par fission générant deux fragments de fission) est expliquée en détail en Annexe 2 : c'est le point clé de la démonstration. Ces fragments vont complètement désorganiser le cristal d'uranium, le rendant logiquement inopérant. Comment adresser un composant en particulier s'il a été bousculé « ailleurs » dans le réseau ?

Comme les Ummites prétendent descendre spectaculairement au niveau atomique (nucléaire) en termes d'intégration, on peut supposer que leur ordinateur est au moins aussi puissant que ce que nous savons faire en 2026. Si on se reporte à l'Annexe 1, cela signifie une puissance de **3 TFLOPS** dans un volume équivalent de l'ordre de **150 mm^3** . Bien sûr, ce volume pourrait être plus faible pour une puissance bien supérieure, mais on remarquera dans le tableau de l'Annexe 1 qu'un tel volume de silicium est au final assez stable depuis 30 ans.

Dans un tel volume d'uranium 235 de densité 19.1 g/cm^3 , nous aurons $7.25 \cdot 10^{21}$ atomes d'uranium (donc dans 150 mm^3).

Si cet ordinateur fonctionne à la puissance de 3 TFLOPS, et sachant qu'à chaque FLOPS correspond une fission et que $5.4 \cdot 10^4$ atomes sont déplacés de leur position idéale dans le cristal, l'ordinateur Ummite est alors totalement inutilisable à 100 % en :

$$7.25 \cdot 10^{21} / (3 \cdot 10^{12} \cdot 5.4 \cdot 10^4) / 3600 = 12.4 \text{ heures}$$

Bien sûr, on pourrait considérer d'autres valeurs, pour d'autres volumes et/ou d'autres puissances. Mais les résultats conduisant à la destruction vont toujours se chiffrer en dizaines ou centaines d'heures.

L'intégration du XANMOO Ummite est certes fabuleuse, mais celui-ci s'autodétruit en quelques dizaines heures de calcul de par son principe basé sur la fission nucléaire, et sur la base de l'architecture pour cette hypothèse 1.

Hypothèse 2 Le XANMOO est constitué d'un cristal de Titane et d'U5

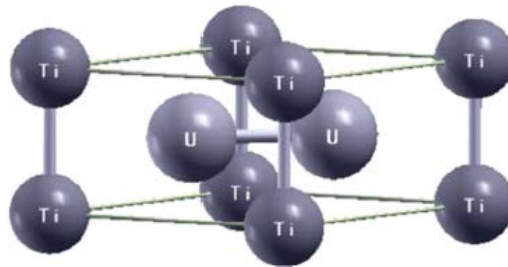
L'hypothèse 2 est plus proche d'une lecture littérale des D69–D71 : les organes ODU GOOA sont supposés répartis au sein d'une structure mixte associant fonctions de calcul et éléments de stockage. Cette interprétation demeure néanmoins partielle, le texte ne précisant pas la nature exacte du support.

Cette hypothèse est très intéressante et m'a été suggérée. L'idée est de partir d'un cristal de Titane stable, le seul dont parlent concrètement les Ummites. Ce cristal constitue par ailleurs la mémoire

décrite en 2 A précédemment. Ensuite, il faut répartir au sein de ce cristal les OG, de manière suffisamment intégrée pour pouvoir continuer de raisonner au niveau atomique.

Comme les Ummites parlent de cibles de matière fissile de quelques atomes pour constituer une fonction logique, on peut supposer sans trop d'audace que ces nano cibles sont formées par au moins 2 atomes d'U5 fissile.

On se retrouve donc avec un cristal de type 2 atomes d'U5 pour 1 atome de Ti, sachant que ce cristal existe réellement dans nos panoplies de matériaux bien terrestres. Voici la structure de ce cristal.



En résumé, la matrice de Titane constitue le cristal stable et en même temps la RAM, et chaque OG constitué de 2 atomes d'U5 est disposé au plus près des atomes de Ti pour transmettre directement les résultats des calculs logiques à la RAM.

Que se passe-t-il maintenant physiquement lors de chaque fission dans un tel cristal de type U2Ti ? Il faut se reporter pour les détails des calculs SRIM à l'Annexe 3.

Dans le raisonnement qui suit, on ne va prendre en compte que les déplacements induits sur les atomes de Titane, sachant que les atomes d'U5 subissent aussi des déplacements.

On obtient en Annexe 3 entre **12000 et 16000 déplacements d'atomes de Titane**, par fission générant deux fragments de fission. C'est moins que les 54000 atomes d'U5 déplacés dans l'hypothèse 1, mais cette fois-ci, on sait selon les Ummites que cette mémoire de Titane doit être extrêmement stable géométriquement pour assurer une lecture fiable avec 3 faisceaux gammas comme décrit dans la D71 et rappelé plus haut en 2 B par la figure D71-2.

On peut maintenant refaire le calcul complet comme dans l'hypothèse 1.

La densité du matériau U2Ti est de 15.1 g/cm³. Soit 1.756 10²² atomes de Titane par cm³, ce qui donne dans 150mm³ : 2.6 10²¹ atomes de Titane dans le bloc considéré.

On effectue le calcul comme dans l'hypothèse 1 et on obtient pour 3 TFlops:

$2.6 \cdot 10^{21} / (3 \cdot 10^{12} \cdot 1.4 \cdot 10^4) / 3600 = 17.2$ heures, temps au bout duquel 100 % des atomes de Titane ont été bousculés. Il est évident que la RAM sera défectueuse bien avant d'atteindre 100% de dislocation....

On aboutit sur la base de l'architecture constituant l'hypothèse 2 à la même conclusion que dans l'hypothèse 1 : l'intégration du XANMOO Ummite est certes fabuleuse, mais celui-ci s'autodétruit en quelques dizaines heures de calcul de par son principe basé sur la fission nucléaire.

Hypothèse 3. Le XANMOO intègre un dispositif supplémentaire pour éviter l'autodestruction.

L'hypothèse 3 s'affranchit maintenant des choix architecturaux précédents. Même si les hypothèses 1 et 2 étaient inexactes ou incomplètes, la question physique fondamentale demeure : peut-on

utiliser des réactions nucléaires répétées comme éléments logiques sans gérer les produits de réaction et leurs effets sur le milieu ?

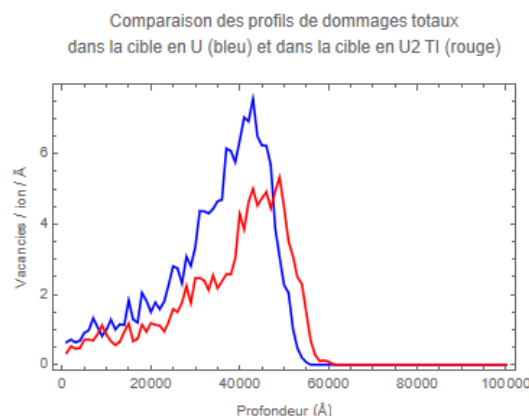
La démonstration qui suit ne dépend plus en effet du détail architectural du calculateur. Elle repose uniquement sur une propriété générale des réactions de fission : la production inévitable de particules énergétiques et le dépôt d'énergie associé dans la matière environnante.

Que les réactions aient lieu dans un cristal, une cavité, un plasma ou une structure séparée, les produits de réaction doivent finalement interagir avec la matière pour être exploités. Le problème est donc déplacé, mais non supprimé.

On suppose maintenant que les Ummites, conscients de ce problème, ajoutent au XANMOO quel que soit son architecture un système permettant de contenir l'effet destructeur des fragments de fission.

Pour cela, il faut rentrer dans le détail de la physique de la fission et de l'interaction des fractions de fission ionisés dans la matière du XANMOO.

Comme on le rappelle à titre illustratif dans les Annexes 2 et 3, les fragments de fission commencent à bousculer les atomes du cristal du XANMOO dès le début de leur émission. La figure suivante décrit ce qui se passe, et ceci s'applique d'ailleurs à tout type de cristal. Selon la nature du cristal et sa densité, les parcours seront un peu plus longs que dans U ou U2Ti sans dépasser la dizaine de microns pour du Titane pur.



Pour éviter le phénomène de dislocation du cristal qui se produit tout au long du parcours des fragments de fission, il faudrait donc imaginer un dispositif réaliste qui « confine » les fragments de fission dès le début de leur parcours, idéalement lors des premiers nanomètres pour éviter de commencer à bousculer les atomes proches, et au pire lors du premier micron, sachant que cela va déjà créer tout de même les premières dislocations.

Comme les fragments de fission sont fortement ionisés, un champ magnétique peut courber la trajectoire des ions jusqu'à les confiner localement. Cette physique est bien connue et est décrite en détail en Annexe 4.

Cette dernière annexe montre que si on veut confiner les ions ne serait-ce que sur le premier micron, il faudrait cependant un champ magnétique gigantesque (le million de Tesla), induisant une pression magnétique qui n'existe qu'à l'intérieur des étoiles.

⇒ Cette tentative de préserver l'intégrité du XANMOO échoue donc.

3 Conclusion

Le présent travail ne cherche pas à réfuter l'existence hypothétique d'une technologie avancée, mais à examiner la compatibilité des mécanismes explicitement décrits avec les connaissances actuelles en physique nucléaire et en interaction rayonnement–matière.

Les descriptions des ordinateurs Ummites des lettres D 69 et D 71 ne reposent pas sur des lois physiques inconnues : les réactions nucléaires évoquées, les interactions rayonnement-matière ou l'usage de rayonnements gamma appartiennent bien au corpus de la physique moderne.

Les difficultés apparaissent toutefois dès que l'on examine la mise en œuvre technologique des procédés évoqués. A titre d'illustration, on montre que la génération de protons de plusieurs centaines de keV ou de photons gamma de plusieurs dizaines de MeV nécessite encore en 2026 des installations expérimentales volumineuses, en aucun cas intégrables dans des systèmes miniaturisés à l'échelle atomique.

Mais l'essentiel de cet article est le suivant : chaque fission nucléaire à but « calculatoire » engendre des produits de fission qui causent des dommages irréparables dans la matière du calculateur. Nous montrons qu'un calculateur reposant sur des fissions répétées subirait une accumulation rapide de dommages dans la matière active, conduisant à une dégradation progressive puis à la perte de fonctionnalité, c'est-à-dire susceptible de conduire à des temps de vie incompatibles avec un usage informatique intensif.

L'analyse proposée repose sur une interprétation architecturale des descriptions D69 et D71, interprétation qui peut rester incomplète compte tenu du faible niveau de détail architectural fourni. Il est donc possible que certains aspects du XANMOO aient été mal compris.

Toutefois, le résultat principal demeure inchangé : toute architecture reposant sur des réactions nucléaires répétées doit gérer les produits de réaction, les transferts d'énergie et les perturbations induites dans la matière. Cette difficulté subsiste indépendamment des choix architecturaux précis : une tentative technologique de contourner cette difficulté s'avère totalement irréaliste.

À titre plus personnel, cette étude m'a aussi conduit à replacer le XANMOO dans le contexte scientifique du milieu des années 1960. Le nucléaire occupait alors une place centrale dans l'imaginaire technologique : propulsion nucléaire, avions atomiques, mini-réacteurs, batteries isotopiques ou projets de moteurs spatiaux. Dans ce contexte, l'idée d'un « ordinateur nucléaire » n'apparaît plus totalement isolée. Elle semble plutôt prolonger une vision où la puissance énergétique du nucléaire pouvait être spontanément associée à une puissance de calcul supérieure, sans que soient encore pleinement perçues les contraintes liées aux rayonnements, aux matériaux et à l'interaction rayonnement–matière.

Annexe 1 Les microprocesseurs depuis 1971 : performances, volume de silicium utile, miniaturisation

Un microprocesseur moderne comme on en trouve aujourd'hui dans nos PC de bureau utilise en réalité très peu de silicium en volume. Le silicium actif se trouve dans le(s) die(s) (la partie rectangulaire gravée). L'épaisseur standard des wafers modernes est de $\sim 0,775$ mm, mais après polissage, découpe et tous les traitements, l'épaisseur finale utile du die est généralement de l'ordre de 0,3 à 0,8 mm (souvent $\sim 0,5$ – $0,75$ mm une fois assemblé).

Le tableau final compile principalement les données historiques concernant des microprocesseurs emblématiques (principalement Intel et AMD), en se basant sur des sources fiables comme Wikipedia, des benchmarks archivés (e.g., Linpack ou peak FLOPS), et des spécifications techniques (die size, épaisseur estimée, etc.).

J'ai choisi les MFLOPS pour les comparaisons : cela représente une mesure de performance en opérations flottantes par seconde (peak ou benchmarkée, selon disponibilité).

Le volume est calculé comme suit : surface du die (mm^2) $\times$ épaisseur (mm), ce qui donne le volume du silicium en mm^3 .

Remarques préliminaires :

- L'épaisseur du die a varié historiquement. Elle est plus fine aujourd'hui pour une meilleure dissipation thermique : $\sim 0,2$ – $0,3$ mm pour les mobiles, $\sim 0,7$ – $0,8$ mm pour les desktops.
- On utilise ici une moyenne estimée par époque pour les épaisseurs : 0,5 mm pour les anciens, 0,75 mm pour les modernes, moyenne basée sur des données techniques des wafers anciens $\sim 0,3$ – $0,5$ mm, et pour les modernes $\sim 0,775$ mm avant amincissement.
- Les die sizes en mm^2 proviennent de données historiques (Intel/AMD).
- Les MFLOPS sont des estimations crête ou benchmarkées (via SSE/AVX pour les modernes ; Linpack pour anciens). Les valeurs augmentent de manière inversement proportionnelle à la finesse de gravure, la fréquence d'horloge et les instructions vectorielles.
- On retient dans le tableau quelques microprocesseurs emblématiques dont le 4004 (1971).

Quelques précisions sur la finesse de gravure :

Les anciens processeurs (1970–1990) utilisaient des nœuds en micromètres (μm), puis on est passé aux nanomètres (nm) à partir des années 1990–2000.

Pour les chiplets modernes (comme AMD Zen 4/Zen 5), on indique le nœud du CCD (Compute Chiplet Die), car c'est là que se trouve la logique active. L'I/O die est souvent sur un **nœud** plus gros (ex. 6 nm pour Zen 4/5).

En 2026, les processeurs haut de gamme comme les Ryzen 9000 (Zen 5) utilisent principalement TSMC N4X/N4P (~ 4 nm optimisé), tandis qu'Intel Arrow Lake / Lunar Lake est sur Intel 20A/18A (~ 2 nm équivalent marketing).

La réduction drastique de la finesse de gravure (de $10 \mu\text{m}$ en 1971 à ~ 3 – 4 nm en 2026) est le principal moteur de l'explosion des MFLOPS/ mm^3 : plus de transistors par mm^2 , plus d'efficacité, plus de cœurs/vector units sans exploser la surface du die ni du volume qui reste relativement constant depuis 1993, soit environ 100 à 150 mm^3 de Silicium.

Cela illustre bien comment la miniaturisation a multiplié la densité de performance par des facteurs énormes : un facteur 10000 entre 1993 et 2020 et même un facteur proche de $\sim 10^6$ si on compare brutalement les MLOPS/mm³ entre 1971 et 2026 !.

Précisions sur l'échelle atomique et la gravure correspondante :

Pour une finesse de gravure donnée, on peut estimer le nombre d'atomes traversés par une caractéristique clé comme la longueur de grille effective (effective gate length ou channel length) ou le contacted gate pitch (distance centre-à-centre entre grilles adjacentes). Ces longueurs physiques sont souvent plus grandes que le "nom" du nœud (ex. : 5 nm node $\rightarrow$ gate length $\sim 18\text{--}20$ nm).

- Anciens nœuds (μm) : La finesse correspondait presque directement à la gate length $\rightarrow$ des milliers d'atomes traversés.
- Nœuds modernes (depuis ~ 65 nm de 2006) : Le "nm" est marketing. Exemples réalistes :
 - o 5 nm-class (TSMC N5, Intel 7/Intel 4) $\rightarrow$ **gate length effective $\sim 18\text{--}20$ nm** $\rightarrow \sim 76\text{--}85$ atomes ($20\text{ nm} / 0,235\text{ nm} \approx 85$).
 - o 3 nm-class (TSMC N3, Intel 20A/18A) $\rightarrow$ gate length $\sim 12\text{--}16$ nm $\rightarrow \sim 50\text{--}70$ atomes ; contacted gate pitch $\sim 45\text{--}51$ nm $\rightarrow \sim 190\text{--}220$ atomes.
 - o 2 nm-class (TSMC N2, Intel 18A/14A) $\rightarrow$ gate length $\sim 10\text{--}14$ nm $\rightarrow \sim 40\text{--}60$ atomes ; pitch ~ 40 nm $\rightarrow \sim 170$ atomes.
- La **longueur de canal** (channel length) est souvent la dimension la plus critique pour le comportement quantique, et elle approche maintenant **quelques dizaines d'atomes** seulement. À ~ 2 nm (2025–2026), certaines parties du transistor (épaisseur de nanosheet, espacement) font **seulement 50 atomes** d'épaisseur !
- Limite physique : En dessous de $\sim 10\text{--}20$ atomes ($\sim 2\text{--}5$ nm), les effets quantiques (tunnel, variabilité) deviennent dominants, ce qui explique le passage aux architectures GAA (gate-all-around) et nanosheet pour mieux contrôler le canal.

Cela montre à quel point on est proches à ce jour des limites atomiques du silicium : un transistor moderne haut de gamme (2026) manipule des structures où le canal fait à peine quelques dizaines d'atomes de Silicium d'épaisseur !

J'ai rajouté dans le tableau une dernière ligne prospective représentant la limite ultime théorique/pratique pour un transistor en silicium (CMOS classique). Cette limite est estimée autour de 2030–2040 (ou plus tard si on force avec des architectures alternatives comme CFET, 2D materials hybrides, mais en restant sur du silicium pur).

La limite ultime n'est pas un "zéro atome", mais plutôt le point où le transistor devient fonctionnellement inutilisable en raison des lois physiques (effet tunnel quantique massif, variabilité atomique extrême, énergie de commutation $< kT \ln(2) \sim 3 \times 10^{-21}$ J à température ambiante (*)). On parle souvent d'un channel/gate length effectif de **$\sim 1\text{--}2$ nm comme mur pratique pour le silicium**.

La ligne "2035–2040" marque la fin de l'ère du scaling planar/planar-like du silicium (fin de la loi de Moore). Après, on passera à d'autres paradigmes. **Le silicium aura été poussé jusqu'à quelques atomes par canal – une prouesse incroyable comparés aux 42 500 atomes du 4004 de 1971 !**

(*) voir l'annexe : efficacité énergétique du calcul.

Année	Modèle (Exemple)	Finesse de gravure	Atomes le long d'une dimension	MFLOPS (approx.)	Surface du Die (mm²)	Épaisseur estimée (mm)	Volume (mm³)	MFLOPS / mm³
1971	Intel 4004	10 µm	~42 500	0,092	12	0,5	6	0,015 (*)
1989	Intel 486DX (50 MHz)	1 µm → 0,8 µm	~3 400–4 300	~8	81	0,5	40,5	0,2
1993	Intel Pentium (60 MHz)	~0,8 µm	~3 400	70	294	0,6	176,4	0,4
1999	Intel Pentium III (Katmai, 500 MHz)	0,25 µm (250 nm)	~1 060	1 400 (1,4 GFLOPS)	128	0,6	76,8	18,2
2006	Intel Core 2 Duo (Conroe, 3 GHz)	65 nm	~280	~20 000 (20 GFLOPS)	143	0,75	107,25	186
2010	Intel Core i7-980X (6 cœurs, 3,33 GHz)	32 nm	~135–140	~80 000 (80 GFLOPS)	239	0,75	179,25	446
2020	Intel Core i9-10900K (10 cœurs, 5,3 GHz)	14 nm	~60–80	~848 000 (848 GFLOPS)	206	0,75	154,5	5 490
2023	AMD Ryzen 9 7950X (16 cœurs, 5,7 GHz)	5 nm (CCD) node	~80	~1.4 TFLOPS SP peak)	71 (par CCD)	0,75	53,25	~26000
2026 (est.)	AMD Zen 5 / Intel Arrow Lake / Lunar Lake	4 nm / 3 nm(node)	~50 à 70	~3 TFLOPS SP peak)	~200	0,75	150	~20 000
2035– 2040 (limite ultime silicium)	Transistor silicium ultime théorique	~1–2 nm	~10 ?	~10 à 100 TFLOPS ?	~150– 300	~0,1–0,3	~15–90	~10 ⁵ à 10 ⁶ ?

(*) Le 4004 ne possédait pas d'unité flottante ; le FLOPS est une extrapolation.

Conclusion

L'évolution historique présentée dans ce tableau met en évidence une relation remarquable avec la loi empirique formulée en 1965 par Gordon Moore : le nombre de transistors intégrés sur une puce tend à doubler environ tous les deux ans. Or, comme la surface, et donc le volume, du silicium utilisé par un microprocesseur reste globalement du même ordre de grandeur depuis plusieurs décennies, cette augmentation du nombre de transistors se traduit directement par une croissance spectaculaire de la densité de calcul. En d'autres termes, la quantité d'opérations réalisables par unité de volume de silicium a suivi, pendant plus d'un demi-siècle, une progression proche d'une loi exponentielle.

Cette dynamique illustre la puissance du processus de miniaturisation de la microélectronique : en réduisant continuellement la taille des transistors, l'industrie des semi-conducteurs a pu multiplier à la fois le parallélisme, la fréquence effective et la complexité des architectures, permettant ainsi des gains de performance de plusieurs ordres de grandeur sans augmentation comparable du volume matériel.

Cette évolution constitue une réalisation technologique exceptionnelle : un matériau aussi abondant que le silicium a été transformé en machines numériques intégrant aujourd'hui des dizaines de milliards de transistors, dont certaines dimensions approchent désormais l'échelle de quelques dizaines d'atomes.

Cependant, l'approche progressive des limites physiques du silicium (liées notamment aux effets quantiques), à la variabilité atomique et aux contraintes énergétiques fondamentales, laisse penser que ce régime d'amélioration exponentielle ne pourra pas se prolonger indéfiniment.

Les progrès futurs reposeront probablement sur de nouvelles architectures, sur l'intégration de matériaux émergents ou sur des formes d'hybridation avec d'autres technologies de calcul.

Annexe de l'annexe 1 Efficacité énergétique du calcul : la loi de Koomey et la limite thermodynamique fondamentale de Landauer

L'évolution historique des performances informatiques ne se limite pas à l'augmentation de la puissance de calcul ou à la miniaturisation des transistors. Un autre aspect essentiel concerne l'efficacité énergétique du calcul, c'est-à-dire le nombre d'opérations réalisables pour une quantité donnée d'énergie.

La loi empirique de Koomey (2010)

L'économiste de l'énergie Jonathan Koomey a mis en évidence une régularité empirique remarquable dans l'histoire de l'informatique : le nombre d'opérations de calcul réalisables par joule d'énergie double approximativement tous les 1,5 à 2 ans. Cette relation, souvent appelée *loi de Koomey*, a été observée sur une très longue période, depuis les premiers ordinateurs électroniques des années 1940 jusqu'aux processeurs modernes.

Cette progression exponentielle signifie que, pour une même quantité d'énergie, les systèmes informatiques modernes peuvent effectuer un nombre d'opérations des milliards de fois supérieur à celui des premiers ordinateurs électroniques. Plusieurs facteurs techniques contribuent à cette amélioration continue :

- La miniaturisation des transistors,
- La réduction des tensions d'alimentation,
- L'amélioration des architectures de calcul,
- L'optimisation des circuits électroniques et des algorithmes.

Ainsi, l'efficacité énergétique du calcul a progressé presque aussi régulièrement que la densité de transistors décrite par la loi de Moore. Pour augmenter la puissance de calcul, il faut diminuer la consommation énergétique par opération.

La limite thermodynamique du calcul : le principe de Landauer (1961)

Malgré ces progrès spectaculaires, l'efficacité énergétique du calcul ne peut pas augmenter indéfiniment. La physique fondamentale impose en effet une limite minimale à l'énergie nécessaire pour manipuler l'information.

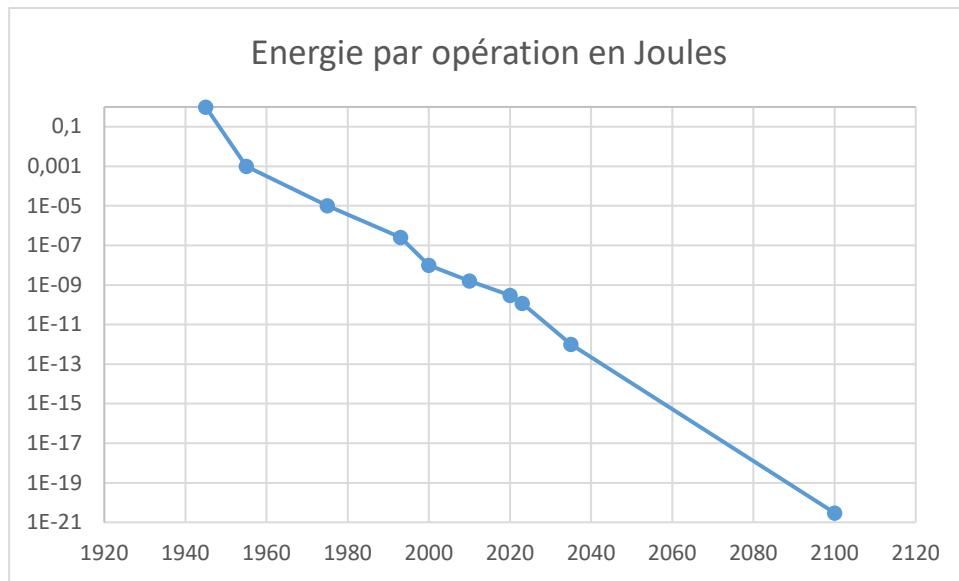
Selon le principe établi en 1961 par le physicien Rolf Landauer, toute opération irréversible d'effacement d'un bit d'information doit dissiper au minimum une énergie donnée par la relation : $E_{\min} = kT \ln(2)$

A température ambiante, effacer un bit nécessite $3 \cdot 10^{-21}$ Joules.

Cette valeur représente une limite thermodynamique fondamentale : aucune technologie de calcul classique ne peut effectuer une opération logique irréversible en consommant moins d'énergie que cette quantité.

Conséquences pour l'avenir du calcul

Les ordinateurs actuels consomment encore beaucoup plus d'énergie que cette limite fondamentale pour chaque opération logique. Cependant, à mesure que les transistors deviennent plus petits et plus efficaces, la consommation énergétique des circuits se rapproche progressivement de cette limite théorique, même si nous en sommes encore très loin comme le montre le graphique suivant :



L'augmentation de la puissance de calcul va donc de pair avec une énergie consommée de plus en plus faible.

À très long terme (2100), ce seuil thermodynamique constitue l'une des contraintes physiques ultimes pesant sur l'évolution de l'informatique.

En attendant, les recherches actuelles explorent différentes pistes pour approcher encore davantage de cette limite, notamment :

- Les architectures de calcul réversible,
- L'informatique quantique,
- Les nouvelles technologies de matériaux et de dispositifs.

Ces approches pourraient permettre de prolonger l'amélioration de l'efficacité énergétique du calcul au-delà des limites atteintes par les technologies actuelles basées sur le silicium.

Annexe 2 Estimation du nombre de déplacements atomiques produits par un ion Xe de 80 MeV dans l'uranium

Introduction

Les fragments de fission produits dans les combustibles nucléaires possèdent typiquement des énergies comprises entre 60 et 100 MeV et sont responsables d'une grande partie des dommages structuraux dans les matériaux fissiles. Une méthode expérimentale courante consiste à simuler ces fragments par des ions lourds accélérés, par exemple du xénon (Xe) de quelques dizaines de MeV.

L'objectif de cet article est d'estimer le nombre de déplacements atomiques produits par un ion Xe de 80 MeV dans l'uranium métallique, en combinant :

- Les modèles historiques de la physique des cascades de collision,
- Les estimations classiques de Brinkman (1959),
- Les outils modernes de simulation comme SRIM. (<http://www.srim.org/>)

1. Rappel de la physique des dommages d'irradiation

1.1 Interaction d'un ion énergétique avec un solide

Un ion énergétique perd son énergie dans la matière par deux mécanismes principaux :

- Les pertes électroniques, en ionisant le cortège électronique du matériau traversé, principalement en début du parcours de l'ion (en rouge ci-dessous).
- Les pertes nucléaires, plutôt en fin de parcours (en bleu ci-dessous), via les collisions élastiques avec les noyaux du réseau.

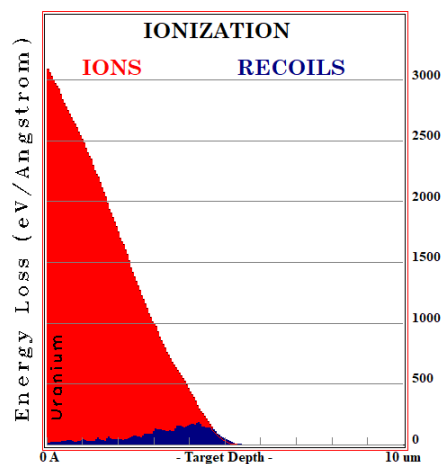


Figure 1

Seules les pertes nucléaires produisent directement des déplacements atomiques, en transférant une certaine énergie T_d aux différents atomes. Celle-ci dépend de l'énergie initiale de l'ion, et comme on le voit sur l'exemple ci-dessus, se situe en fin de parcours de l'ion déjà bien ralenti dans le matériau. Cette énergie est de l'ordre de quelques pour cents de l'énergie initiale de l'ion.

1.2 Énergie seuil de déplacement

Un atome est déplacé si l'énergie transférée dépasse une certaine valeur critique E_d , appelée énergie seuil de déplacement.

SRIM utilise par défaut $E_d = 25$ eV, mais les évaluations modernes utilisent généralement une valeur moyenne proche de 40 eV.

⇒ Bricout et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 472 (2020)

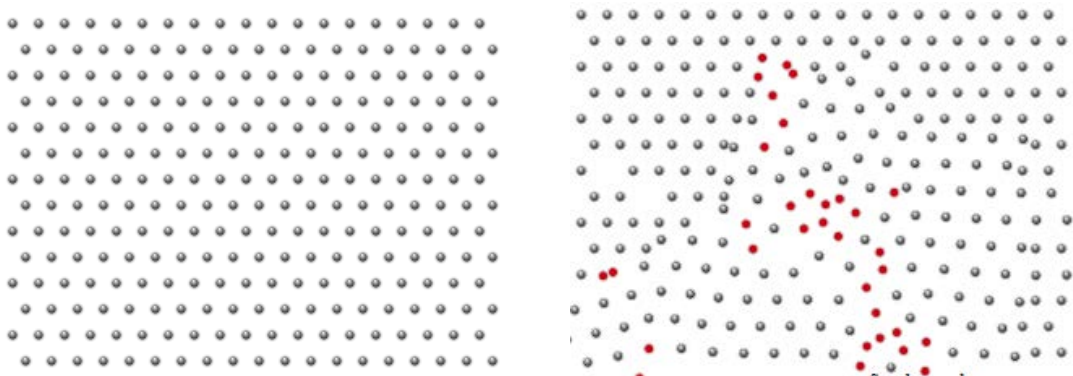
1.3 Cascades de collisions

Lorsque l'énergie transférée est élevée, l'atome déplacé devient à son tour un primary knock-on atom (PKO pour SRIM, mais PKA dans la littérature standard) qui peut à son tour déplacer d'autres atomes.

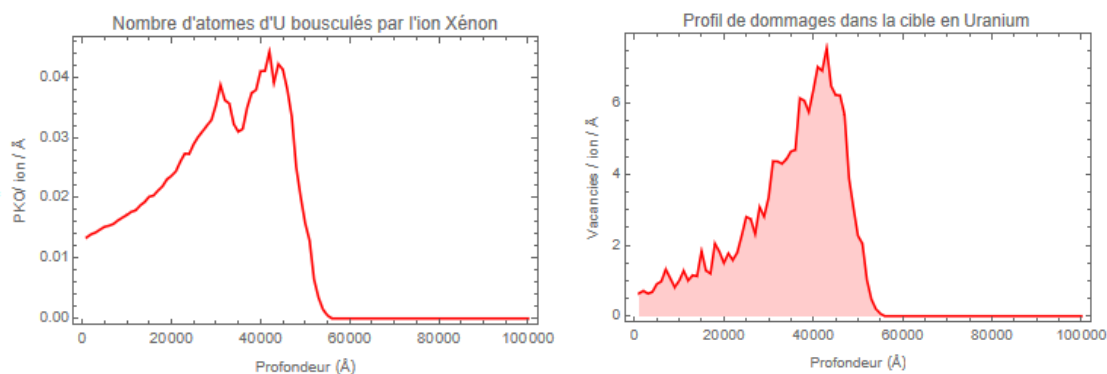
On obtient alors une cascade de collisions.

Le nombre total de déplacements est donc bien supérieur au nombre de collisions initiales.

Si on part d'un réseau parfait (ci-dessous à gauche), ce jeu de boules de pétanque va donner un résultat pour le moins chaotique (ci-dessous à droite) : en rouge, les PKO.



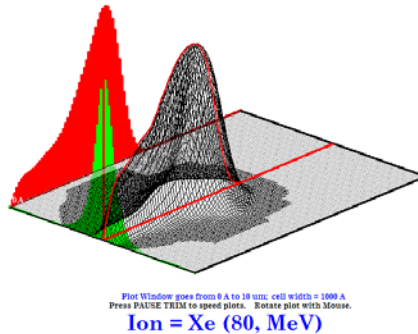
Par exemple, un ion de 80 MeV dans l'uranium va rencontrer pendant son ralentissement beaucoup d'atomes d'uranium qu'il va bousculer en fin de parcours. Le profil va être le suivant (ci-dessous à gauche), et va donner 1372 PKO (calcul SRIM). Mais ces atomes se transforment à leur tour en projectiles qui vont bousculer d'autres atomes du réseau et ainsi de suite. Le tout va donner des sites vacants de leur atome d'uranium. La production de sites vacants est tracée ci-dessous à droite et s'élève à 157895 (calcul SRIM) : la cascade amplifie fortement le nombre initial d'atomes de recul !



La visualisation en 3D permet d'observer la création d'une gerbe de défauts dans le matériau en forme d'entonnoir. On comprend que le bel agencement initial va rapidement devenir chaotique.

Target Vacancies

Total Displacements = 179889 / Ion
Total Vacancies = 157895 / Ion
Replacement Collisions = 21994 / Ion



J'ai obtenu le résultat de 157895 sites vacants pour un atome de Xénon de 80 MeV percutant une cible d'uranium de 10 μm d'épaisseur. Et j'ai pris comme hypothèse $E_d \sim 25$ eV par défaut du code SRIM.

2. Estimation historique de Brinkman Fundamentals of Fission Damage (1959) [1]

Dans son étude fondamentale sur les dommages produits par les fragments de fission dans l'uranium, Brinkman calcule explicitement le nombre d'atomes déplacés, et il considère pour cela les deux fragments de fission typiques : un fragment léger de 95 MeV et un fragment lourd de 67 MeV (moyenne de l'énergie environ 80 MeV).

Il obtient dans son étude :

- 15 000 déplacements dus au fragment léger
- 39 000 déplacements pour le fragment lourd

Soit au total : $\approx 5.4 \times 10^4$ atomes déplacés par fission.

Comme nous le verrons plus loin, cette estimation est remarquable car elle reste proche des estimations modernes, même si pour l'instant elle paraît très en dessous de la valeur donnée par SRIM.

3. Modèles modernes de déplacement

Pour une revue de tous ces modèles, il faut absolument consulter l'article récent :

[2] Ali, Z., Liu, F., Wang, Y., Rasool, H. G., Wang, F., & Haseeb, M. (2025). Advancements in primary radiation damage models and SRIM simulations: A review of radiation damage predictions. *Nuclear Engineering and Technology*, 57(8), 103570.

Ce qui suit est une synthèse très résumée de cet article.

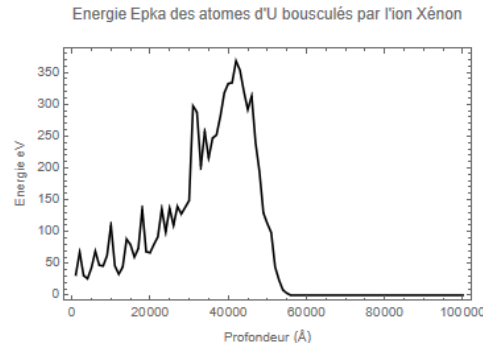
3.1 Modèle de Kinchin–Pease (1955)

Le modèle original estime le nombre de déplacements N_d produits par un atome de recul (PKA) d'énergie E_{PKA} . Le modèle donne à haute énergie :

$$N_d = E_{PKA} / 2E_d$$

Ce modèle suppose des collisions élastiques type sphères dures et ignore la recombinaison ou les effets de cascade.

SRIM calcule le spectre en énergie des PKA, et comme on l'a vu, un ion peut produire des milliers de PKA (ou PKO selon la terminologie).



3.2 Modèle NRT

Le modèle Norgett–Robinson–Torrens (NRT) est une version modifiée du modèle Kinchin-Pease utilisant l'énergie de dommage totale T_d et introduisant un facteur d'efficacité $k=0.8$.

Ce modèle intègre toutes les énergies cumulées fournies aux atomes de recul E_{pka} : cette intégrale est obtenue en pratique comme $T_d = \sum E_{pka}$. Exemple ci-dessus : on obtient 7.96 MeV.

Dans les ions lourds de dizaines de MeV, les pertes électroniques dominent (en rouge sur la figure 1), et la fraction nucléaire (en bleu sur la figure 1) est typiquement 5–15 %, ce que l'on retrouve très bien ici. (Environ 10 %).

$N_d = 0.8 T_d / 2 E_d$ soit $0.4 T_d / E_d$ où T_d est l'énergie totale transférée aux atomes de recul uranium.

Ce modèle est aujourd'hui la référence pour les estimations rapides.

3.3 Résultats des simulations atomistiques

Les simulations de dynamique moléculaire montrent que le modèle NRT surestime les défauts stables. Citons [2] :

“The NRT-dpa model tends to overestimate the number of stable defects by a factor of 3–4.”

“The damage predicted from MD simulations ... is $\sim 1/3$ of those made by the NRT-dpa model.”

⇒ Conséquence empirique utilisée en pratique : $N_{réel} \approx N_{NRT}/3$, **soit la règle NRT/3** ou arc-dpa approximation.

Cela permet de prendre en compte le fait que beaucoup de défauts se recombinent pendant la cascade sur différentes échelles de temps non simulées complètement par SRIM.

4. Simulation avec SRIM

Le logiciel SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter) est aujourd'hui l'outil le plus utilisé pour simuler l'implantation ionique. SRIM calcule le stopping power, la distribution des collisions nucléaires, le nombre de sites vacants produits (attention, il faut utiliser l'option full-cascade).

Il sait aussi calculer l'énergie transférée aux atomes de recul, ce qui permet d'estimer la valeur de T_d utilisée dans le modèle NRT et/ou NRT/3.

Je poursuis donc avec l'impact d'un ion Xénon de 80 MeV sur une cible d'Uranium de 10 μm d'épaisseur, avec le paramètre $E_d=25\text{ eV}$.

Je me limite à 400 essais ce qui prend déjà 1 bonne heure.

4.1 Énergie transférée aux collisions nucléaires

Comme on l'a vu ci-dessus, l'intégration du fichier SRIM E2RECOIL.txt donne $T_d \approx 8\text{ MeV}$ d'énergie transférée aux atomes de recul par ion, soit $\sim 10\%$. Cet ordre de grandeur est cohérent pour un ion Xe de 80 MeV dans un métal lourd, où la perte nucléaire devient significative à la fin de trajectoire.

4.2 Nombre de déplacements NRT et NRT/3

En utilisant $E_d=40\text{ eV}$, on obtient $8 \cdot 10^4$ déplacements/3 pour un fragment, soit pour les deux fragments de fissions, $2/3 \cdot 8 \cdot 10^4 = \mathbf{5.3 \cdot 10^4 \text{ déplacements}}$.

C'est tout de même extraordinaire de retrouver le résultat de Brinkman de 1959 !!

4.3 Résultat brut SRIM

Le fichier VACANCY.txt donne environ comme on l'a vu lors des illustrations $1.6 \cdot 10^5$ défauts créés par un seul ion Xénon de 80 MeV. Ce résultat est environ deux fois supérieur à NRT, soit 6 fois supérieur à NRT/3.

L'article [2] explique clairement que selon l'ion et la cible considérés, les écarts entre SRIM (full cascade) et SRIM (quick calculation basé sur le modèle NRT) varient entre un facteur 1 à 4, et il est souvent cité une valeur de l'ordre de 2. Il n'est donc pas étonnant de retrouver cette surestimation.

Ici, j'obtiens entre les deux modes de SRIM un facteur $1.6 \cdot 10^5 / 87487 = 1.82$, qui confirme bien ce qu'indique la littérature.

5. Discussion

Les premiers travaux analytiques sur les dommages de collision dans les solides irradiés remontent aux estimations de Carl Brinkman à la fin des années 1950. En s'appuyant sur la théorie des collisions élastiques et sur la partition d'énergie décrite par Jens Lindhard, ces travaux ont fourni des estimations du nombre de déplacements atomiques produits par une particule énergétique dans un solide.

Ces approches reposaient sur trois ingrédients physiques simples : la fraction d'énergie transférée aux collisions nucléaires, une énergie seuil de déplacement E_d , une cascade de collisions binaires.

Cette structure conceptuelle est restée à la base des modèles ultérieurs.

Le modèle de déplacements introduit ensuite par M. J. Norgett, M. T. Robinson et I. M. Torrens constitue aujourd'hui la référence analytique standard pour l'estimation des déplacements d'atomes (modèle NRT-dpa). Il exprime le nombre de déplacements comme : $N_d \approx 0.8 T_d / 2E_d$ où T_d est l'énergie déposée dans les collisions nucléaires.

Ce modèle prolonge en pratique les raisonnements physiques utilisés dans les estimations analytiques antérieures, dont celles de Brinkman.

Les codes de simulation de trajectoires d'ions, en particulier SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter), permettent aujourd'hui de calculer les pertes d'énergie électroniques et nucléaires, de suivre les cascades de collisions binaires, et d'estimer le nombre de défauts ponctuels produits.

Ces outils représentent un progrès considérable pour la description détaillée de la trajectoire des ions et de la distribution spatiale des cascades.

De nombreuses études comparant les simulations de cascades binaires, les simulations de dynamique moléculaire, et les observations expérimentales, montrent que les modèles de type NRT surestiment généralement le nombre de défauts stables.

La raison physique principale est la recombinaison importante des défauts à l'intérieur de la cascade de collision immédiatement après sa formation et sur différentes échelles de temps.

En conséquence, les évaluations basées sur l'énergie de dommage doivent souvent être pondérées par un facteur de réduction, typiquement de l'ordre de 0.2–0.4 selon les matériaux et les conditions d'irradiation, d'où la règle empirique NRT/3 !

Un résultat frappant de cette comparaison méthodologique est que les estimations analytiques pionnières réalisées par Brinkman en 1959 conduisaient déjà à des ordres de grandeur très proches des évaluations actuelles du nombre de défauts effectivement stabilisés dans le matériau.

Ainsi, les méthodes modernes permettent une description beaucoup plus détaillée de la physique des cascades, mais leur interprétation conduit finalement à réduire les estimations brutes issues des modèles analytiques classiques par un facteur empirique proche de trois.

6. Conclusion

L'évolution des méthodes d'estimation des dommages d'irradiation peut être résumée de la manière suivante :

1. **Estimations analytiques pionnières** (Brinkman) fondées sur la physique des collisions ;
2. **Formalisation standard** avec le modèle NRT ;
3. **Simulations numériques détaillées** avec SRIM et les codes modernes de cascades ;
4. **Correction physique** liée à la recombinaison intra-cascade, phénomène connu et multi-échelles non capturé complètement dans les codes simplifiés évoqués.

Cette progression montre que l'apport principal des outils numériques n'est pas tant de modifier l'ordre de grandeur des estimations initiales que d'en préciser les mécanismes physiques et les facteurs correctifs. De façon paradoxale, alors que les simulations modernes permettent de suivre des cascades contenant des milliers de collisions individuelles, leur interprétation conduit finalement à appliquer un facteur de réduction empirique de l'ordre d'un tiers aux estimations analytiques issues des modèles classiques.

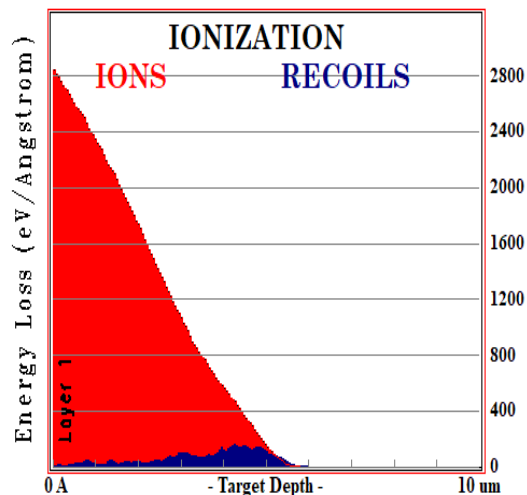
Dans ce contexte, les estimations pionnières de Brinkman apparaissent rétrospectivement remarquablement proches de l'échelle physique pertinente pour le nombre de défauts effectivement stabilisés dans le matériau irradié. C'est pourquoi nous considérerons en priorité les évaluations de Brinkman quand nous aurons besoin d'évaluer les défauts créés dans un cristal d'uranium par ses propres fragments de fission.

Annexe 3 Estimation du nombre de déplacements atomiques produits par un ion Xe de 80 MeV dans un cristal de type U2Ti

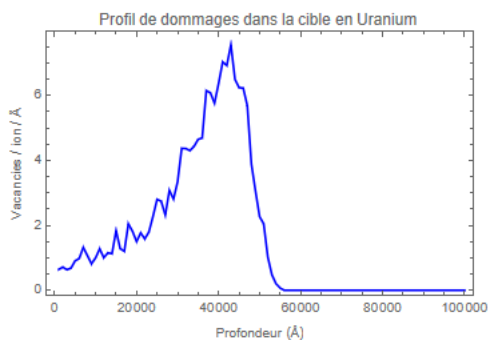
On ne reprend pas entièrement ici les développements de l'Annexe 2, à laquelle on pourra se reporter utilement pour la compréhension de ce qui suit.

Nous nous contentons ici d'analyser ce qui se passe à l'aide du code SRIM lorsque qu'un ion Xe de 80 MeV percute une cible constituée d'un cristal de U2Ti, de densité 15.1 g/cm^3 .

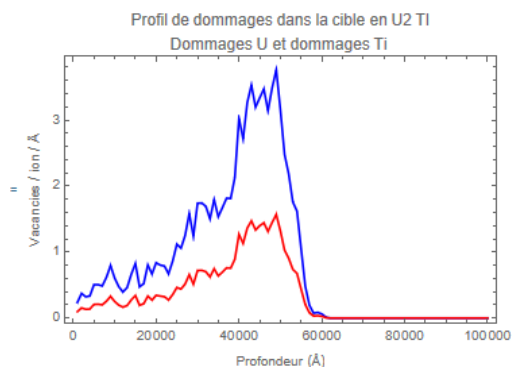
La physique du ralentissement des ions Xénon, de l'ionisation induite et des noyaux de recul produits dans U2Ti reste la même que dans l'uranium pur. Les parcours sont légèrement plus longs dans U2Ti car ce matériau est moins dense que l'uranium pur.



La figure ci-dessous à gauche rappelle le résultat de l'Annexe 2, et présente le profil de dommages créés par un ion Xénon dans une cible en Uranium, en indiquant le nombre de sites Uranium rendus vacants tout au long du parcours de l'ion Xénon. La figure ci-dessous à droite montre la même chose dans la cible en U2Ti, les sites laissés vacants pour le Titane étant représentés en rouge



157894 atomes U déplacés



83794 U et 34850 Ti déplacés

Comme on pouvait s'y attendre, les ions Xénon sont arrêtés plus tôt dans la cible U pur de densité 19 g/cm^3 , alors que la cible U2Ti est plus "légère" avec une densité de 15.1 g/cm^3 . On observe également en relatif dans U2Ti une diminution des dommages totaux sur tout le parcours des ions Xénon.

On obtient directement $34850 / (83794 + 34850) = 29.4 \%$ de déplacements d'atomes de Ti sur la figure de droite par rapport aux déplacements totaux des atomes de la cible U₂Ti. Et si on compare avec la figure de gauche, on obtient $34850 / 157894 = 22 \%$ d'atomes Ti déplacés.

Rappelons que l'estimation des défauts induits dans l'Uranium par un fragment de fission est 54000 déplacements. **Selon le ratio considéré, le nombre de défauts induits dans le seul Titane sera compris entre 12000 et 16000 défauts par réaction nucléaire.**

C'est beaucoup moins que les défauts induits dans l'Uranium qu'il soit pur (54000 défauts), ou associé dans un cristal de Titane (29000 défauts).

Mais cela reste très significatif.

Annexe 4 Trajectoire circulaire d'ions (fragments de fission) dans un champ magnétique

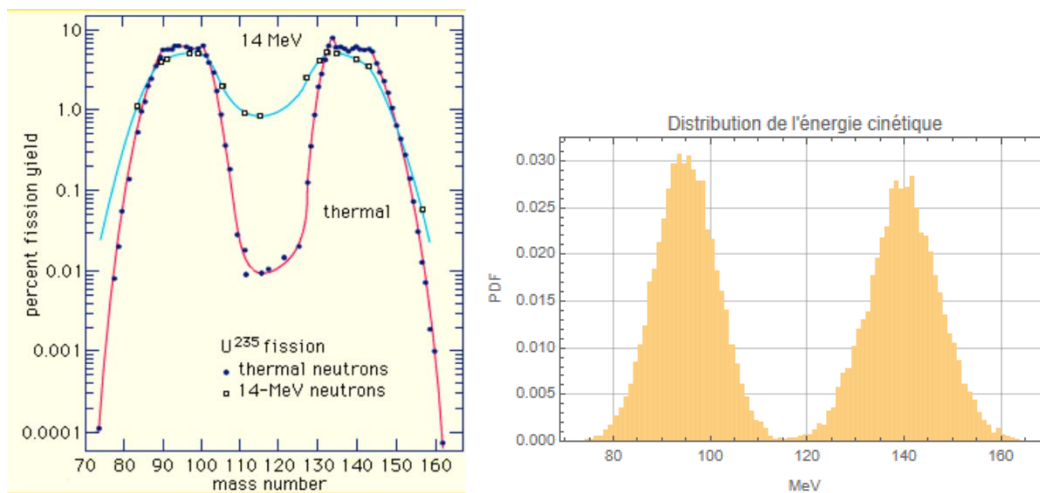
Quelques rappels sur la fission de l'U5

Pour la fission thermique de l'uranium-235, le tableau général est le suivant : le noyau absorbe un neutron, forme brièvement $^{236}\text{U}^*$, puis se scinde en deux fragments de masse intermédiaire, plus 2 à 3 neutrons prompts et des γ prompts; l'énergie totale libérée est typiquement d'environ 200 MeV par fission, dont l'essentiel est emporté par l'énergie cinétique des fragments de fission.

Produits de fission

Il n'existe pas un seul couple de produits de fission : il y a une **distribution** de fragments, avec deux "bosses" de rendement autour des masses ~ 95 et ~ 140 . Les chaînes de fission de l'U-235 produisent souvent des noyaux comme le krypton, le xénon, le strontium, le baryum, le zirconium, le césium, le ruthénium, le molybdène, etc., puis leurs descendants radioactifs par désintégrations β^- successives.

L'énergie cinétique des fragments est modélisée par la figure ci-dessous à droite à l'aide de Mathematica.



Énergie libérée

L'ordre de grandeur utile est **~ 200 MeV par fission**. Dans les bilans cités, on trouve typiquement environ 168–169 MeV sous forme d'énergie cinétique des fragments modélisée ci-dessus, ~ 5 MeV pour les neutrons prompts, ~ 7 MeV pour les γ prompts, puis quelques MeV supplémentaires au cours des désintégrations bêta et gamma retardées. En unités SI, cela correspond à environ 3.2×10^{-11} J par fission.

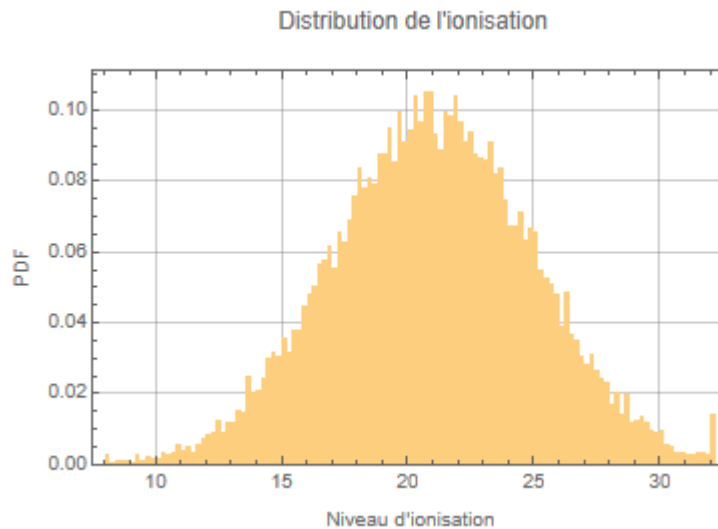
Avec de telles énergies cinétiques, les fragments de fission possèdent une vitesse de l'ordre de quelques pour cents de la vitesse de la lumière. On peut donc traiter la suite de manière classique et non relativiste.

Ionisation des fragments

Les fragments de fission sont **extrêmement ionisés au moment de leur naissance**. Juste après la scission, ils sont très chargés parce qu'ils ont perdu beaucoup d'électrons dans le milieu nucléaire et ionisent très fortement la matière lors de leur ralentissement; ensuite, en un temps très court, ils capturent des électrons et deviennent des atomes ordinaires de fission, avant de se désintégrer par β^- . En pratique, leur degré d'ionisation instantané dépend du milieu, de leur vitesse et de la charge moyenne effective, donc il n'existe pas une "valeur unique" universelle valable dans le vide et

dans tous les matériaux; ce qu'on mesure le plus souvent, c'est leur puissance d'ionisation et leur perte d'énergie dE/dx , pas seulement un état de charge fixe.

Lors de leur production, les fragments de fission sont ionisés en moyenne 21 fois, avec un écart type de 4 degrés d'ionisation. C'est ce que représente la courbe ci-dessous.

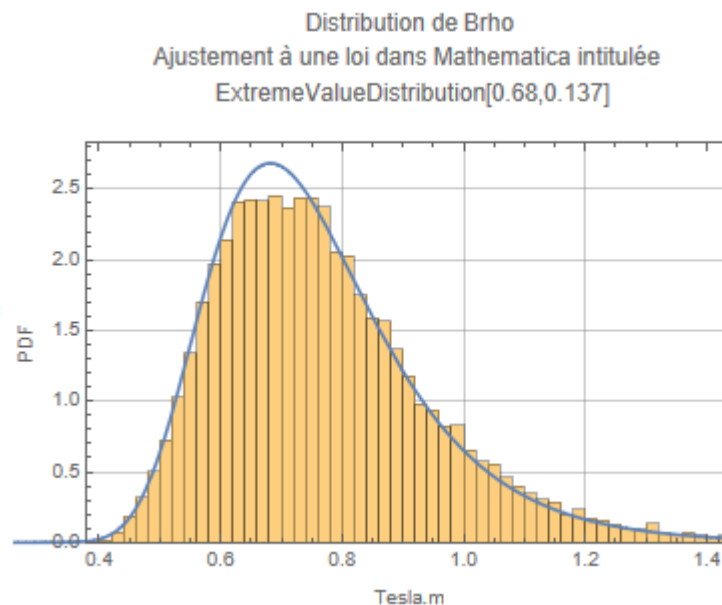


Emploi d'un champ magnétique pour confiner les fragments de fission

La relation simple suivante donne la valeur du produit $B \cdot \rho$, exprimée en Tesla mètres. B représente le champ magnétique nécessaire pour confiner sur une trajectoire circulaire de rayon ρ un ion chargé Q fois et possédant une quantité de mouvement p .

$$B \rho = p/Q$$

A l'aide des distributions précédentes, de l'énergie cinétique et des niveaux d'ionisation, on en déduit une loi de distribution du terme $B \rho$ dans un code Mathematica.

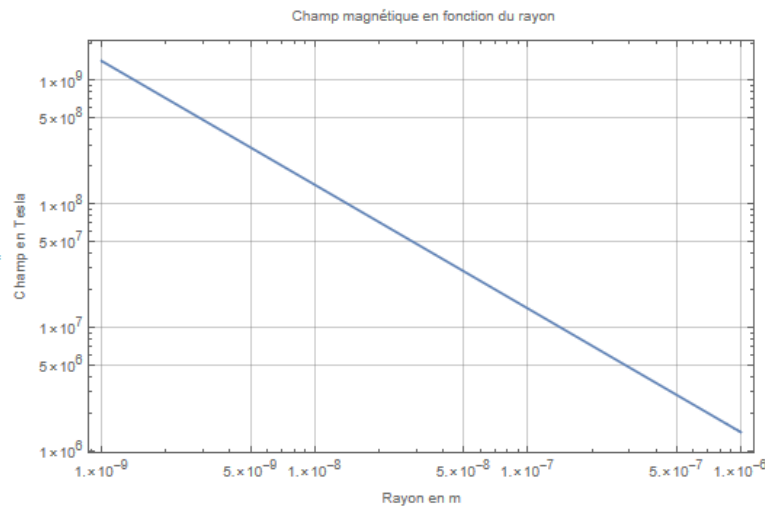


Si on veut confiner 99 % des ions issus des différents fragments de fission, il faut un B rho de 1.42 Tesla mètre.

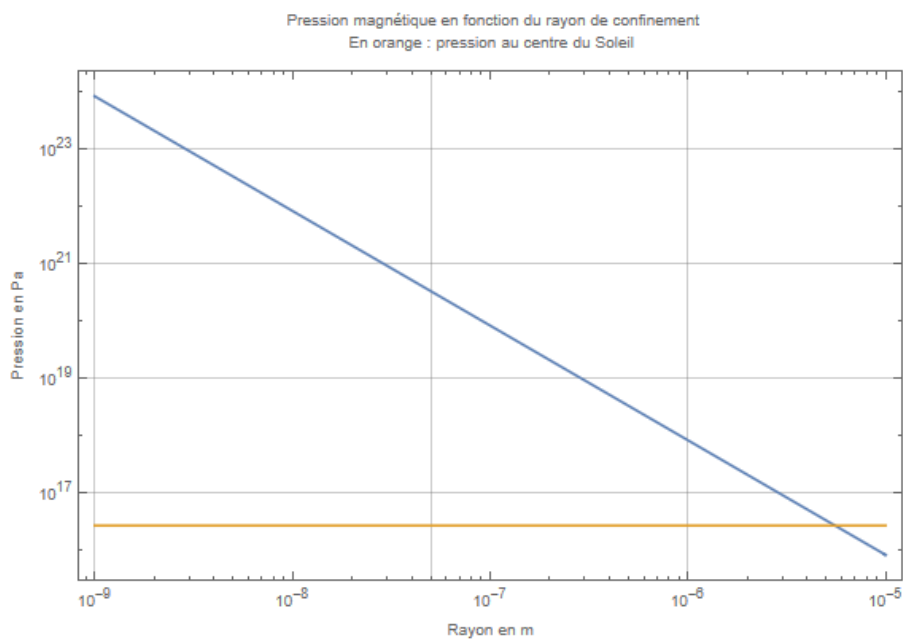
Exemples

Avec un champ magnétique de 1 Tesla, un fragment de fission est confiné avec une probabilité de 0.99 sur une trajectoire circulaire de 2.84 m de diamètre. Cela suppose une évolution dans un vide extrêmement poussé.

La courbe suivante présente des valeurs de champ nécessaires quand on veut des confinements très petits. Pour un rayon de 1 micron, on devrait produire un champ de l'ordre de 1 Million de Tesla !



A supposer que l'on sache produire un tel champ magnétique, celui-ci engendrerait une pression magnétique phénoménale comme le montre la courbe suivante : aucun matériau ne résisterait.



Pour information, la pression au centre du Soleil est de l'ordre de 2.6×10^{16} Pascals et correspondrait à un rayon de confinement de 5 à 6 μm largement insuffisant pour répondre à notre besoin.