

Jonathan Sanéus  
Zachary Caron  
Joachim de Fourestier  
Sciences de la Nature

Les effets d'une bombe nucléaire

Travail présenté à  
Abdessamad Benhsaien  
Dans le cadre du cours  
Projet de Mathématiques  
201-EYF-03  
Groupe 00001

Cégep de l'Outaouais  
Campus Gabrielle-Roy  
15 mai 2015

---

## Table des matières

---

|  |    |
|--|----|
| Abstract.....  | 3  |
| Résumé.....  | 3  |
| Principes Généraux .....   | 4  |
| Introduction.....  | 4  |
| Notions de base d'une fission nucléaire.....                                   | 4  |
| La masse critique .....  | 5  |
| Notions de base d'une fusion nucléaire .....                                   | 6  |
| Estimation de l'énergie libérée d'une bombe atomique .....                     | 7  |
| Effets de l'impulse électromagnétique (EMP) dans une explosion nucléaire ..... | 8  |
| Radiotoxic effects .....   | 11 |
| La retombée radioactive : «Fallout» .....                                      | 12 |
| La retombée radioactive globale (mondiale) .....                               | 12 |
| La retombée radioactive locale .....   | 12 |
| Loi de décroissance radioactive .....  | 13 |
| L'émission de radioactivité et la désintégration radioactive.....              | 15 |
| Activité de l'Uranium 235 ( $U^{235}$ ).....                                   | 17 |
| Calcul de la radioactivité d'un isotope.....                                   | 17 |
| Fission spontanée .....  | 18 |
| Blast Waves .....  | 19 |
| Blast Wave Estimation & G. I. Taylor.....                                      | 19 |
| Damage caused by blast waves.....  | 20 |
| Estimation de l'énergie par la méthode de G.I. Taylor.....                     | 21 |
| Mach Stem Formation.....   | 22 |
| Effects of blast loads on buildings .....                                      | 22 |
| Thermal radiation.....   | 23 |
| Severity of Burns .....  | 24 |
| First degree burns.....  | 24 |
| Second degree burns .....  | 24 |
| Third degree burns .....   | 24 |
| Fourth degree burns .....  | 24 |

|  |    |
|--|----|
| Second to fourth degree burns .....                                    | 24 |
| Calcul approximatif des rayons destructifs des effets nucléaires ..... | 25 |
| Rayon destructif pour les effets thermiques.....                       | 25 |
| Rayon destructif pour l'effet de souffle : « Overpressure ».....       | 27 |
| Rayon destructif pour les effets de radioactivité.....                 | 28 |
| Validation des calculs approximatifs des rayons destructifs .....      | 30 |
| Références.....  | 31 |

## **Abstract**

---

This paper attempts to understand the effects of a nuclear fission bomb. Additionally, we estimated and were able to predict these effects both quantitative (Blast waves, Thermal effects and Radiation) and qualitative (Radiotoxic waste, Electromagnetic emissions and Climatic effects). Using the basics of nuclear physics based on mathematical models (interpolation, extrapolation, etc.), we have provided a way to approximate these effects. The approximations made were then validated by comparing our results with the data from the Hiroshima bomb and experimental nuclear simulations. Our research makes it possible to predict worst case scenarios in order to develop preventive measures if such a case should happen. The results obtained showed a minimal margin of error.

## **Résumé**

---

Ce rapport tente d'expliquer les effets de la fission nucléaire de la bombe. De plus, nous étions en mesure d'estimer et de prédire les effets quantitatifs (Effet de souffle, Effet thermique et Radiation) et les effets qualitatifs (Déchets radiotoxiques, Émissions électromagnétiques et Effet climatique). En utilisant la base de la physique sur les modèles mathématiques (interpolation, extrapolation, etc.), nous avons trouvé une façon d'estimer ces effets. Les approximations trouvées ont été validées en comparant nos résultats avec les données de la bombe Hiroshima des simulations nucléaires expérimentales. Nos recherches font en sorte qu'il est possible de prédire les pires scénarios pour développer des mesures préventives si jamais cela arrivera. Les résultats obtenus ont montré une petite marge d'erreur.

## Principes Généraux

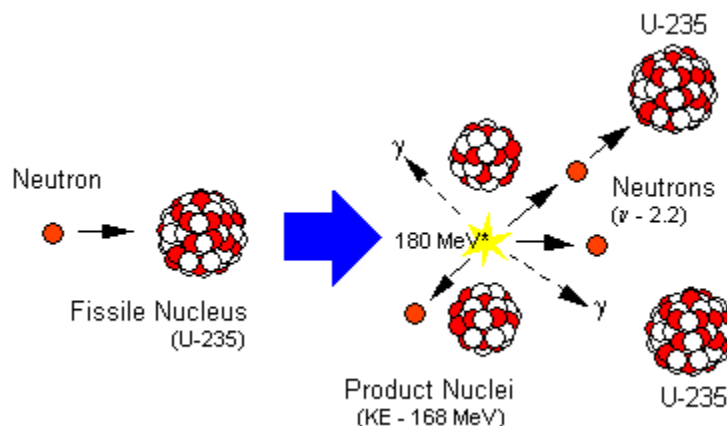
### Introduction

Une explosion est le résultat d'une grande somme d'énergie libérée rapidement dans un espace limité ou confiné. La différence avec les bombes nucléaires, c'est qu'on ne fait plus simplement briser des liens intramoléculaires, mais plutôt intra-atomiques. Autrement dit, l'énergie libérée par le mouvement des photons provient en effet de la manipulation de l'atome : Fission pour la décomposition de l'atome, Fusion pour la recombinaison de l'atome. En principe, une réaction est connue pour une chaîne de réactions très rapides.

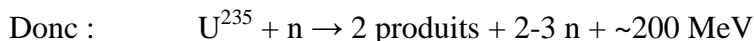
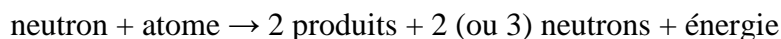
### Notions de base d'une fission nucléaire

Pour la fission nucléaire, on procède par les collisions entre les neutrons libérés par la radioactivité d'une substance fissile avec d'autres atomes de cette même substance.

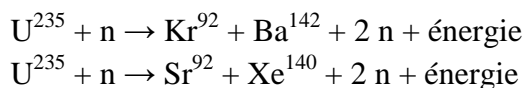
**Figure 1** : Fission nucléaire de l'Uranium 235



La règle générale d'une fission nucléaire c'est :



Il existe plusieurs résultats possibles pour une fission. Ceci est parce que les produits se dégradent selon leurs temps de demi-vie ainsi que toutes les collisions ne sont pas exactement les mêmes partout. Ceci est la fragmentation (décroissance) de fission. Pour  $\text{U}^{235}$ , en voici quelques-uns<sup>1</sup> :



<sup>1</sup> <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/fisfrag.html>

À chaque collision neutron-atome, on obtient une nouvelle « génération ». À chaque génération, on obtient 2 produits, ou plutôt, 2 atomes moins lourds que l'atome mère. Ceci dit, on peut calculer le nombre de fissions (de collisions neutron-atome) :

$$N^{\circ}_{Fissions} = 2^{n^{\circ} \text{génération}}$$

À chaque fission, on obtient de l'énergie libérée en moyenne de 200MeV composé de (valeurs approximatives) :

- 165 MeV : énergie cinétique des produits
- 7 MeV : Rayons gamma
- 6 MeV : énergie cinétiques des neutrons libres
- 7 MeV : énergie potentielle des produits
- 6 MeV : Rayons gamma des produits
- 9 MeV : Antineutrinos des produits

NB. 1 eV  $\approx$  1,609 x 10<sup>-19</sup> Joules, 1 MeV  $\approx$  1 x 10<sup>6</sup> eV

### La masse critique

C'est la masse minimale pour que la réaction devienne autonome. Plus précisément, « [la] masse critique d'un matériel fissible est la quantité de ce matériel nécessaire au déclenchement d'une réaction nucléaire en chaîne de fission nucléaire. »<sup>2</sup>

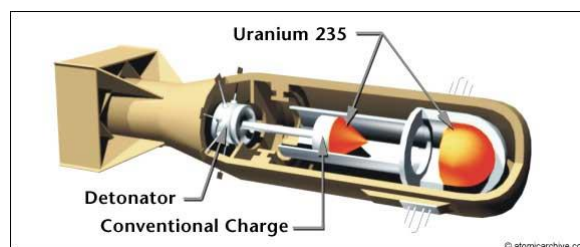
### Exemples :

U<sup>235</sup> : environ 15 kg (presque pure)

P<sup>239</sup> : environ 5 kg (presque pure)

NB. « C'est l'une des raisons pour lesquelles on ne peut pas construire de très petites bombes atomiques! »<sup>3</sup> En outre, la masse critique est seulement un minimum. Il faut préciser que cette masse minimale ne va pas nécessairement réagir au complet. Par exemple, la bombe d'Hiroshima avait un total de 64kg (une masse supercritique), mais seulement un peu moins de 1kg avait réagi.

**Figure 2** : Schéma simplifié de la bombe d'Hiroshima (« Little Boy »)



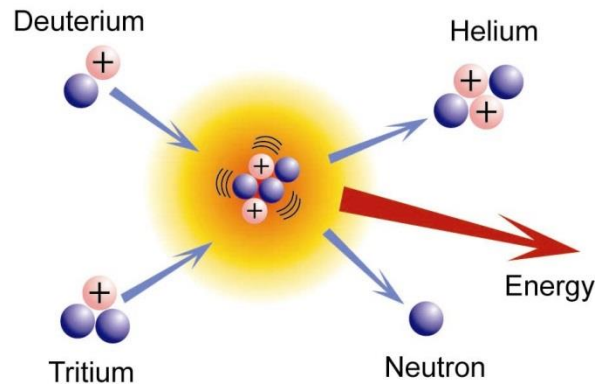
<sup>2</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse\\_critique\\_%28r%C3%A9action\\_nucl%C3%A9aire%29](https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_critique_%28r%C3%A9action_nucl%C3%A9aire%29)

<sup>3</sup> « Nucléaire, pour quoi faire? », Jean-Baptiste de Panafleau, 2012, ISBN : 9782354881757

### Notions de base d'une fusion nucléaire

L'énergie nucléaire peut être libérée à partir de deux éléments très légers. Le concept c'est en fusionnant le deutérium et le tritium, deux isotopes d'hydrogène, pour former un noyau d'hélium et un neutron libre.

**Figure 3 :** Fusion nucléaire produisant de l'Hélium 4



Cette fusion produit environ 17.6 MeV d'énergie. Contrairement à la fission nucléaire, il n'y a pas de limite sur la quantité de fusion qui peut s'effectuer.<sup>4</sup> « Contrairement à la fission nucléaire, les produits de la fusion eux-mêmes (principalement de l'hélium 4) ne sont pas radioactifs, mais lorsque la réaction utilisée émet des neutrons rapides, ces derniers peuvent transformer les noyaux qui les capturent en isotopes pouvant l'être. »<sup>5</sup>

<sup>4</sup> <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/fusion.html>

<sup>5</sup> [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion\\_nucl%C3%A9aire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion_nucl%C3%A9aire)

## Estimation de l'énergie libérée d'une bombe atomique

---

Il est possible de calculer théoriquement la quantité d'énergie libérée pour une certaine quantité de substance fissile. Ceci dit, on prendra l'exemple d'Hiroshima pour démontrer comment on procède à cette estimation.

On sait que la bombe d'Hiroshima (« Little Boy ») avait 64 kg d' $U^{235}$ , mais seulement moins de 1 kg a réagi. On a déjà calculé, en avance, cette masse qui est d'environ 0.7539537 kg d'uranium 235 (nous avons trouvé cette valeur en faisant le calcul inverse). On vérifie nos calculs avec cette valeur calculée.

Sachant que l'énergie produite par chaque fission est en moyenne de  $\sim 202,8$  MeV ( $3,2489 \times 10^{-11}$  joules), on peut calculer l'énergie totale pour une masse selon le nombre d'atomes. Ceci dit, ce calcul donnera la quantité maximale d'énergie libérée, parce qu'on suppose qu'il y a eu fission complète.

Pour ce faire, on calcul d'abord le nombre d'atomes pour 0.7539537 kg d'uranium 235.

$$\text{Nombre d'atomes } U^{235} = \frac{753.9537 \text{ g}}{235.0439299 \text{ g/mol}} \times (6.0221 \times 10^{23}) \approx 1.932 \times 10^{24} \text{ atomes}$$

Ensuite, on calcule l'énergie totale. Autrement dit, la somme produite de tous les atomes :

$$E_{\text{totale}} = (1.932 \times 10^{24}) \times (3.2489 \times 10^{-11}) = 6.276 \times 10^{13} \text{ joules}$$

Finalement, on convertit cette énergie en kilotonnes de TNT (kT) avec un facteur de conversion :

$$E_{\text{totale}} = \frac{6.276 \times 10^{13} \text{ J}}{4.184 \times 10^{12} \text{ J/kT}} = 15.0 \text{ kT}$$

Donc, on sait qu'une masse d'environ 0.754 kg  $U^{235}$  a subi la fission nucléaire, produisant une explosion d'environ 15 kilotonnes de TNT. Un programme SciLab « CalcTNT.sce » a été écrit pour faciliter ce calcul.

NB. Ce calcul suppose qu'il n'y aura pas de seconde fission pour les atomes « enfants » de l'atome « parent », parce que ces atomes « enfants » ne sont pas considérés fissiles.



## **Effets de l'impulse électromagnétique (EMP) dans une explosion nucléaire**

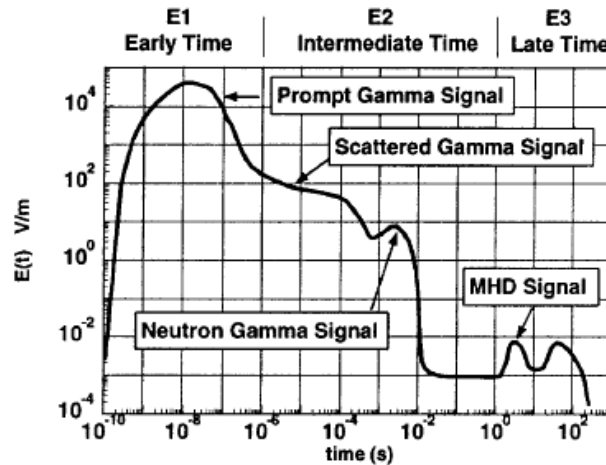
---

L'impulsion électromagnétique, connue aussi sous l'acronyme anglais EMP a été découverte pour la première fois en 1945, et ce, par accident. En effet, l'impulse électromagnétique est un effet secondaire d'une bombe atomique. Autrement dit, cet effet a été découvert par accident lors des tests d'explosions nucléaires. L'EMP se produit par l'émission d'ondes électromagnétiques brèves et de forte amplitude. Il existe trois composantes de l'EMP nucléaire ayant des propriétés différentes : les impulsions E1, E2 et E3.

**E1** est la plus rapide des trois. Le champ électrique est bref, mais très intense. Celle-ci est la principale cause de surtension dans les conducteurs électriques lors de l'explosion. E1 se produit quand les rayons gamma de la réaction nucléaire propulsent des électrons en dehors de leur atome, dans l'atmosphère supérieure. Les électrons propulsés vers le haut redescendent à une vitesse équivalant à 90 % de la vitesse de la lumière. Le champ magnétique terrestre agit sur l'influx d'électrons en changeant sa direction perpendiculairement (le long du sol). Cela crée une très grande, mais brève impulsion électromagnétique sur la zone touchée.

**E2** est un temps intermédiaire de l'impulsion électromagnétique. Celle-ci peut durer de 1 microseconde ( $\mu\text{s}$ ) à 1 seconde. E2 est l'impulsion souvent dite la plus facile à se protéger, car elle est similaire à la foudre. L'impulsion électromagnétique d'E2 n'est pas aussi puissante que la foudre, mais étant donné les avancements technologiques de protection contre la foudre, celle-ci est la moins dangereuse. Elle est engendrée par des rayons gamma dispersés et des rayons gamma inélastiques produits par les neutrons des armes, dans notre cas, de l'Uranium 235.

**E3** est différent de E1 et E2; elle se manifeste par une impulsion lente (de 10 à plus de 100 secondes de durée). E3 est causée par le déplacement du champ magnétique terrestre de sa position habituelle (provoquée par la bombe nucléaire) puis son retour à la position initiale. E3 est similaire à une tempête géomagnétique, car elle peut engendrer des courants géomagnétiques induits dans les grands conducteurs électriques et par la suite abîmer ses composantes, comme les transformateurs.



**Figure 5 :** Force du champ électrique en fonction du temps lors d'une HEMP

Il existe 5 facteurs principaux d'efficacité d'une EMP

- L'altitude de l'arme nucléaire
- Le rendement de l'arme nucléaire
- La distance entre l'arme et la cible
- Les caractéristiques géographiques
- La force locale du champ magnétique terrestre

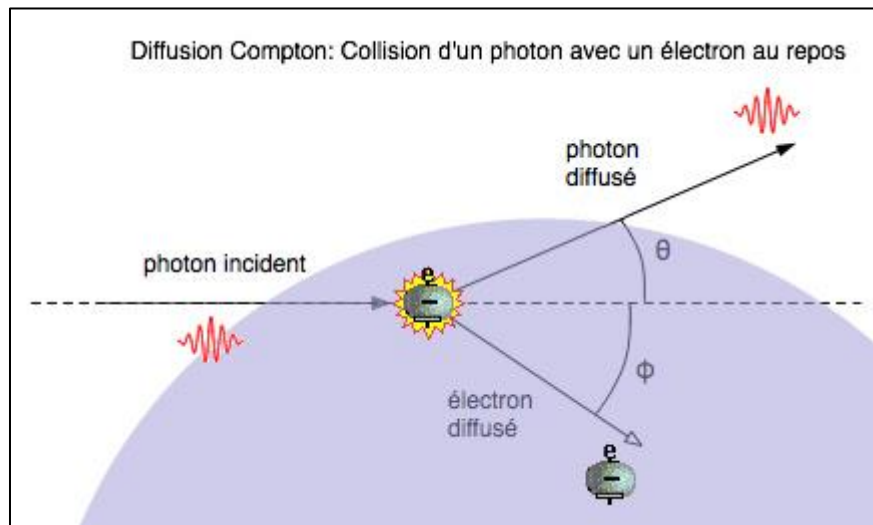
Cependant, dans le cas de la bombe nucléaire d'Hiroshima, les effets E1, E2 et E3 ne seront pas présents, car pour obtenir ces 3 types d'EMP, il aurait fallu que celle-ci explose en plus haute altitude. On caractérise ce type d'explosion nucléaire comme HEMP (High altitude EMP). Ce type d'impulse électromagnétique ne se passe qu'en delà de 20 km d'altitude par rapport au sol ou à la cible visée. Or la bombe Hiroshima n'a été relâchée qu'à 600 m d'altitude. Par contre, on obtient toujours un impulse électromagnétique, malgré que celui-ci soit moins important que dans le cas d'une HEMP.

Alors on parle de pulse électromagnétique nucléaire à faible altitude (SREMP – *Source-region EMP*) en ce qui concerne la bombe Hiroshima. Dans la SREMP, il se produit un courant d'électrons vertical descendant vers le sol formé par la déposition asymétrique des électrons dans l'atmosphère et au sol. L'asymétrie de ces électrons est due au fait que certains électrons vont être pris dans la surface terrestre et d'autres vont être réfléchis vers le haut (grâce au champ magnétique terrestre) et vers l'atmosphère. Ces derniers provoquent une ionisation de l'atmosphère et des charges de séparation. La formation et la dissipation de ce courant émettent un pulse électromagnétique dans la direction perpendiculaire au courant.

Ce sont les rayons gamma produits par l'explosion nucléaire qui va enclencher la réaction du pulse électromagnétique en se frappant à des électrons des molécules d'air environnant. Ces électrons de haute énergie vont aussi frapper d'autres électrons, et ainsi de suite pour produire une réaction en chaîne formant le pulse. Cette collision de rayons gamma avec les électrons se nomme diffusion Compton (effet Compton – voir la figure ci-dessous).

La SREMP peut engendrer des champs électriques au-dessus de 100 000 Volts/mètre et des champs magnétiques pouvant atteindre 4000 ampères/mètres dans la région affectée. Cela provoque des dégâts beaucoup plus graves qu'une HEMP, mais dans une région plus petite.

**Figure 6 : L'effet Compton**



## **Radiotoxic effects**

---

After the bomb's detonation, radiotoxic exposures can be deadly to life forms not only humans but also animals and plants. Human health can be affected by many ways like severe degree burns caused by the thermal flash, the heat and the blast wave. During the first weeks, the initial stage contains the greatest number of deaths. This is between week 1 and 9 inclusive. 90% of deaths are due to thermal injuries and blast effects. Furthermore, 10% of deaths are due to super-lethal radiation. Right after the initial stage is the intermediate stage which is between week 10 and 12. Deaths in during this period are from ionizing radiation: high energy waves from the electromagnetic spectrum such as ultraviolet, x-rays and gamma rays. Week 13 to 20 is called the late period. This is when the survivor's condition shows some improvement. Body parts start to heal and regenerate for some survivors depending on their condition. The last period is called the delayed period starting from week 20. It is characterized by numerous complications, related to thermal and mechanical injuries. The effects can cause disorders like infertility, subfertility, blood problems or mutations. After the explosion, the chance of dying earlier in one's lifetime is increased if body parts are exposed to radiation (causing cancer, etc.). A heightened rate of cancer spread would start after at least 5 years. And in other cases that are not as bad, one can develop eye cataracts or other minor effects in organs and tissues.

## La retombée radioactive : «Fallout»

La retombée radioactive ou « fallout », c'est le matériel radioactif qui est propulsé et mis en suspension dans l'atmosphère. C'est essentiellement de la pollution nucléaire composée d'un mélange de poussière, de cendre, de débris et du restant du matériel radioactif non fissionné. Le « fallout » va parfois prendre la forme de la pluie noire (« black rain »), la pluie étant noircie par le mélange radioactif. Après l'onde de choc et l'explosion, ce matériel *radioactif* extrêmement dangereux *retombe* du ciel. Il existe deux types de retombée radioactive : globale et locale.

### La retombée radioactive globale (mondiale)

Ce matériel sera propulsé dans la stratosphère si le rendement de la bombe est supérieur à 10 kT. Ce dernier est ensuite dispersé sur un niveau global, propagé par le vent et graduellement se poser sur la surface de la Terre. Ce danger radiotoxique est essentiellement un danger à long terme en raison de la bioaccumulation d'isotopes radioactifs avec de longues demi-vies comme le strontium 90 (28.8 années) ou le césium 137 (30 années).

### La retombée radioactive locale

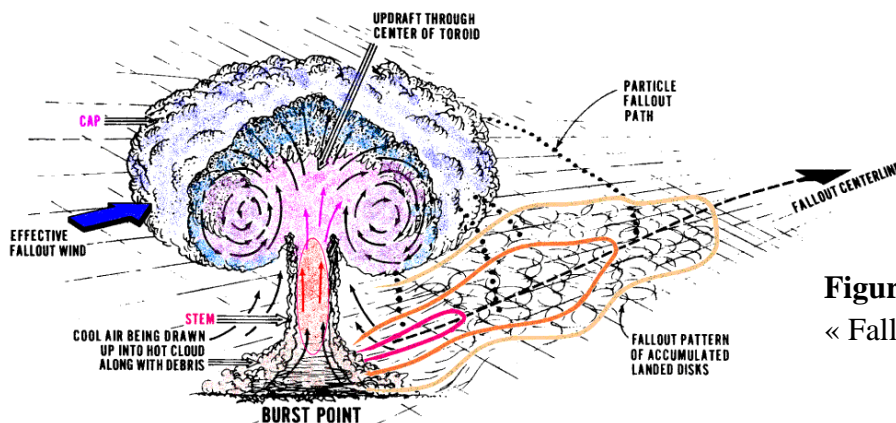


Figure 4 : Exemple de l'effet « Fallout » dispersé par le vent

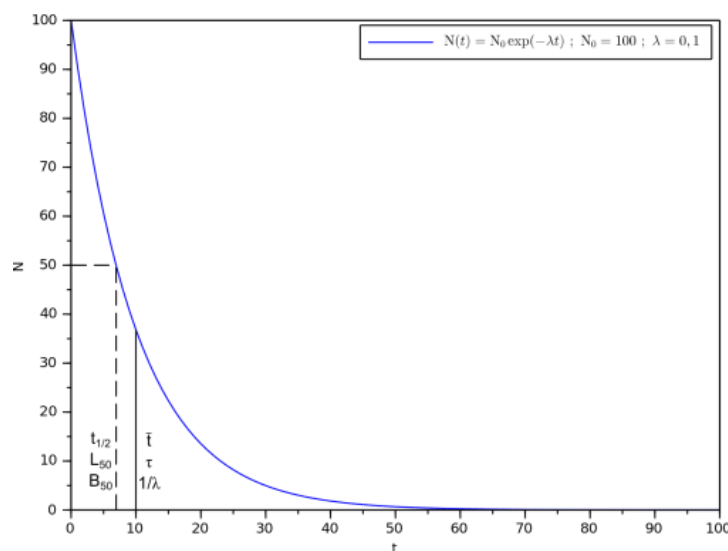
Sur la surface des environs de l'épicentre de l'explosion, la chaleur intense produite par l'arme nucléaire va vaporiser beaucoup de terre ou d'eau dans le ciel. Cette quantité va se condenser le nuage radioactif. Cette retombée va ensuite contaminer de grande surface de terre et d'eau potable ce qui pourra causer des mutations chez les animaux et les humains. Ces particules fines, moins de 100 nm en diamètre, produit en grande quantité, vont contribuer à la retombée radioactive globale (mondiale). En moins d'une heure, la retombée radioactive se rend déjà dans les environs du « Ground Zero » (la surface terrestre qui est le plus proche de l'origine de l'explosion). En moins de 24 heures, plus de la moitié des débris de la bombe nucléaire atteint le sol. La sévérité de cet effet radiotoxique dépend du climat. Avec des vents forts, le « fallout » se rend plus loin et retombera à la même vitesse, mais elle sera plus diluée, plus dispersée. Si on est en présence d'un orage, l'activité peut être grandement réduite en raison de la pluie.

## Loi de décroissance radioactive

**Tableau 1** : Représentation de la décroissance radioactive d'un isotope quelconque

| Nombre de demi-vies passées | Fraction restante                                | Pourcentage restant          |
|-----------------------------|--|------------------------------|
| 0                           | 1  | 100 %                        |
| 1                           | 1/2  | 50 %                         |
| 2                           | 1/4  | 25 %                         |
| 3                           | 1/8  | 12,5 %                       |
| 4                           | 1/16   | 6,25 %                       |
| 5                           | 1/32   | 3,125 %                      |
| ...                         | ...  |                              |
| 10                          | 1/1 024  | 0,097 656 %                  |
| ...                         | ...  |                              |
| 20                          | 1/1 048 576                                      | ~ 0,000 10 %                 |
| ...                         | ...  |                              |
| 78,995                      | $\frac{1}{N_A} = \frac{1}{6,022 \times 10^{23}}$ | $1,660 5 \times 10^{-22} \%$ |
| ...                         | ...  |                              |
| $N$                         | $\frac{1}{2^N}$                                  | $\frac{100}{2^N} \%$         |
| ...                         | ...  |                              |

**Figure 7** : Population suivant une décroissance exponentielle  $N(t)$



Demi-vie (médiane) et durée de vie moyenne (espérance) d'une population ayant une décroissance exponentielle. Notez bien que la population n'atteindra jamais 0.

La décroissance radioactive est caractérisée comme un processus de Poisson. La probabilité de désintégration est indépendante des facteurs extérieurs et de modifications antérieures et futures. Dans le cas de la dérivation de la loi de probabilité, il faut alors introduire une échelle de temps proportionnelle à la demi-vie. Pour cela on introduit la probabilité cumulative.

$$U(t) = \text{Prob}T > t$$

La probabilité d'une désintégration radioactive après un temps  $t$ . Étant donné que la désintégration est indépendante de  $t$ ,  $U(t)$  est la probabilité conditionnelle qu'il y ait une désintégration à l'instant  $t + s$  sachant qu'il n'y a pas de désintégration à l'instant  $t$  ( $U(t + s)/U(s)$ ). Ainsi la probabilité cumulative satisfait cette équation :

$$U(t + s) = U(t) \times U(s)$$

Dans le cas d'une fonction qui peut être mesurée, l'unique solution est sous la forme de fonction exponentielle. Soit un ensemble constitué de  $N$  éléments dont le nombre décroît avec le temps selon un taux de décroissance noté  $\lambda$  (lambda). L'équation de la décroissance exponentielle s'écrit ainsi :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \times N$$

Où  $\lambda$  est un nombre positif, avec une quantité initiale.

$$N(t = 0) = N_0$$

Si on dérive avec coefficients constants, la solution de l'équation est donc :

$$N(t) = N_0 \times e^{-\lambda t}$$

Cette fonction décroissante atteint une valeur égale à la moitié de la quantité initiale  $N_0$  au bout d'une certaine durée. On nomme cette valeur la demi-vie, notée  $t_{1/2}$ . Lorsqu'on simplifie l'équation, on obtient :

$$e^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{N_0}{2N_0} = \frac{1}{2}$$

En isolant la demi-vie  $t_{1/2}$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

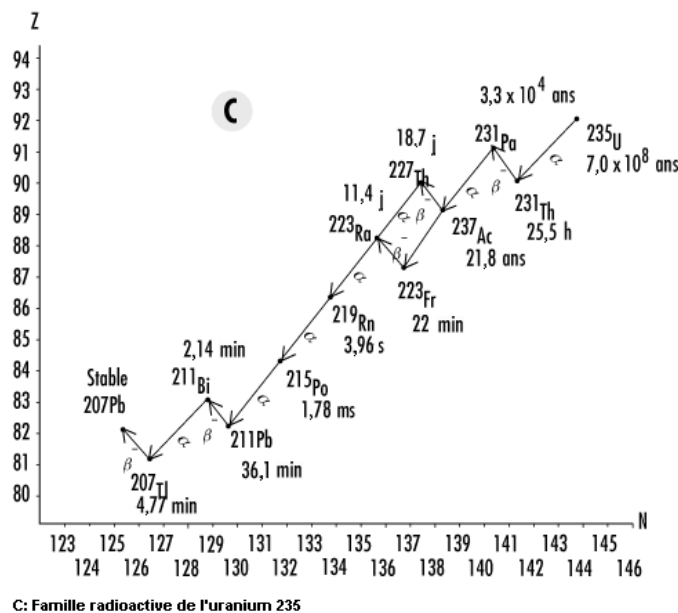
Autre formulation simple de l'évolution du nombre de noyaux ( $N$ ) en fonction du temps:

$$N = N_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\left(\frac{t}{t_{1/2}}\right)}$$

## L'émission de radioactivité et la désintégration radioactive

La radioactivité de l'Uranium 235 est toujours du type alpha de l'ordre de 4,5 MeV. De plus, l'Uranium 235, qui est utilisé lors de la réaction nucléaire d'Hiroshima, se désintègre en plusieurs isotopes constituant ainsi une série de désintégration que l'on nomme chaîne de désintégration. Ainsi, l'Uranium 235 se désintègre en Thorium 231 après une longue période de temps et selon sa constante de désintégration, qui est propre à chaque isotope instable. Cependant, étant donné la très longue période de l'Uranium 235 à se désintégrer complètement (environ 700 millions d'années), il va avoir apparition des quelques noyaux fils de la chaîne de désintégration avant même que l'Uranium 235 soit désintégré complètement.

L'Uranium 235 (appelé noyau père, car il est le premier à amorcer sa chaîne de désintégration) se désintègre en son noyau fils (Thorium 231) par un rayonnement dit alpha ou  $\alpha$ . Ce type de désintégration produit l'émission d'un noyau d'Hélium 4, qui est composé de deux neutrons et deux protons. Il existe d'autres sortes de rayonnements dans la chaîne de désintégration de l'Uranium 235 : Le rayonnement bêta moins ( $\beta^-$ ) qui consiste à émettre un électron (chargé négativement) et le rayonnement bêta plus ( $\beta^+$ ) qui consiste à émettre un positron (qu'on appelle aussi antiélectron) chargé positivement. Ce dernier permet aux noyaux d'être stables plus facilement. Le but de cette désintégration en cascade est de parvenir à un élément chimique possédant un noyau stable (non radioactif), dans ce cas-ci, le Plomb 207.



**Figure 8 :** Chaîne de désintégration de l'Uranium 235 qui montre la perte de neutrons (N) des noyaux et la diminution du numéro atomique (Z) pour finir au dernier élément stable, le Plomb 207



La désintégration de l'Uranium 235 appartient à la famille de désintégration que l'on nomme «  $4n+3$  ». Cependant, dans le cas d'une réaction nucléaire, il va aussi avoir une chaîne de désintégration des produits de fission. Cela se produit lorsque l'élément fissile initial, l'Uranium 235, a une plus grande proportion de neutrons que les atomes plus légers (l'uranium est considéré comme un isotope lourd). Ainsi, ces atomes fils auront généralement un plus grand excès de neutrons par rapport à un élément stable de même poids atomique. Ces atomes fils subissent alors une série de désintégrations  $\beta$ , c'est-à-dire, que chacun des atomes convertissent un neutron en un proton et émettent un électron. Ces désintégrations tendent à avoir une très grande énergie et ont des demi-vies très courtes. Dans le cas de la fission l'Uranium 235 (qui a 92 protons et 143 neutrons), celui-ci se sépare en deux radio-isotopes. Le premier contiendra 39 protons et 60 neutrons (l'yttrium-99) et l'autre contiendra 53 protons et 82 neutrons (l'iode-135). Les chaînes de désintégration seront alors composées d'éléments instables de demi-vies très courtes selon le tableau ci-dessous :

**Tableau 2** : Chaîne de décroissance de l' $U^{235}$

**Fission instantanée de l'Uranium 235**

| Nucléide       | Demie-vie  | Nucléide   | Demie-vie |
|----------------|------------|------------|-----------|
| Yttrium-99     | 1,470 s    | Iode-135   | 6,657 h   |
| Zirconium-99   | 2,1 s      | Xenon-135  | 9,14 h    |
| Niobium-99m    | 2,6 min    | Césium-135 | 2,3 E+6   |
| Niobium-99     | 15,0 s     | Baryum-135 | stable    |
| Molybdème-99m2 | 0,76 us    |            |           |
| Molybdème-99m1 | 15,5 us    |            |           |
| Molybdème-99   | 2,7489 j   |            |           |
| Technétium-99m | 6,00 h     |            |           |
| Technétium-99m | 2,11 E+5 a |            |           |
| Ruthénium-99   | stable     |            |           |

## Activité de l'Uranium 235 ( $U^{235}$ )

---

L'activité d'un isotope radioactif est définie comme le nombre de désintégrations radioactives par secondes dans une quantité donnée (connue) de matière. L'unité de l'activité est le Becquerel (Bq), nommé ainsi en l'honneur d'Henri Becquerel, un contributeur important à la radioactivité.

### Calcul de la radioactivité d'un isotope

Pour une masse ( $m$ ) donnée en gramme d'un isotope ayant une masse atomique ( $m_a$ ) en g/mol et une demi-vie ( $t_{1/2}$ ) en secondes, la quantité de radioactivité se calcule mathématiquement à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Activité (Bq)} = \frac{m}{m_a} \times N_A \times \frac{\ln(2)}{t_{1/2}}$$

Où  $N_A$  est la constante d'Avogadro ( $6,0221 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ )

Dans le cas de l'Uranium 235, son activité se calcule ainsi :

$$m = 753,9537 \text{ g}$$

$$m_a = 235,0439299 \text{ g/mol}$$

$$t_{1/2} = 7,038 \times 10^8 \text{ ans} = 3,699 \times 10^{14} \text{ secondes}$$

$$\text{Activité (Bq)} = 753,9537/235,0439299 \times 6,0221 \times 10^{23} \times \ln(2)/t_{1/2}$$

$$\text{Activité} = \mathbf{3\ 533\ 381\ 622\ Bq\ ou\ 3,5334 \times 10^9\ Bq}$$

## **Fission spontanée**

---

La fission spontanée est une autre forme de désintégration qui est typique des éléments radioactifs lourds. En pratique, on ne parle pas de fission spontanée pour les noyaux plus lourds que le Thorium. De façon mathématique, on peut déterminer quels isotopes sont susceptibles de fission spontanée de la manière suivante :

$$Z^2 / A \geq 45$$

Où  $Z$  est le numéro atomique de l'isotope en question et  $A$  sa masse atomique. Dans le cas de l'Uranium 235,  $Z = 92$  et  $A = 235$  :

$$(235)^2 / 92 = 600,2 \geq 45$$

Cela veut dire que certains noyaux d'Uranium 235 seront susceptibles de se désintégrer spontanément en Thorium. Il faut aussi ajouter que la quantité de noyaux subissant une fission spontanée sera très petite.

La fission spontanée est très semblable à la fission nucléaire. La différence est que les noyaux atomiques n'entrent pas en collision avec des neutrons ou autres particules.

## Blast Waves

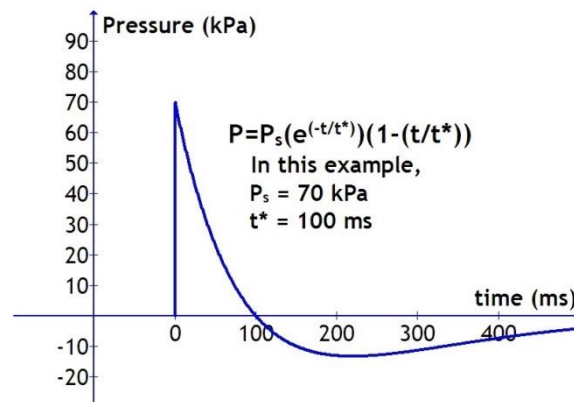
### Blast Wave Estimation & G. I. Taylor

G. I. Taylor, also known as Geoffrey Ingram Taylor, was born in St. John's Wood, London, UK. He was a British physicist and a mathematician with expertise in fluid dynamics and wave theory. He studied at Cambridge's trinity college in England. He worked on a lot of subjects like blast waves (air and underwater explosions).

First of all, research was done on air pressure and an equation was found on how to calculate the pressure according to the time of blast wave explosions: The Friedlander equation by John von Neumann and G. I. Taylor, which was modeled to measure the air pressure of an explosion, more specifically a bomb.

**Figure 9:** Example of a Friedlander waveform

$$P(t) = P_s e^{-\frac{t}{t^*}} \left(1 - \frac{t}{t^*}\right) \quad \begin{array}{l} P_s = \text{Peak pressure (70KPa)} \\ t^* = \text{Time (100ms)} \end{array}$$

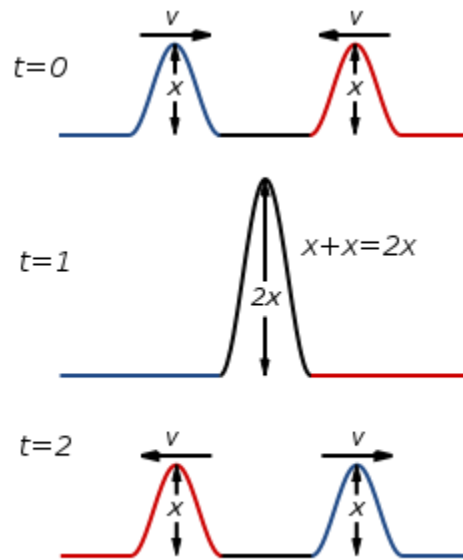


A Friedlander waveform is the simplest form of a blast wave.

This so-called “similarity solution” by G.I.Taylor and John von Neumann was found during world war II.

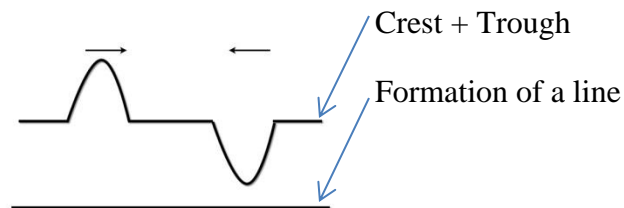
Second of all, constructive and destructive interference from blast waves are due to increasing or decreasing amplitudes of the waves. When two crests or two troughs meet together, it increases the amplitude of the waves. It is called a constructive interference. An example is shown on the next page.

**Figure 10:** Example of constructive interference



Now, a destructive interference is the result of a crest that meets a trough causing the amplitude to decrease.

**Figure 11:** Example of destructive interference:



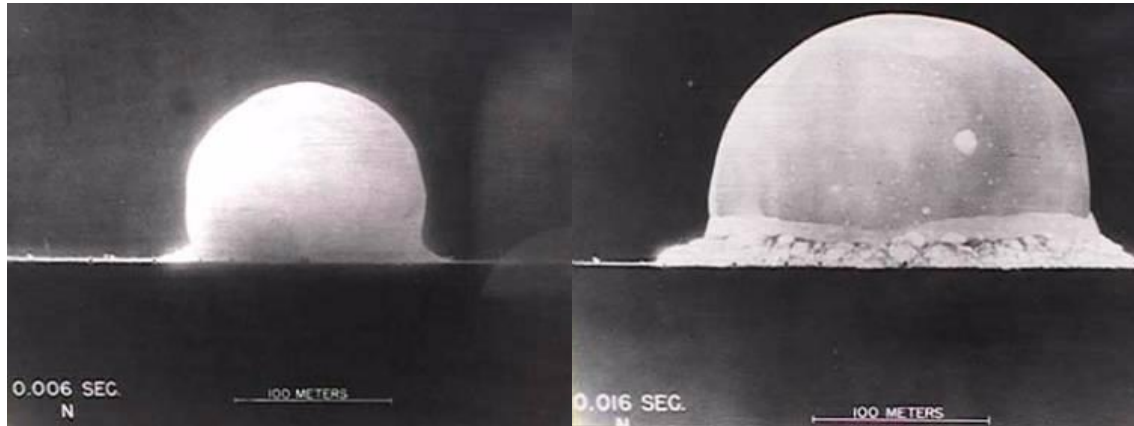
It can cause huge damage, a combination of air compression and wind that follows. The waves travel faster than the speed of light. That is why the pressure is even higher than that of a regular explosion. Blast waves can have an impact on nature and people. Individuals can get hit by blast wind, blast debris or even blast fires. Since the explosion travels faster than light, the fragments sent out from the bomb can cause injuries or even death. “Blast wind” is an area of low pressure where debris or other things rush back towards the origin of the explosion like a magnet. High temperatures from the original blast can cause smaller explosions to detonate like fuel-containing objects such as house fuel containers.

### Damage caused by blast waves

In front of waves and subsequent winds that follow, there’s a combination of air compression therefore increasing the pressure making the damage even deadlier. A blast wave travels faster than the speed of sound which makes the passage of the wave last a

few more seconds. Blast waves can cause damage to things like buildings or solid objects. Its wind shock, debris and fires can injure people. The bomb will send out fragments, some not originating from the bomb itself, causing more injuries. Since "blast wind" is an area of low pressure, fragments can rush back towards the origin of the explosion.

### Estimation de l'énergie par la méthode de G.I. Taylor



Le rayon (R) de l'onde choc en mètres, selon Taylor, peut-être exprimée ainsi :

$$R = E^{\frac{1}{5}} * \rho * t^{\frac{2}{5}} * \text{constante}$$

Où E = Énergie libérée,  $\rho$  = densité de l'air ( $1,2 \text{ kg/m}^3$ ) et t = temps écoulé depuis l'explosion en secondes

G.I. Taylor assume que la constante est d'approximativement 1 alors on obtient la formule simplifiée :

$$E = \frac{R^5 \rho}{t^2}$$

#### Exemple de calcul

Soit t = 0.0062 secondes et le rayon de l'onde de choc est de 80 mètres la densité de l'air  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$

Alors

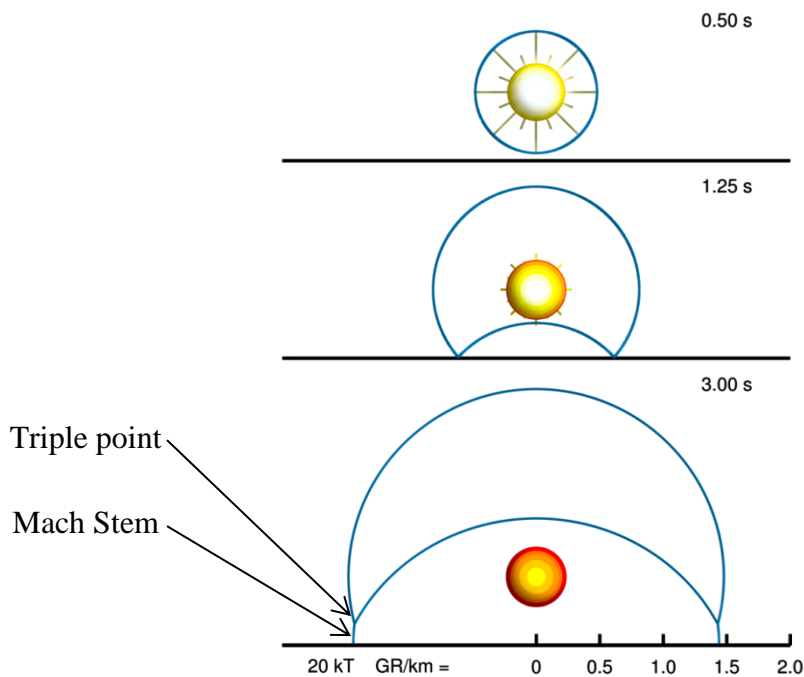
$$E = (80^5) * \frac{1,2}{(0,0062)^2} \text{ kg} * \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$E = 1 * 10^{14} \text{ kg} * \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

$$E = 1 * 10^{21} \text{ ergs ou } 25 \text{ kilo - tons de TNT}$$

## Mach Stem Formation

The Mach stem formation (MSF) occurs when the lower waves of the blast hit the ground and reflect back up to go join the waves already going up into the air. The more the explosion occurs away from the ground, the more the explosion will be severe, because the waves thrown back to into the air by hitting the ground will be deadlier. When the lower waves reach the ones originally going up, it will form two peaks on the ground from each side therefore causing a high pressure zone which will be more dangerous with time. When the lower waves reach the higher ones, it will extend the peaks so called 'triple point' and create extraordinary damage, worse than that of the original shock front.



**Figure 12:** Formation of a Mach Stem

## Effects of blast loads on buildings

Structural behaviour depends on materials used in buildings. When a shock front hits the face of a building, it is reflected causing damage. The structure will fall and crumble to ground if hit hard enough. If the buildings are to survive, the kinetic energy from the impact of exterior components needs to be absorbed or dissipated. The buildings need to convert this kinetic energy to strain it in resisting elements, for example: windows, building facades, support columns, etc.

## **Thermal radiation**

---

La réaction thermique dégage une grande quantité d'énergie. Elle se dissipe sous forme d'énergie cinétique d'agitation thermique (85 %) et sous forme de rayonnement (15 %). 20 millisecondes après l'explosion, il y a présence du flash lumineux (thermique et rayonnement) avec l'extension de la boule de feu formée par le réchauffement de l'air par particules de rayonnements x générées durant l'explosion.

Nuclear reactions emit huge amounts of thermal radiation like visible, infrared and ultraviolet light. This is known as the flash. Thermal radiation can lead to eye injuries such as flash blindness. The flash of light damages the retina. When the electromagnetic spectrum part of light is focused onto the lens of the retina, bleaching or temporary blindness can occur and lasts for a minimum of 40 minutes. The height of the burst determines the severity of retinal scarring. Scars will be debilitating if the flash hits the central visual area of retina. Direct thermal energy on the retina causes the retina to burn. It can be scarred permanently, but this only occurs when the "fireball" is in the individual's field of vision. This type of injury is uncommon. Blast wave effects can incinerate compounds through secondary fires before the thermic effects. Ignition of such compounds actually depends on the thermal pulse's duration and its content's thickness and moisture. If the energy flux exceeds  $125 \text{ J/cm}^2$ , everything that is within reach will be burned.

Thermal radiation can be reflected, transmitted and absorbed depending on the surfaces it touches. Radiation will reflect on light colors (like white paint) creating an anti-flash. This large amount of thermal energy reflected can burn someone. Also, it will transmit in thin materials which can heat up a body causing burns. Depending on the nature and color of the material, the radiation absorbed may rise the temperature of the Earth's surface such as scorching or burning wood. Opaque surfaces will cause less damage than the lighter ones, especially in the presence of clouds or bad weather. The clouds will absorb and protect buildings and other things from incineration. The radiation will be scattered back into the air, meaning the flash will not be as deadly.



## **Severity of Burns**

The heat from the thermal radiation can cause extreme cases of burns. Burns vary in severity:

### **First degree burns**

There is damage above the basal layer of epidermis. The skin is dry, red and painful like sunburns.

### **Second degree burns**

There is damage within the dermis. Skin adnexa remain (hair follicles, oil glands). It can be healed by re-epithelialization from the skin adnexa. The skin is moist, red, blanching, has blisters and is extremely painful. The deeper the burn, the slower the skin heals. Superficial burns heal by re-epithelialization and do not leave any scars if it is healed within 2 weeks.

### **Third degree burns**

The entire thickness of skin fat is destroyed. The skin is dry and considerably less painful because the dermal plexus of the nerves are destroyed. The skin can be healed by contracting from wound edges and scar deposition. It is fragile to repair because it is prone to recurrent episodes of breakdown. The skin is subject to severe scarring, wound infection. Specialized care is needed to attain definitive wound closure via skin grafting.

### **Fourth degree burns**

The entire skin layer is gone. The burn reaches muscles, tendons and even bones. Specialized care is needed. Skin grafting alone is generally insufficient.

### **Second to fourth degree burns**

Damage is done to the deeper dermis. The skin is less moist, less blanching and less painful. Healing can be done by scar deposition, contraction and limited re-epithelialization. It is clinically estimated that it can take up to three weeks or longer to heal via secondary intention.

## Calcul approximatif des rayons destructifs des effets nucléaires

Il est possible d'estimer les effets thermiques, de radiation et de l'onde de choc. Selon le document Nuclear Weapons Frequently Asked Questions (NWFAQ), les équations suivantes fonctionnent pour les bombes de 1 kT à 20 MT avec un pourcentage d'erreur de  $\pm 10\%$ .

$$R_{thermal} = Y^{0.41} \times constant_{th(1)}$$

$$R_{blast} = Y^{0.33} \times constant_{bl(1)}$$

$$R_{rad} = Y^{0.19} \times constant_{rad(1)}$$

Si les constantes ont toutes une valeur de 1, les équations donnent respectivement les rayons destructifs en kilomètres (km), selon le rendement de la bombe (Y) en kilotonnes de TNT (kT), pour des brûlures de 3e degré, une onde de choc de 4,6 PSI et une dose de radiation de 500 REMS.

Pour des cas dont les constantes ne seraient pas égales à 1, explorons plus profondément.

### Rayon destructif pour les effets thermiques

Le document NWFAQ a fourni les équations suivantes pour estimer les rayons destructifs selon de la sévérité des brûlures.

$$R_{th\ 1er\ degré} = Y^{0.38} \times 1,20$$

$$R_{th\ 2ième\ degré} = Y^{0.40} \times 0,87$$

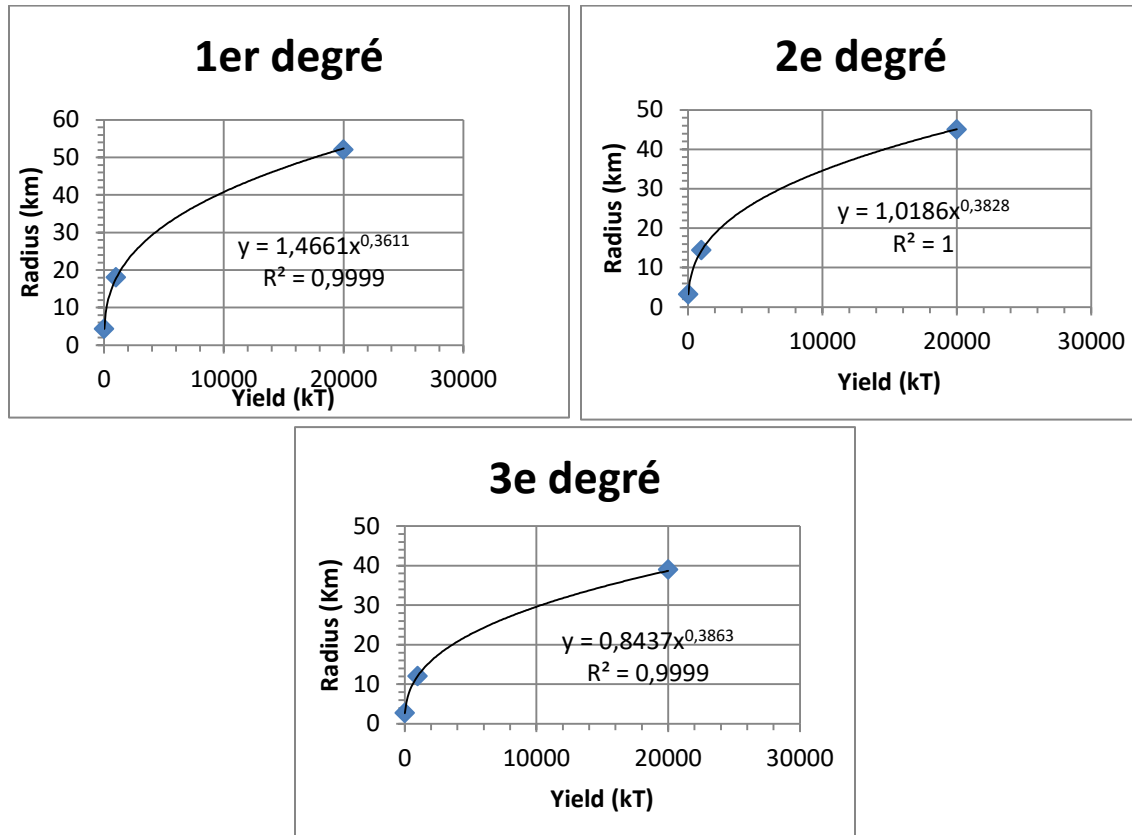
$$R_{th\ 3ième\ degré} = Y^{0.41} \times 0,67$$

**Tableau 3** : L'énergie et les rayons selon le degré de sévérité

| SEVERITY   | 20 Kilotons                      | 1 Megaton                       | 20 Megatons                     |
|------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1st Degree | 2.5 cal/cm <sup>2</sup> (4.3 km) | 3.2 cal/cm <sup>2</sup> (18 km) | 5 cal/cm <sup>2</sup> (52 km)   |
| 2nd Degree | 5 cal/cm <sup>2</sup> (3.2 km)   | 6 cal/cm <sup>2</sup> (14.4 km) | 8.5 cal/cm <sup>2</sup> (45 km) |
| 3rd Degree | 8 cal/cm <sup>2</sup> (2.7 km)   | 10 cal/cm <sup>2</sup> (12 km)  | 12 cal/cm <sup>2</sup> (39 km)  |

Le tableau 3 aussi été fourni par le document NWFAQ. On l'a modélisé en trois graphiques selon les rayons (km) donnés.

**Figures 13, 14, 15 :** Les rayons (km) en fonction du rendement de la bombe (kT) selon le degré de sévérité.



Ce qui nous donne les trois équations suivantes :

$$R_{th \text{ 1er degré}} = Y^{0,3611} \times 1,4661$$

$$R_{th \text{ 2e degré}} = Y^{0,3828} \times 1,0186$$

$$R_{th \text{ 3e degré}} = Y^{0,3863} \times 0,8437$$

Ces équations nous permettent de calculer les rayons destructifs thermiques. Elles sont similaires aux équations fournies avec des données différentes. Par contre, les équations données auparavant sont suffisantes.

### Rayon destructif pour l'effet de souffle : « Overpressure »

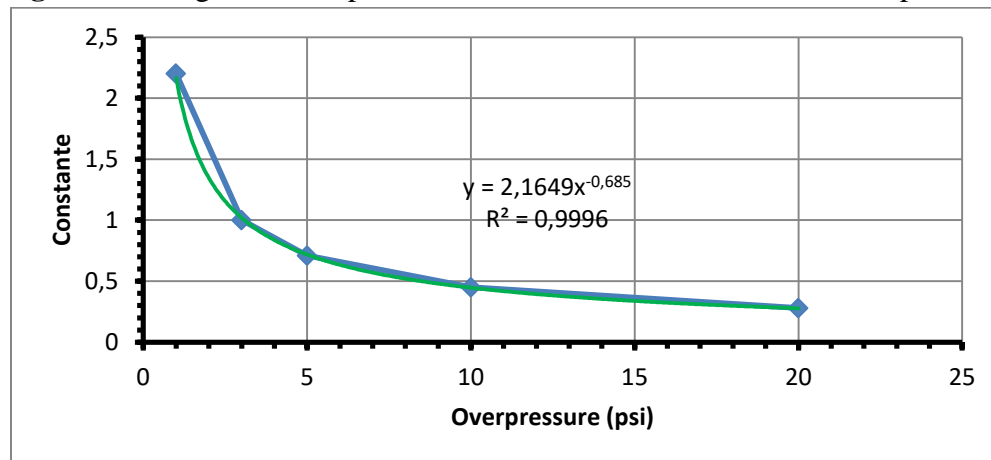
Depuis le document NWFAQ, nous avons pu déterminer une formule pour estimer le rayon destructif de l'effet de souffle selon « l'overpressure » (la pression qui est en surplus de la pression atmosphérique). Les constantes suivantes étaient données :

**Tableau 4 :** Les constantes et les effets correspondant à la pression « overpressure »

| « Overpressure » (PSI) | Constante | Vitesse du vent maximale (mph) | Effets  |
|------------------------|-----------|--------------------------------|---|
| 1                      | 2,20      | 38                             | La vitre fracasse, blessure légères possible à partir des fragments de vitres.  |
| 3                      | 1,00      | 102                            | Effondrement des structures résidentielles. Les blessures graves sont plus fréquentes et des décès peuvent se produire. |
| 5                      | 0,71      | 163                            | La plupart des bâtiments s'effondrent. Les blessures sont universelles et les décès sont très répandus.                 |
| 10                     | 0,45      | 294                            | Les bâtiments en béton renforcé sont gravement endommagés ou démolis. La plupart des gens sont tués.                    |
| 20                     | 0,28      | 502                            | Les bâtiments en béton fortement renforcés sont gravement endommagés ou démolis. La fatalité tant vers 100%.            |

À partir de ces constantes, nous avons produit un modèle affine pour après extrapoler et interpoler des résultats. Dans le graphique suivant, on a une régression de puissance. On a alors une fonction pour calculer les constantes qu'on n'a pas.

**Figure 16 :** Régression de puissance de la constante en fonction de la pression.



Sachant la formule :

$$R_{blast} = Y^{0,33} \times constante_{bl}$$

Et que la constante peut être calculée de cette façon :

$$constante_{bl} = 2,1649 \times P^{-0,685}$$

On obtient l'équation finale qui nous permet de calculer le rayon d'onde de choc en fonction du rendement de la bombe (Y) et de la pression ou « overpressure » (P).

$$R_{blast}(Y, P) = Y^{0,33} \times (2,1649 \times P^{-0,685})$$

### Rayon destructif pour les effets de radioactivité

D'après le document NWFAQ, nous pouvons utiliser l'équation suivante pour estimer le rayon de radioactivité à dose fatale.

$$R_{rad} = Y^{0,19} \times constante_{rad}$$

On décrit que l'équation peut être modifiée selon une échelle avec les conditions suivantes. Si le rendement de la bombe (Y) est en kilotonne et que la distance « range » ( $K_{rad}$ ) est en mètre, la dose standard (Std. Dose) est de 1000 rads. Alors, la valeur correspondante (Std. Value) serait la suivante.

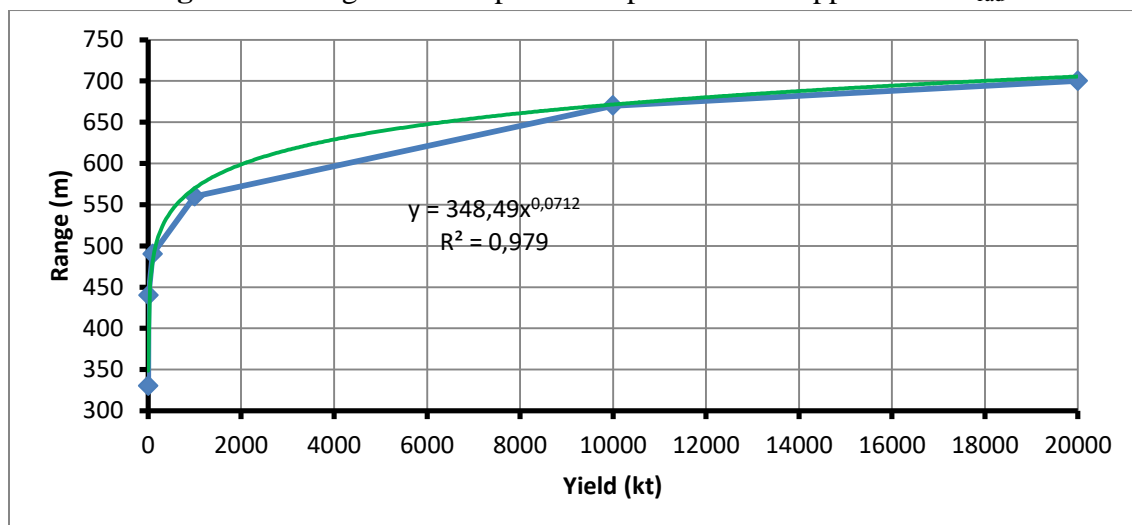
$$constante_{1000\ rads} = 700\ \text{mètres}$$

**Tableau 5** : L'équation peut être mise à l'échelle selon le tableau suivant, dont la dose peut varier selon un facteur de 10.

| Rendement de la bombe ou « Yield » (Y) | Distance « range » ( $K_{rad}$ ) |
|--|----------------------------------|
| 1 kT                                   | 330 m                            |
| 10 kT                                  | 440 m                            |
| 100 kT                                 | 490 m                            |
| 1 MT                                   | 560 m                            |
| 10 MT                                  | 670 m                            |
| 20 MT                                  | 700 m                            |

Avec ces constantes, on a procédé de la même façon que pour le « overpressure ».

**Figure 17** : Régression de puissance permettant d'approximer  $K_{rad}$



Alors, on obtient l'équation suivante :

$$K_{rad} = 348,49 \times Y^{0,0712}$$

Et finalement, l'exemple suivant est donné :

Pour une bombe de 10 MT (10000 kT), on cherche la dose de radioactivité (rads) à 5000 mètres de distance, donc :

$$\text{dose} = (1000 \text{ rads}) / 10^{[(5000 - [10000^{0.19}] * 700) / 670]} = 35 \text{ rads}$$

Alors pour comprendre l'exemple, nous avons substitué les valeurs par le nom des variables correspondantes.

$$Dose = \frac{Std. Dose}{10^{\left[ \frac{(Rayon - (Y^{0,19}) \times Std. Value)}{K_{rad}} \right]}}$$

Vu qu'on s'intéresse au rayon, on l'a isolé et on a simplifié l'équation.

$$R_{radiation} = Y^{0,19} \times Std. Value + K_{rad} \times \log_{10} \left( \frac{Std. Dose}{Dose} \right)$$

Donc, pour procéder plus loin, nous avons présumé que *Std. Dose* et *Std. Value* restent constants, respectivement 1000 rads et 700 m. En y substituant l'équation de  $K_{rad}$  et en y rajoutant un facteur de conversion pour avoir le rayon en kilomètres (1/1000), on obtient l'équation finale :

$$R_{rad}(Y, D) = \frac{1}{1000} \times \left( Y^{0,19} \times 700 + (348,49 \times Y^{0,0712}) \times \log_{10} \left( \frac{1000}{D} \right) \right)$$

Cette équation permet de calculer le rayon radioactif en fonction de la dose (D) et le rendement de la bombe (Y).

### Validation des calculs approximatifs des rayons destructifs

Un programme SciLab « radiusfx.sce » a été écrit pour faciliter les calculs. Nos équations ont été mises à l'épreuve avec un simulateur de bombe nucléaire. Dans le tableau 5, on observe que les résultats ne sont pas si éloignés.

**Tableau 6 :** Comparaison des résultats

| Rayon (km)                          | radiusfx.sce | NUKEMAP (Classic) | % différence (radiusfx-N <sub>Classic</sub> ) |
|-------------------------------------|--------------|-------------------|---|
| r_thermal<br>3 <sup>ème</sup> degré | 2,0336313    | 2,08              | 2,23  |
| r_blast<br>4,6 psi                  | 1,8601966    | 1,81              | 2,77  |
| r_radiation<br>500 REM              | 1,6728513    | 1,41              | 18,64   |

Le pourcentage d'erreur pour le rayon de radioactivité est élevé parce que le simulateur « NUKEMAP » n'avait pas l'option pour calculer ce rayon pour une dose précise en rads. Il faut noter que 500 REMS a été converti en rads pour tester notre équation. Par contre, 500 REMS ne sont pas toujours égaux à un nombre fixe en rads. Le rad se convertit en REMS selon des facteurs multiplicateurs différents pour chaque type de radiation : alpha, bêta, gamma et les neutrons libres. Le REM (qui n'a pas d'unité par définition) est seulement utilisé de façon qualitative pour qualifier l'effet biologique que la radiation peut avoir sur un être humain. Ces effets (selon le nombre de REMS) sont décrits dans le document NWFAQ.

## Références

---

- SUBLETTE, Carey, *Effects of Nuclear Explosions*, [En ligne], (page consultée le 9 avril 2015), <http://nuclearweaponarchive.org/Nwfaq/Nfaq5.html>
- WELLERSTEIN, Alex, « NUKEMAP CLASSIC », [En ligne], (page consultée le 5 mars 2015), <http://nuclearsecrecy.com/nukemap/classic>
- GRIFFITH, Chris, *AtomicArchive: Nuclear Effects*, [En ligne], (page consultée le 17 février 2015), <http://www.atomicarchive.com/Effects/effects1.shtml>
- GRIFFITH, Chris, *AtomicArchive: Nuclear Fusion*, [En ligne], (page consultée le 18 février 2015), <http://www.atomicarchive.com/Fusion/Fusion1.shtml>
- NAVE, C.R., *HyperPhysics: Radiation*, [En ligne], (page consultée le 8 avril 2015) <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/radrisk.html>
- ZIPF, R. Karl, Jr., Ph.D., P.E., CASHDOLLAR, Kenneth L., *Effects of blast pressure on structures and the human body*, [En Ligne], (page consultée le 18 mars 2015), <http://www.cdc.gov/niosh/docket/archive/pdfs/NIOSH-125/125-ExplosionsandRefugeChambers.pdf>
- Prof. Wolfgang Korsch, *Estimate of the energy released in the first Atomic Bomb explosion*, [En Ligne], (page consultée le 14 mars 2015), <http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/people/codoban/PHY138/Mechanics/dimensional.pdf>
- NAVE, C.R., *HyperPhysics: Fission*, [En ligne], (page consultée le 4 mars 2015), <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/fisfrag.html>
- WIKIPEDIA, *Masse Critique*, [En Ligne], (page consultée le 17 février 2015), [https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse\\_critique\\_%28r%C3%A9action\\_nucl%C3%A9aire%29](https://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_critique_%28r%C3%A9action_nucl%C3%A9aire%29)
- LUXORION, *Bombes Atomiques*, [En Ligne], (page consultée le 18 février 2015), <http://astrosurf.com/luxorion/quantique-bombes-atomiques2.htm>
- GRIFFITH, Chris, *AtomicArchive: Nuclear Fission*, [En Ligne], (page consultée le 17 février 2015), <http://www.atomicarchive.com/Fission/Fission1.shtml>
- WIKIPEDIA, *Blast Wave*, [En Ligne], (page consultée le 26 février 2015), [http://wikipedia.org/wiki/blast\\_wave](http://wikipedia.org/wiki/blast_wave)
- NAVE, C.R., *HyperPhysics: Fusion*, [En Ligne], (page consultée le 4 mars 2015), <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nucene/fusion.html>
- WIKIPEDIA, *Effects of Nuclear Explosions*, [En Ligne], (page consultée le 9 avril 2015), [http://wikipedia.org/wiki/effects\\_of\\_nuclear\\_explosions](http://wikipedia.org/wiki/effects_of_nuclear_explosions)
- WIKIPEDIA, *Effects of Nuclear Explosions on Human Health*, [En Ligne], (page consultée le 9 avril 2015), [http://wikipedia.org/wiki/effects\\_of\\_nuclear\\_explosions\\_on\\_human\\_health](http://wikipedia.org/wiki/effects_of_nuclear_explosions_on_human_health)
- U.S. Department of Health and Human Services, *Burn Triage and Treatment: Thermal Injuries*, [En Ligne], (page consultée le 29 avril 2015), <http://remm.nlm.gov/burns.htm>



- HIROSHIMA, *Hiroshima, la fission*, [En ligne], (page consultée le 25 mars 2015), [http://hiroshimabomb.free.fr/bombe\\_a.html](http://hiroshimabomb.free.fr/bombe_a.html)
- HIROSHIMA : EFFETS, *Les effets immédiats de l'explosion*, [En ligne], (page consultée le 25 mars 2015), <http://hiroshimabomb.free.fr/Effets.html>
- WIKIPEDIA, *L'impulsion électromagnétique*, [En ligne], (page consultée le 11 mars 2015), [http://fr.m.wikipedia.org/wiki/Impulsion\\_électromagnétique](http://fr.m.wikipedia.org/wiki/Impulsion_électromagnétique)
- TS-PHYSIQUE-CHAP 4, *Décroissance radioactive*, [En ligne], (page consultée le 22 avril 2015), <http://www.physagreg.fr/ts-physique-chap4-decroissance-radioactive.php>
- WIKIPEDIA, *Explosion atomique*, [En ligne], (page consultée le 4 mars 2015), [http://fr.m.wikipedia.org/wiki/Explosion\\_atomique](http://fr.m.wikipedia.org/wiki/Explosion_atomique)
- ATOMICSARCHIVES, *L'atome au service de la guerre*, [En ligne], (page consultée le 8 avril 2015), <http://atomicsarchives.chez.com/hiroshima.html>
- WIKIPEDIA, *Nuclear Fission*, [En ligne], (page consultée le 4 mars 2015), [http://en.m.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_fission](http://en.m.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fission)
- ENERGY FROM NUCLEAR SCIENCE, *Nuclear Fission Energy*, [En ligne], (page consultée le 4 mars 2015), <http://www2.lbl.gov/abc/wallchart/chapters/14/1.html>
- HARNESSING OF NUCLEAR FISSION, *The Story Of The Atomic Bomb*, [En ligne], (page consultée le 18 mars 2015), <http://www.3rd1000.com/nuclear/cruc18.htm>
- LUXORION, *Les effets des explosions nucléaires*, [En ligne], (page consultée le 4 février 2015), <http://www.astrosurf.com/luxorion/quantique-bombes-atomiques2.htm>
- L'INTERNAUTE, *Histoire de la bombe atomique*, [En ligne], (page consultée le 18 février 2015), [http://www.linternaute.com/histoire/motcle/124/a/1/1/bombe\\_atomique.shtml](http://www.linternaute.com/histoire/motcle/124/a/1/1/bombe_atomique.shtml)
- Cobis Care of Burns in Scotland, *Nutrition Guideline*, [En ligne], (page consultée le 29 avril 2015), <http://cobis.scot.nhs.uk/pdf/paediatric/nutrition%20guideline.pdf>
- Groupe RME, *Effets thermiques*, [En ligne], (page consultée le 24 mars 2015), [http://rme.ac-rouen.fr/reaction\\_nucleaire.htm](http://rme.ac-rouen.fr/reaction_nucleaire.htm)