

Chapitre V : Désinfection

Plan du chapitre

- V.1. Principes généraux de la désinfection**
- V.2- Facteurs fondamentaux de la désinfection**
 - V.2.1 Loi de Chick**
 - V.2.2. Influence du temps de contact**
 - V.2.3. Influence de la concentration de désinfectant**
 - V.2.4. Influence de la température**
- V.3. Types de désinfection**
 - V.3.1 Désinfection par le Chlore**
 - V.3.1 Aspects chimiques de la chloration**
 - V.3.2 Modes de chloration**
 - V.3.2.1Chloration simple**
 - V.3.2.2Chloration au Break point**
 - V.3.2 Désinfection par le dioxyde de chlore**
 - V.3.3 Désinfection par l’ozone**
 - V.3.4 Désinfection par les ultras violets**

V.1. Principes généraux de la désinfection

La désinfection est un traitement qui permet d'éliminer les microorganismes (Virus, bactéries et les parasites) susceptibles de produire des maladies à transmission hydrique.

- On peut procéder à la désinfection en ajoutant à l'eau une certaine quantité d'un **produit chimique** doté de propriétés germicides. Les produits chimiques les plus utilisés sont : le chlore, le dioxyde de chlore, l'ozone, le brome, l'iode et le permanganate de potassium.
- On peut également désinfecter l'eau grâce à des **moyens physiques**: ébullition, ultrasons, ultraviolets ou rayons gamma.

Tous les procédés et les produits de désinfection n'étant pas équivalents, il faut choisir le procédé le plus approprié, compte tenu de certaines conditions particulières (caractéristiques et usages de l'eau, types de microorganismes à éliminer, qualité du réseau de distribution, etc.) et sachant qu'un désinfectant ou un procédé de désinfection doit:

- a) Ne pas être toxique pour les humains ou les animaux;
- b) être toxique, à de faibles concentrations, pour les microorganismes;
- c) être soluble dans l'eau;
- d) former avec l'eau une solution homogène;
- e) Être efficaces aux températures normales de l'eau de consommation (0 à 25°C).
- f) être stable, afin de favoriser le maintien d'une certaine concentration résiduelle pendant de longues périodes de temps;
- g) ne pas réagir avec la matière organique autre que celle des microorganismes;
- h) ne pas détériorer les métaux ni endommager les vêtements lors de la lessive;
- i) éliminer les odeurs;
- j) exister en grande quantité et être vendu à un prix abordable;
- k) être facile à manipuler et ne faire courir aucun danger aux opérateurs;
- l) permettre une mesure aisée de sa concentration.

V.2- Facteurs fondamentaux de la désinfection

Le taux de destruction des microorganismes par un désinfectant est fonction de plusieurs variables : puissance du désinfectant, concentration de désinfectant, temps de contact, nombre de microorganismes à éliminer, type de microorganismes, température de l'eau, pH de l'eau et concentration de matières organiques dans l'eau. Il n'existe actuellement aucune loi mathématique connue qui permette de calculer le taux de destruction des microorganismes en fonction de ces variables. Cependant, sur la base de mesures effectuées en laboratoire, on peut énoncer certaines règles particulières.

V.2.1 Loi de Chick-Watson

La loi de Chick est une loi empirique selon laquelle le taux de destruction des microorganismes est proportionnel au nombre de microorganismes dans l'eau, soit (V.1)

$$\frac{dN}{dt} = -KN$$

où N = nombre de microorganismes dans l'eau ; t = temps de contact ; K = constante de réaction (s^{-1})

En intégrant l'équation V.1. et en supposant que $N = N_0$ lorsque $t = 0$. On obtient :

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -Kt$$

et, en isolant t , on obtient

$$t = \frac{2,3}{K} \log\left(\frac{N_0}{N}\right)$$

V.2.2. Influence du temps de contact

Lors de la désinfection de certaines eaux, on a constaté que le taux de destruction des microorganismes variait avec le temps de contact. Pour tenir de ce phénomène, il est préconiser de modifier la loi de Chick comme suit:

$$\frac{dN}{dt} = -K't^{M'}N$$

Où K' et M' sont des constantes.

En intégrant l'équation précédente et en supposons que $N = N_0$ lorsque $t = 0$. on obtient:

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\frac{K't^{M'+1}}{M'+1}$$

Si $M' < 1$, le taux de destruction décroît avec le temps, et si $M' > 1$, le taux de destruction croît avec le temps. On peut évaluer les constantes K et M en traçant la variation du logarithme de $[-\ln(N/N_0)]$ en fonction du logarithme du temps de contact.

On a ainsi constaté que le taux de destruction des bactéries coliformes obtenu par une désinfection au chlore satisfaisait à l'équation IV.4 lorsque $M' = 1$.

V.2.3. Influence de la concentration de désinfectant

Dans le cadre de certaines limites, on a observé que l'efficacité de certains désinfectants variait avec leur concentration. On peut décrire l'influence de la concentration de désinfectant à l'aide de la relation empirique suivante: (IV.6)

$$C^n t_p = \text{constante}$$

où C = concentration de désinfectant t_p = temps de contact requis pour obtenir un taux P (%) d'élimination des microorganismes n = coefficient qui caractérise le type de désinfectant

On évalue expérimentalement les constantes de l'équation IV.6 en traçant la variation du logarithme de la concentration de désinfectant en fonction du logarithme du temps de contact requis,

t_p . La pente de la droite ainsi obtenue a une valeur de $-1/n$.

- Lorsque $n > 1$, on peut dire qu'une faible baisse de la concentration du désinfectant doit être compensée par une augmentation importante du temps de contact.
- C'est l'inverse lorsque $n < 1$.
- Si $n = 1$, le temps de contact et la concentration du désinfectant ont la même importance

V.2.4. Influence de la température

La température a aussi une influence sur l'efficacité de la désinfection. Une hausse de la température augmente souvent la vitesse de la réaction et de la désinfection. Une hausse de la température peut aussi décroître la désinfection, parce que le désinfectant se désintègre et devient volatil.

V.3. Types de désinfection

La désinfection de l'eau peut-être réalisée à partir de plusieurs désinfectants. Les plus utilisés sont : Le chlore, Cl_2 L'hypochlorite de sodium, $NaOCl$ Le dioxyde de chlore, ClO_2 et autres désinfectants incluant l'ozone et les Ultras Violetes.

V.3.1. Désinfection par le chlore

Le chlore est l'un des désinfectants les plus utilisés. Il est facilement applicable et très efficace contre la désactivation des microorganismes pathogènes. Le chlore peut être facilement appliqué, mesuré et contrôlé. Il est assez persistant et relativement bon marché.

Le chlore a été utilisé pour des applications telles que la désactivation des organismes pathogènes dans l'eau destinée à la consommation, dans les piscines, et dans les eaux usées, pour la désinfection dans le ménage des maisons ou pour le blanchissement des textiles.

Le chlore tue les organismes pathogènes tels que les bactéries et les virus en cassant les liaisons chimiques de leurs molécules. Les désinfectants qui sont utilisés à cette fin sont des composés de chlore qui peuvent échanger des atomes avec d'autres composés, tels que des enzymes dans les bactéries et autres cellules. Lorsque l'enzyme vient en contact avec le chlore, un ou plusieurs atomes d'hydrogène de la molécule sont remplacés par le chlore. Ceci va modifier la structure entière de la molécule et dans la plupart des cas provoquer sa dissociation ou sa désactivation. Lorsque les enzymes ne fonctionnent pas correctement, la cellule ou la bactérie mourra.

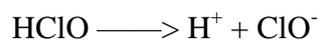
V.3.1.1 Aspects chimiques de la chloration

Le chlore gazeux et les hypochlorites réagissent rapidement dans l'eau pour former de l'acide hypochloreux, HOCl, qui est le produit actif dans la désinfection.

- Réaction du chlore gazeux : $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HOCl} + \text{Cl}^- + \text{H}^+$ (V.7)
- Réaction de l'hypochlorite de sodium : $\text{NaOCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HOCl} + \text{Na}^+ + \text{OH}^-$ (V.8)
- Réaction de l'hypochlorite de calcium : $\text{Ca(OCl)}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{HOCl} + \text{Ca}^{2+} + 2 \text{OH}^-$ (V.9)

Les équations des réactions chimiques ci-dessus montrent que la différence principale entre les hypochlorites et le chlore gazeux concerne les produits secondaires. En effet, l'addition de chlore gazeux libère des ions hydrogène, H^+ , ce qui abaisse le pH de l'eau, alors que l'addition d'hypochlorites libère des ions hydroxydes, OH^- , ce qui augmente le pH de l'eau.

HCIO (acide faible) est ensuite partiellement dissocié en ion hypochlorite ClO^- :



On appelle **chlore résiduel libre**, la somme $[\text{HCIO} + \text{ClO}^-]$.

L'acide hypochloreux et l'ion hypochlorite sont de puissants oxydants avec cependant, une prédominance d'efficacité pour **HCIO**.

Les deux formes cohabitent en solution suivant les valeurs du pH. On peut alors écrire que $\% \text{ClO}^- = 100 - \% \text{HCIO}$. Les calculs donnent les résultats suivants :

Tableau 1 : % HCLO et % ClO en fonction du pH

pH	% HCIO	% ClO ⁻
5	99,77	0,23
6	97,75	2,25
7	81,30	18,70
8	30,30	69,70

9	4,17	95,83
10	0,43	99,50

V.3.1.2 Modes de chloration

Le chlore peut être ajouté pour la désinfection de différentes manières.

V.3.1.2.1 Chloration simple : qui consiste en une injection unique de chlore destinée à assurer une teneur en chlore résiduel convenable. Ce mode est utilisé dans le cas des eaux relativement pures ou ayant déjà subi un traitement. C'est une opération d'affinage de l'eau.

Une pré ou une post chloration peuvent être effectuées en ajoutant du chlore à l'eau avant ou après d'autres étapes de traitement. Rechloration signifie l'addition de chlore à l'eau traitée dans un ou plusieurs points du système de distribution afin de préserver la désinfection. Pour tuer des bactéries peu de chlore est nécessaire; environ 0.2-0.4 mg/l. Les concentrations en chlore ajoutées à l'eau sont habituellement plus hautes, en raison de la demande en chlore de l'eau.

V.3.1.2.2 Chloration au point critique ou au Break-point

- Eau sans ammoniacque :

Lorsque l'on ajoute du chlore en quantités croissantes à l'eau et que l'on mesure après un temps de contact donné (en général 30 mn) le chlore résiduel total et le chlore libre, on constate que la teneur en chlore est nulle jusque un certain taux de chlore injecté, à partir duquel il est décelé du chlore résiduel total. Cette consommation de chlore représente la demande en chlore de l'eau.

Ensuite, la teneur en chlore résiduel total augmente proportionnellement avec le taux de chloration.

- Eau contenant de l'ammoniacque :

On retrouve le phénomène de la demande en chlore, puis en augmentant le taux de chloration,

la teneur en chlore résiduel total :

- commence par croître,
- puis décroît jusqu'à un minimum, c'est le Break Point (BP),
- et de nouveau, se remet à croître.

Le chlore libre est nul tant que le chlore résiduel total n'a pas atteint ce minimum, et ce n'est qu'au delà qu'il commence à croître.

Le chlore combiné commence par croître puis décroît ensuite constamment.

En effet .

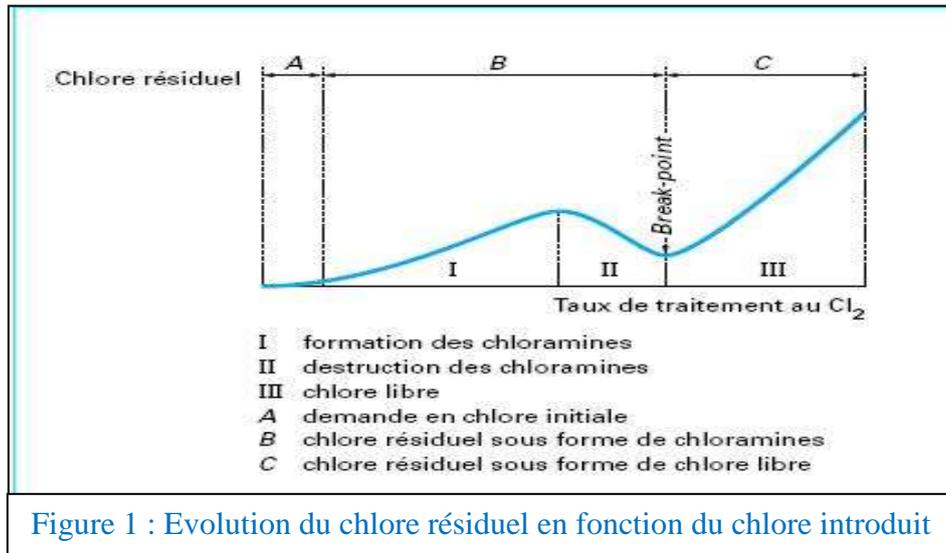
- Le chlore introduit est consommé prioritairement par les matières organiques(azotées, phénoliques) pour donner du chlore combiné (chloramines, les chlorophénols et trihalométhanes)) à faible pouvoir germicide ;

- Dans un deuxième temps le chlore ajouté sert à détruire le chlore combiné (point critique).;

- Dans une troisième phase, le chlore ajouté possède les propriétés désinfectantes recherchées et constitue le chlore libre résiduel (acide hypochloreux, hypochlorite)

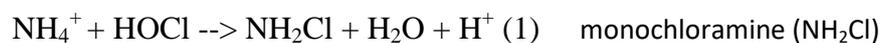
La dose de chlore nécessaire pour atteindre le break point, en présence d'ammoniaque est, selon les auteurs, de 8 à 10 fois la dose d'azote présente dans l'eau à traiter.

Pratiquement, pour être sûr de chlorer au delà du BP, il faudra avoir dans l'eau un chlore résiduel libre d'au moins 0,4 mg/l, et une différence entre chlore résiduel total et chlore libre aussi faible que possible.



En présence d'ammonium ou des substances aminées le chlore forme des chloramines, ayant un pouvoir bactéricide non négligeable, selon les réactions suivantes :

Réactions simplifiées pour la formation des chloramines :



Lorsque la réaction 3 est terminée l'excès de chlore ajouté provoque la destruction des chloramines selon la réaction :



Lorsque la réaction 4 est terminée le chlore ajouté en excès se trouve sous forme de chlore libre. La présence des amines ou d'ammonium entraîne que la dose de chlore nécessaire pour obtenir un traitement efficace soit beaucoup plus élevée, car une partie très importante est consommée par des composés aminés.

- **Chloramine** : Produit résultant de la combinaison du chlore et de l'ammoniac d'origine organique ou inorganique. C'est un antiseptique que l'on préfère employer dans certains cas à la place du chlore pour la désinfection des eaux, notamment dans le cas où celles-ci contiennent des traces de phénols : il ne se produit pas de goûts de chlorophénols.
- **Chlore résiduel total** : Quantité totale de chlore, libre ou combiné, subsistant après le temps de réaction normal de l'eau à la chloration.
- **Demande en chlore** : Quantité de chlore pouvant être consommée par l'eau pour sa désinfection et pour la destruction des matières organiques. La demande pour une eau donnée varie avec la quantité de chlore ajoutée, le temps de contact et la température
- **Chloration au point de remontée ou chloration au point critique** : Addition de chlore à l'eau jusqu'à ce que la demande de chlore soit satisfaite et que toute addition subséquente entraîne une teneur résiduelle directement proportionnelle à la quantité ajoutée au-delà du point de remontée.
- **Déchloration** : Réduction partielle ou complète du chlore résiduel d'une eau par tout procédé physique ou chimique.

V.3.2. Désinfection par le dioxyde de chlore

Le traitement de l'eau potable est la principale application de désinfection du dioxyde de chlore. Grâce à ses facultés de biocide, le dioxyde de chlore est aussi utilisé dans la désinfection des eaux d'égouts, les procédés industriels de traitement de l'eau, la désinfection de l'eau des tours de refroidissement, le traitement de l'air industriel, production et traitement de produits alimentaires, l'oxydation des rejets industriels et la stérilisation de gaz d'équipement médical.

Pour le traitement de l'eau potable, le dioxyde de chlore peut être utilisé à la fois comme désinfectant et comme agent d'oxydation. Il peut être utilisé pour les étapes de pré-oxydation et de post-oxydation. En ajoutant du dioxyde de chlore dans l'étape de pré-oxydation du traitement des eaux de surface, le développement des algues et des bactéries peut être évité. Le dioxyde de chlore oxyde les particules flottantes et a un effet bénéfique sur le procédé de coagulation et l'élimination de la turbidité de l'eau.

Le dioxyde de chlore est un puissant désinfectant contre les bactéries et les virus. Dans l'eau, le dioxyde de chlore est actif en tant que biocide pour au moins 48 heures.

Le dioxyde de chlore empêche la croissance des bactéries dans le réseau de distribution de l'eau potable. C'est aussi un agent actif contre la formation de bio film dans le réseau de distribution. Un bio film est souvent très dur à défaire. Il forme une couche protectrice sur les microorganismes pathogènes. La plupart des désinfectants ne peuvent atteindre les microorganismes protégés.

Cependant, le dioxyde de chlore élimine les biofilms et tue les microorganismes pathogènes. Le dioxyde de chlore empêche aussi la formation de bio film parce qu'il reste actif dans le système pendant un long moment.

Les dosages de dioxyde de chlore

Pour la pré-oxydation et la réduction des substances organiques, entre 0.5 et 2 mg/l de dioxyde de chlore est requis pour un temps de contact de 15 à 30 minutes. La qualité de l'eau détermine le temps de contact requis. Pour une post-désinfection, des concentrations entre 0.2 et 0.4 mg/L doivent être appliquées. La concentration de sous-produits résiduels de chlorite est très faible et il n'y a pas de risque pour la santé des hommes.

V.3.3 Désinfection par l'ozone O₃

L'ozone est un gaz aux reflets de couleur bleutés instable composé de molécules d'oxygène triatomique. Puisque l'ozone se décompose rapidement en oxygène, on doit le produire immédiatement avant son utilisation, grâce à l'émission d'un effluve électrique sous haute tension dans une atmosphère contenant de l'air sec. Dans la production de l'ozone, les coûts imputables à l'énergie électrique utilisée et à l'entretien sont très importants.

Le pouvoir désinfectant de l'ozone est de 10 à 100 fois supérieur à celui du chlore, et ce pour tous les types de microorganismes. Il est même efficace contre les spores et les kystes, qui sont pourtant les microorganismes les plus résistants.

L'ozone est passablement instable dans les solutions aqueuses. Sa durée de vie dans l'eau est d'environ 20 minutes. Dans l'air, l'ozone a une durée de vie de 12h ce qui le rend plus stable dans l'air que dans l'eau.

La quantité d'ozone qu'on doit ajouter à l'eau pour obtenir une bonne désinfection varie d'une eau à l'autre en fonction de la demande d'ozone due aux matières organiques et inorganiques oxydées par l'ozone.

Tout comme pour le chlore, on suggère donc de maintenir une certaine concentration résiduelle après un temps de contact déterminé (quelques minutes).

Technologies disponibles Il existe différents types d'ozoneurs :

- L'ozoneur à air (air séché avec un point de rosée à de -50°C à -70°C). L'ozoneur à oxygène pur avec recyclage ou non de l'oxygène (on ne dépasse pas les 100g/m³ d'ozone).
- Les ozoneurs à basse fréquence (50 Hz) dont la production unitaire par heure est environ de 1 à 3 Kg d'ozone.
- les ozoneurs à moyenne fréquence (150 à 600 Hz) dont la production unitaire peut atteindre 60 Kg par heure. C'est dans ces ozoneurs que l'ozone est produit et injecté dans un réacteur, où est également injecté l'effluent à traiter.

Avant d'être injecté dans l'eau contenant l'effluent, le gaz contenant l'ozone peut être divisé en "microbulles" à l'aide de divers matériels :

- Des diffuseurs poreux disposés en partie basse des cuves ou colonnes. Ce système présente l'avantage de ne pas consommer l'énergie complémentaire et l'inconvénient de s'encrasser et vieillir.
- Un hydro-injecteur assurant la pulvérisation du gaz directement dans l'eau motrice, sous une pression de 4 à 5 bars. Ce système présente l'avantage d'un meilleur taux de dissolution et l'inconvénient de la consommation supplémentaire d'énergie de la pompe à eau motrice de l'hydro-injecteur.

Le besoin en ozone peut varier de 2 à 20 g par m³ d'eau à traiter, en fonction du polluant et de sa concentration.

V.3.4 Désinfection par rayonnement Ultra-violet

Durant les 100 dernières années, la science a pu identifier les effets bactéricides du rayonnement UV du spectre électromagnétique.

Les longueurs d'ondes spécifiques responsables de ces effets sont celles situées entre 240 et 280 nm, avec un pic à 253.7 nm. Ces longueurs d'onde sont situées dans le domaine des UV-C.

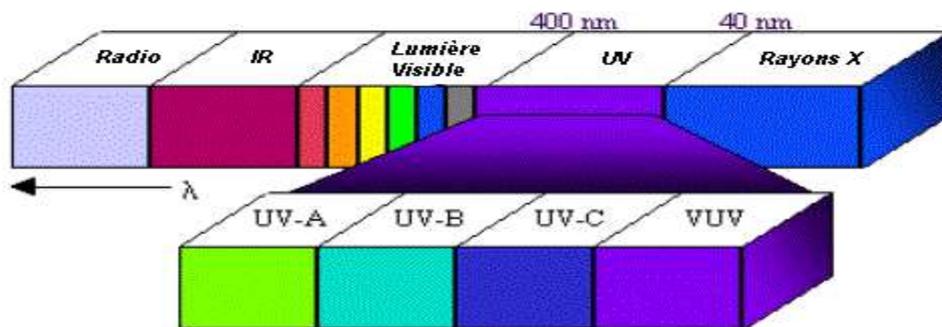


Figure : Localisation des UV-C dans le spectre électromagnétique.

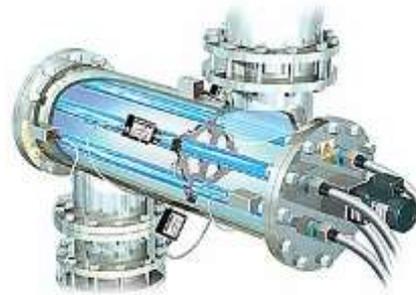
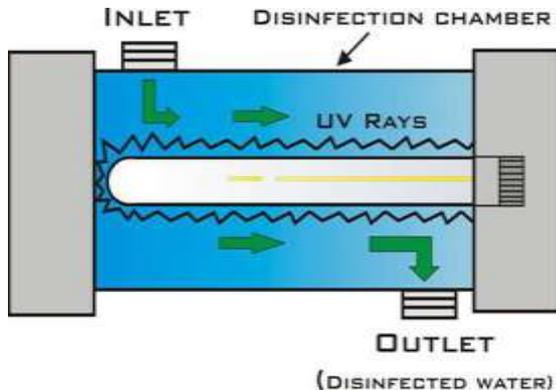
a) Effet du rayonnement UV

Lorsqu'un micro-organisme est exposé à un rayonnement UV-C, le noyau de la cellule est atteint, et la duplication de l'ADN est stoppée. Les rayonnements UV ont un effet sur l'ADN, l'acide nucléique et les enzymes. Les organismes pathogènes sont donc inactivés ou détruits.

b) Production d'UV-C

Les sources d'UV-C sont typiquement des tubes de type néon, contenant du quartz et de la silice, d'un diamètre allant de 15 à 25 mm pour une longueur de 100 à 1200 mm. Ce tube est rempli d'un gaz chargé de vapeur de mercure.

Les lampes basses pression sont seulement capables de produire 2 raies, à 185 et 254 nm. Une augmentation de la tension d'alimentation provoque rapidement un échauffement de la lampe; entraînant ainsi une augmentation de la pression dans la lampe. On obtient ainsi un spectre typique moyenne pression.



b) Dose d'exposition

La dose d'exposition s'exprime par le produit de l'intensité du rayonnement (énergie par unité de surface) par le temps d'exposition.

Soit :

$$\text{DOSE} = I \times T$$

Avec :

I : l'intensité du rayonnement

T : le temps d'exposition

L'unité couramment utilisée est le mJ/cm^2 , équivalent à 1000 micro watt seconde/ cm^2 .

c) Relation dose d'exposition / effets destructifs

La relation entre la dose d'exposition et l'effet destructif sur un type de micro-organisme visé est donnée par la formule suivante :

$$N/N_0 = e^{-KD}$$

Où :

N = Nombre de micro-organismes après traitement.

N₀ = Nombre initial de micro-organismes visés

K = Constante associée au type de micro-organisme

D = Dose

La relation ci-dessus indique donc que doubler la dose d'exposition multiplie l'effet destructif par 10. Pour augmenter l'effet destructif de 90 à 99%, il faut donc doubler la dose. Pour passer à 99,9% il faudra la tripler, ...