

L3 Pro Métrologie Chimique & Nucléaire



UNIVERSITÉ DE NANTES

UE X5MC 320: Aspects de radioécologie

Olivier Péron

Année Universitaire : 2016-2017

PLAN DU COURS

- Radioécologie
- Quelques radionucléides d'intérêt
- Focus sur le Tritium (^3H)

RADIOECOLOGIE

1) Définitions

2) Notions de radioactivité

3) Notions d'écologie

4) Notions de radioécologie

1) DEFINITIONS

Radioactivité = propriété de quelques isotopes d'éléments chimiques d'émettre des radiations (α , β , γ ou n).

Ecologie = Etude des relations entre les êtres vivants et leur environnement naturel.

Radioécologie = détecter la présence de radionucléides dans l'environnement, rechercher leurs origines et comprendre leurs processus de transfert et de concentration dans les écosystèmes.

Son objectif est d'évaluer l'impact de la radioactivité naturelle et artificielle sur l'environnement (impact radioécologique) et sur la population (impact dosimétrique).

2) NOTIONS DE RADIOACTIVITE

la radioactivité en 6 points

- noyau
- phénomène spontané
- stabilité
- loi de probabilité
- libération d'énergie
- rayonnements ionisants

Grandeurs et unités dosimétriques

- activité (bequerels)

Le becquerel (Bq) mesure la radioactivité. C'est l'unité d'activité qui correspond à la désintégration d'un noyau par seconde. L'activité d'une substance représente le nombre d'atomes radioactifs qui se désintègrent pendant une unité de temps.

- dose absorbée (grays)

Les rayonnements ionisants agissent sur la matière par l'intermédiaire de l'énergie qu'ils lui cèdent. La grandeur dosimétrique fondamentale en radioprotection, qui quantifie l'interaction d'un rayonnement avec la matière, est la dose absorbée.

$$D = \frac{dE_a}{dm}$$

Grandeurs et unités dosimétriques

- dose équivalente (sieverts)

A dose absorbée égale, les effets biologiques varient selon la nature des rayonnements.

$$H_{T,R} = W_R \times D_{T,R}$$

Nature	Energie	W_R
Photons	Toutes les énergies	1
Electrons, muons	Toutes les énergies	1
Neutrons	<10 keV	5
	10 keV - 100 keV	10
	100 keV - 2 MeV	20
	2 MeV - 20 MeV	10
	>20 MeV	5
Protons	>20 MeV	5
Particules alpha, fragments de fission, noyaux lourds		20

Grandeurs et unités dosimétriques

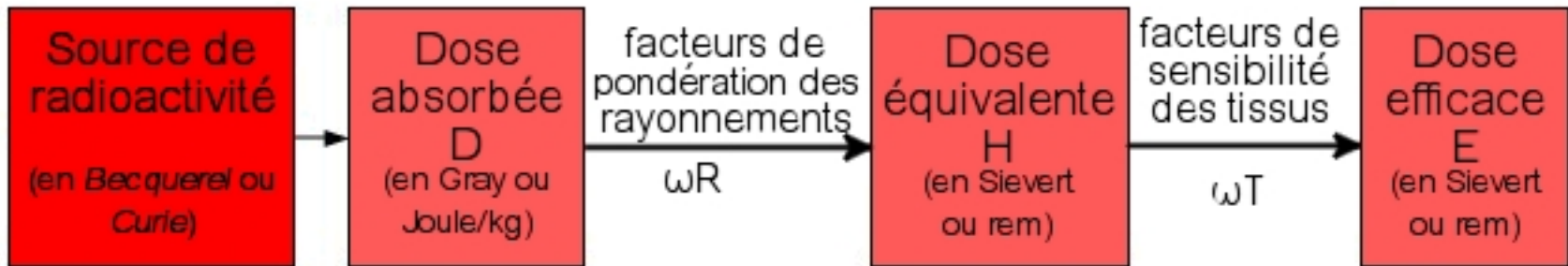
- dose efficace (sieverts)

La dose efficace, E, est la somme des doses équivalentes reçues au niveau de tous les organes ou tissus exposés

Organe	W _T	W _T
	CIPR 26	CIPR 60
Gonades	0,25	0,20
Seins	0,15	0,05
Moelle osseuse rouge	0,12	0,12
Côlon		0,12
Poumons	0,12	0,12
Estomac		0,12
Vessie		0,05
Foie		0,05
Œsophage		0,05
Thyroïde	0,03	0,05
Os (surface osseuse)	0,03	0,01
Peau		0,01
Reste de l'organisme	0,30	0,05

$$E = \sum W_T \cdot H_T$$

Grandeurs et unités dosimétriques



Ces trois unités sont les unités légales de mesure utilisées en radioprotection. Les rapports existant entre les différentes unités de mesure peuvent être imagés de la façon suivante :

Les becquerels = ce sont les cailloux qu'un enfant jette en l'air.

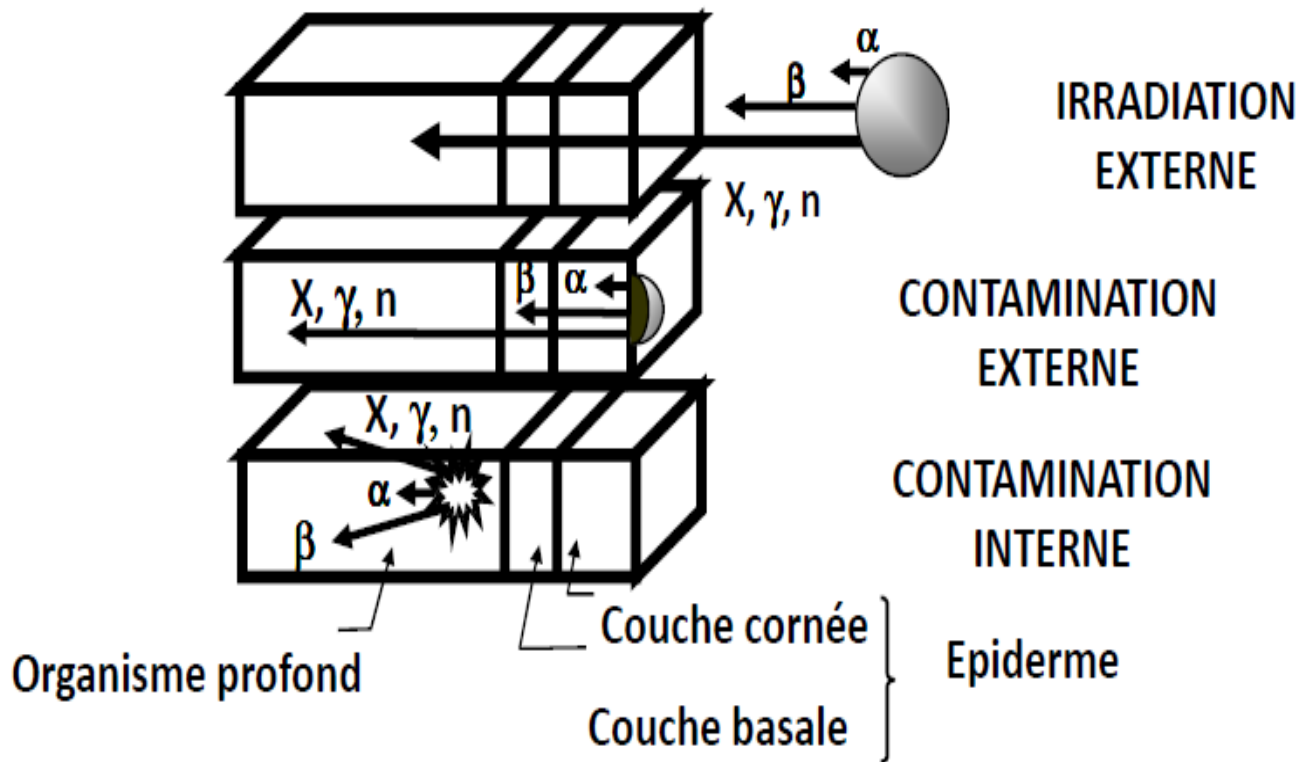
Les grays = ce sont les cailloux que reçoit son camarade situé à côté.

Les sieverts = ce sont les plaies plus ou moins graves qui en résultent.

Grandeurs et unités dosimétriques

- dose engagée

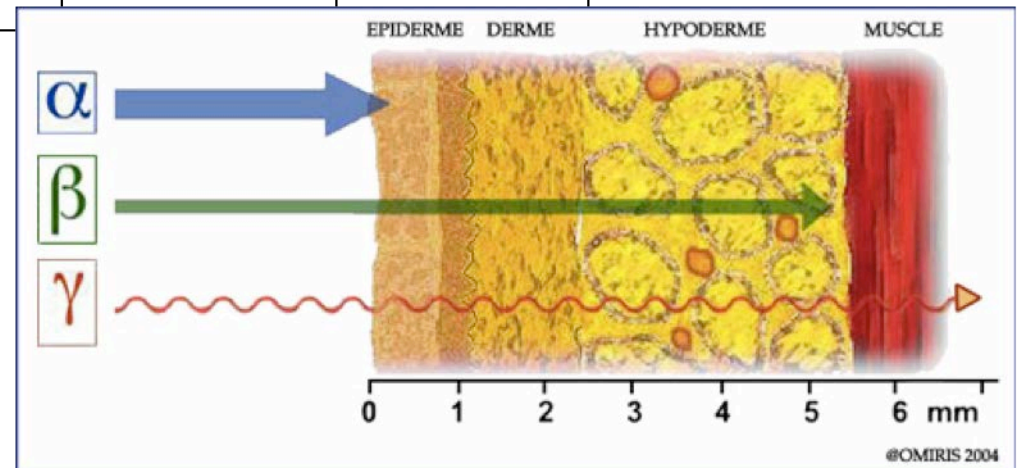
$$1/T_{\text{eff}} = 1/T_{\text{rad}} + 1/T_{\text{biol}}$$



Grandeurs et unités dosimétriques

- bilan

DANGER RELATIF	α Parcours court	β Faible parcours	$X \gamma$ Source de danger	n Source de danger
Irradiation externe	0 Sans danger	0(+)	+++	+++
Contamination externe	0 Sans danger	+++ Danger Peau: brûlures	++	
Contamination interne	+++ Source inhalée ou absorbée	+++	++	



Désintégrations nucléaires

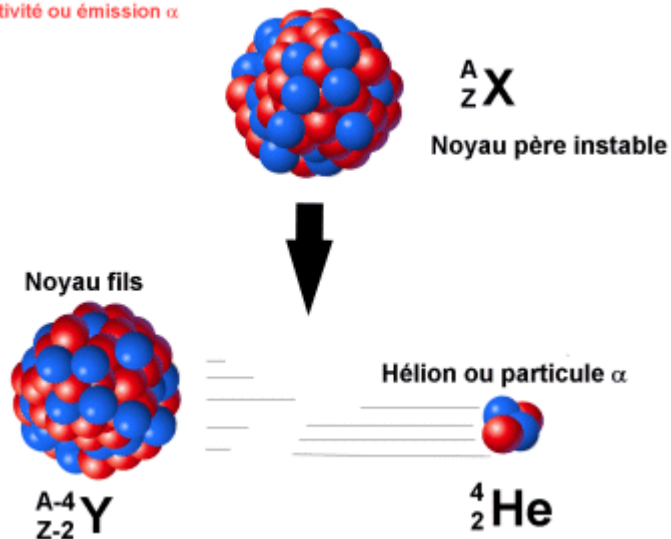
Désintégration α :

Le noyau expulse une particule alpha (noyau d'hélium).



particule α = 2 protons + 2 neutrons

Radioactivité ou émission α



Élément	$^{212}_{84}\text{Po}$	$^{232}_{90}\text{Th}$
Période	$3 \cdot 10^{-7}$ s	10^{10} ans
E_α	8,95 MeV	4,28 MeV

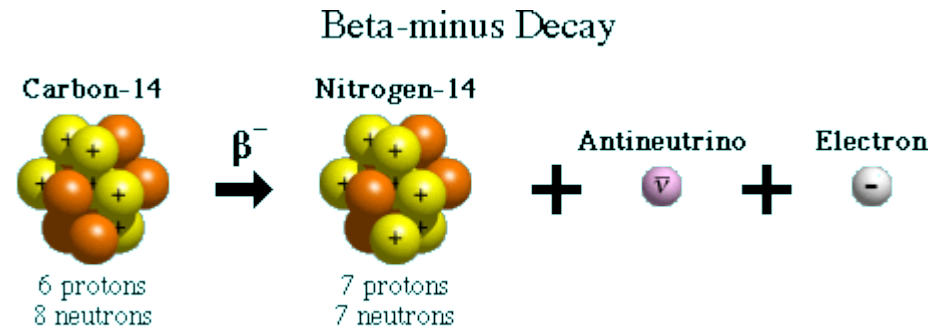


L'émission des particules α est d'autant plus énergétique que la période du radionucléide est courte

Désintégrations nucléaires

Désintégration β^- :

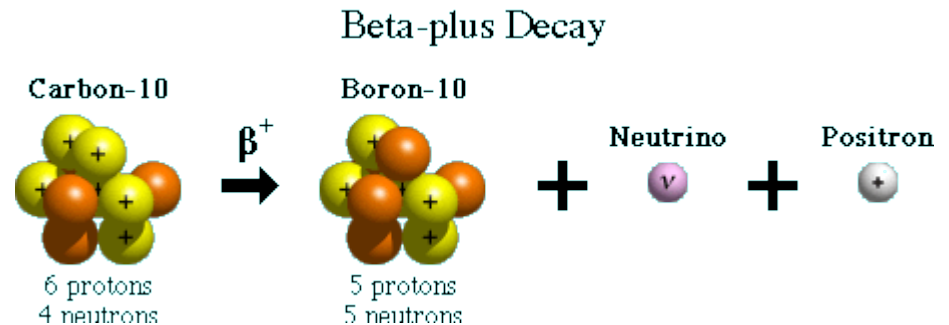
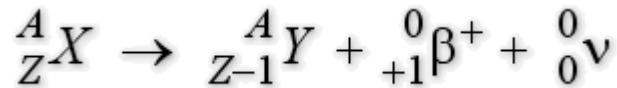
Le noyau expulse un **électron**. Un **neutron** du noyau **se transforme** en **proton** et l'émission de l'**électron** s'accompagne de l'émission d'un **anti-neutrino**.



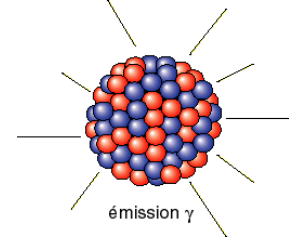
Désintégrations nucléaires

Désintégration β^+ :

Le noyau expulse un **positon**. Un **proton** du noyau **se transforme** en **neutron** et l'émission du **positon** s'accompagne de l'émission d'un **neutrino** (particule de masse nulle).

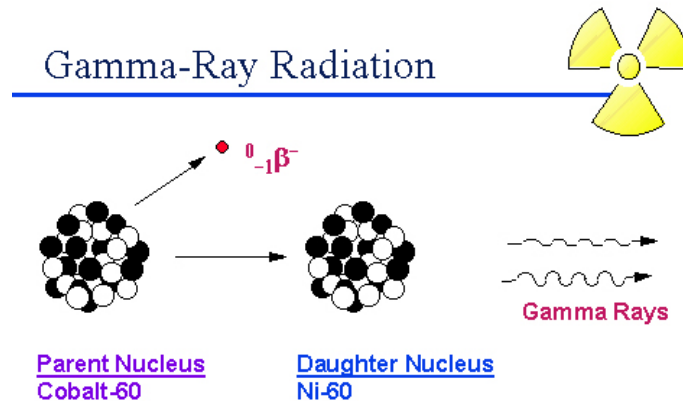
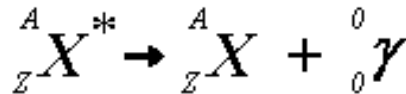


Désintégrations nucléaires



Emission γ :

Au même titre que les atomes, les **noyaux** peuvent se trouver dans un état excité suite à une désintégration α , β ou une collision avec un neutron.



- émission gamma,

- par transition directe si l'énergie du photon γ émis est égale à l'énergie d'excitation du noyau,
- par cascade de rayonnements γ dont la somme des énergies est égale à l'énergie d'excitation.

Loi de décroissance radioactive

La constante radioactive: lambda λ et s'exprime en s^{-1} ou en an^{-1}

L'activité d'une source radioactive:

$$A = \lambda \cdot N$$

La loi de décroissance radioactive

N éléments dont le nombre décroît avec le temps selon un taux de décroissance λ

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

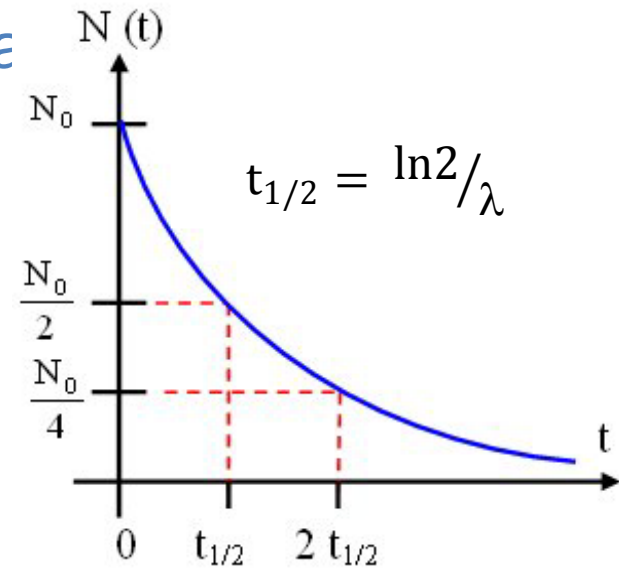
—————> Résolution de l'équation différentielle:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Loi de décroissance radioactive

La période radioactive ou temps de demi-vie: $t_{1/2}$

- le temps nécessaire pour que le nombre de noyaux radioactifs soit divisé par 2
- pour n périodes, $N_0/2^n$



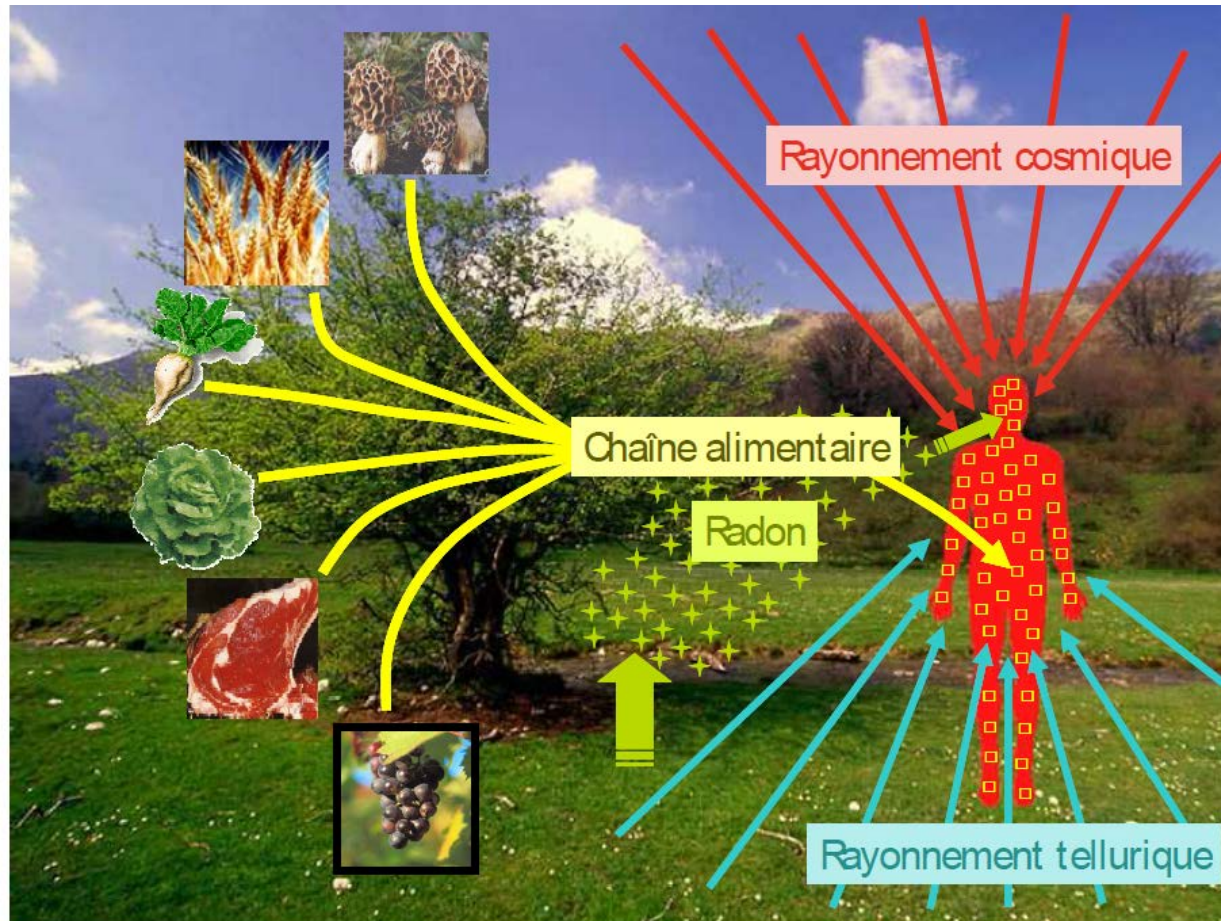
L'activité au cours du temps:

$$A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

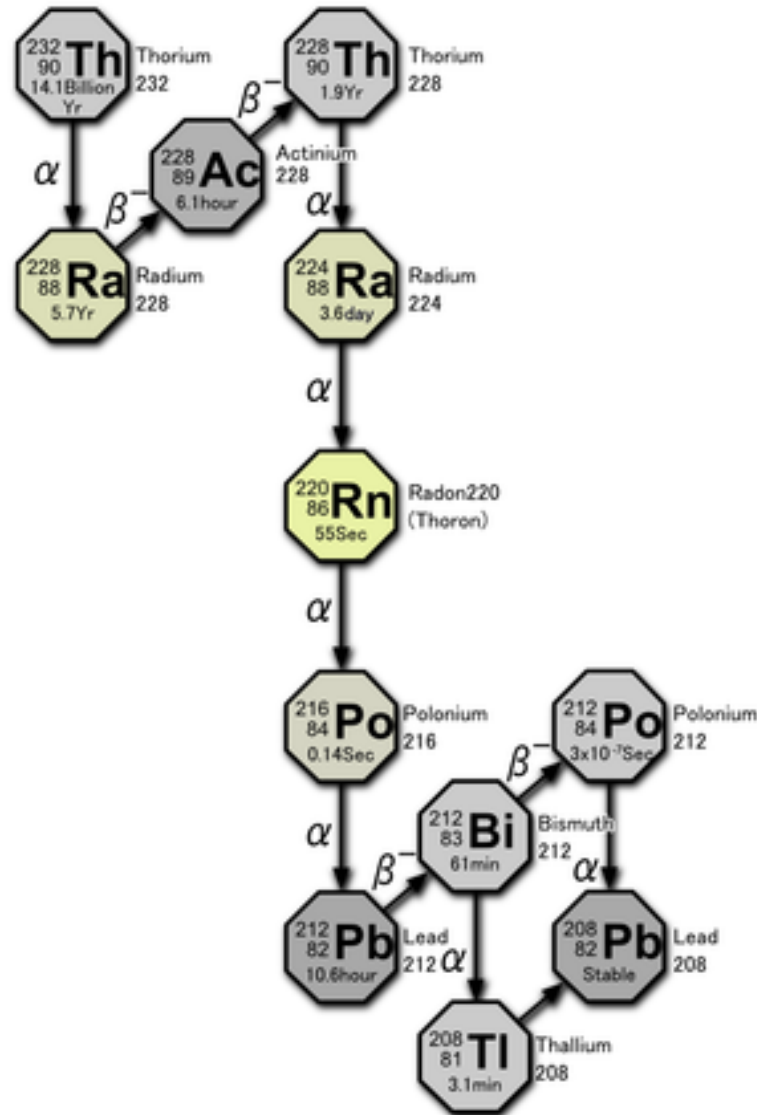
Relation activité – quantité de matière:

$$A = \lambda \times N = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \times \left(\frac{m}{M} \times N_a \right) \quad \text{ou alors} \quad n = \frac{A \times t_{1/2}}{N_a \times \ln 2}$$

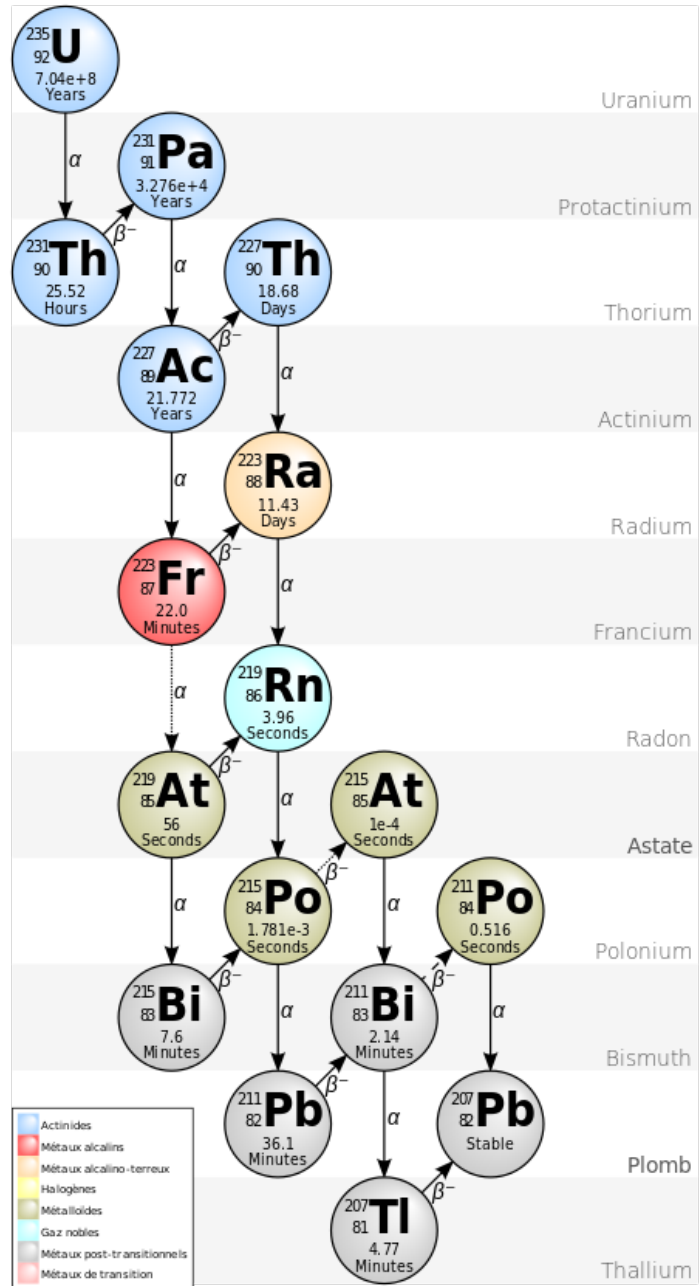
Sources d'origine naturelle



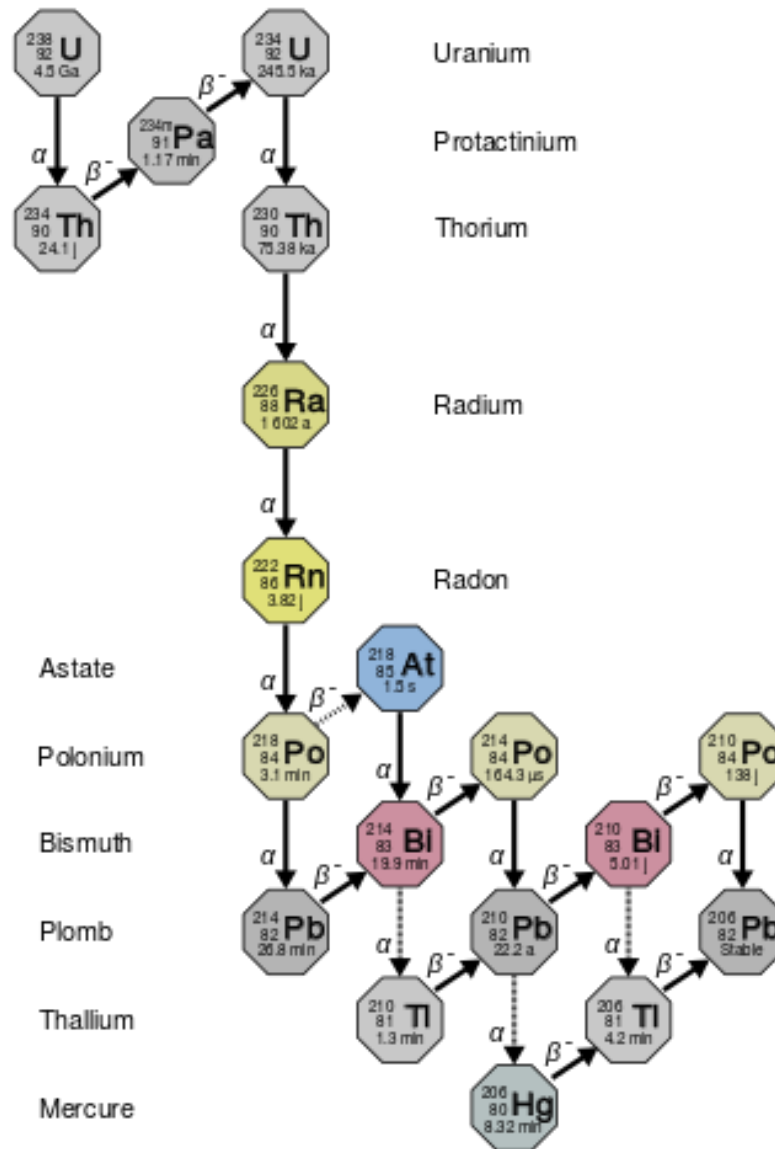
THORIUM 232



URANIUM 235



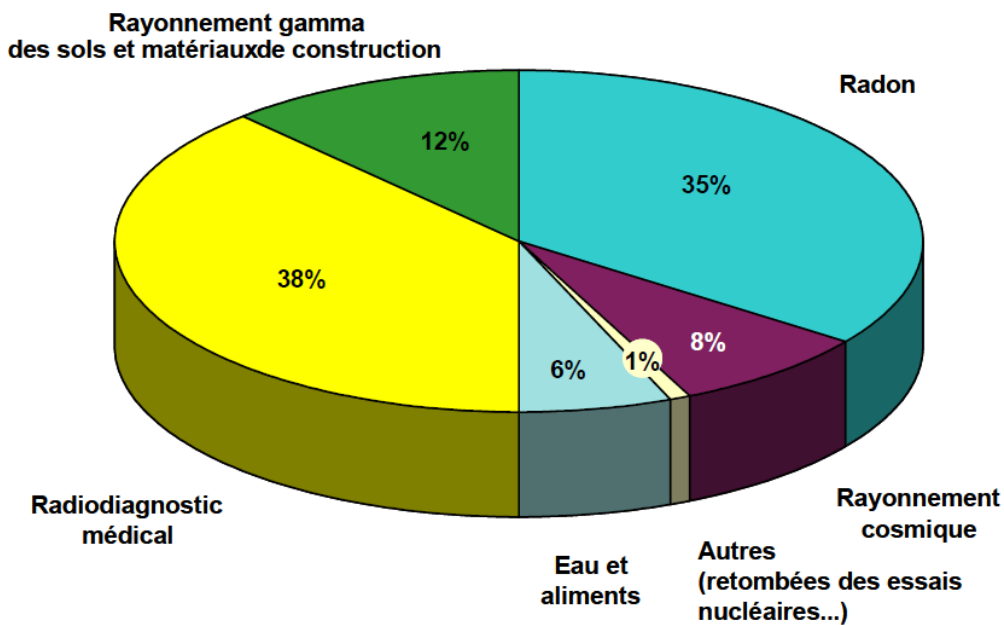
URANIUM 238



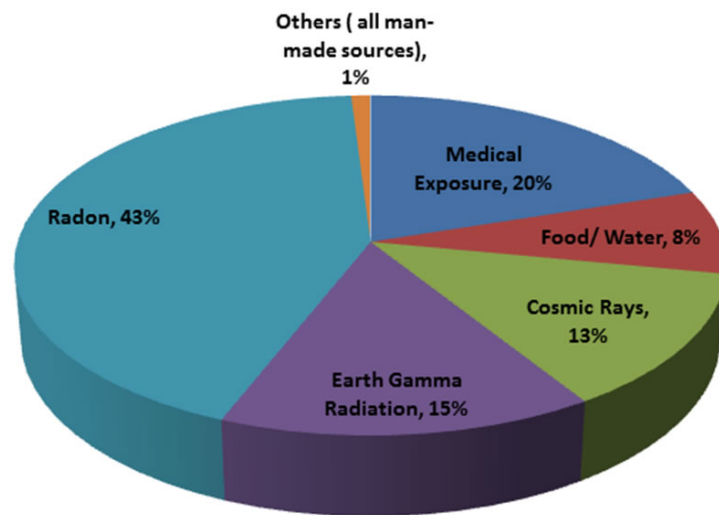
Parmi les 340 atomes différents présents dans la nature (appelées plus précisément « nucléides »), 70 sont radioactifs. Ces radionucléides sont présents dans tous les milieux de l'environnement... y compris l'homme.

Echantillon	Activité (ordre de grandeur)	Radionucléides prédominants
Air extérieur	entre 1 et 100 Bq/m ²	Radon 222
Air des maisons	entre 10 et 10 000 Bq/m ²	Radon 222
Terrain sédimentaire	1 000 Bq/kg	Uranium 238, thorium 232 et leurs descendants, potassium 40
Terrain granitique	3 000 Bq/kg	Uranium 238, thorium 232 et leurs descendants, potassium 40
Eau de mer	13 Bq/l	Potassium 40
Eau minérale	entre 2 et 4 Bq/l	Potassium 40
Lait Pomme de Terre	50 Bq/kg 150 Bq/kg	Potassium 40
Homme	120 Bq/kg	Potassium 40, carbone 14

Sources d'origine artificielle (anthropique)



Sources and distribution of average radiation exposure to the world population (OMS Website)



Les sources d'irradiation

1. Les essais atmosphériques d'armes nucléaires

Lors des explosions, des radionucléides (tritium, ruthénium 106, césium 137, strontium 90...) ont été propulsés dans la haute atmosphère puis se sont déposés sur les continents et les océans de manière relativement homogène. En 35 ans, ces essais atmosphériques ont libéré une quantité de radionucléides équivalente à 500 fois les rejets de l'accident de Tchernobyl.

2. Les accidents d'installations nucléaires

Lors de l'accident de Tchernobyl, les radionucléides se sont déposés sur l'ensemble du continent européen (iode 131, césium 137, césium 134, ruthénium 106...)

Plus récemment l'accident de Fukushima au Japon

3. La chute de satellites

Plusieurs satellites dotés d'une source d'énergie nucléaire ont chuté. En 1964, la rentrée d'un satellite dans l'atmosphère, au-dessus de l'océan indien, a dispersé du plutonium 238 sur l'ensemble du globe. Des traces de ce radionucléide sont détectées sur le territoire français.

4. Les rejets contrôlés de l'industrie nucléaire

Les installations nucléaires (centrales électronucléaires, usines de traitement des combustibles irradiés...) sont autorisées à rejeter de manière contrôlée des radionucléides dans les fleuves ou la mer (rejets liquides) et dans l'air (rejets gazeux).

	Dans les rejets liquides	Dans les rejets gazeux
Réacteur nucléaire	tritium, cobalt 60, manganèse 54, argent 110, antimoine 124, iode 131, césium 137	krypton 85, xénon 133, iode 131, tritium, carbone 14
Usine de traitement	tritium, césium 137, ruthénium 106, strontium 90, antimoine 125, iode 129, carbone 14	tritium, krypton 85, iode 129, xénon 133, carbone 14

3) NOTIONS D'ÉCOLOGIE

L'écologie

C'est « l'économie domestique de la maison Terre ».

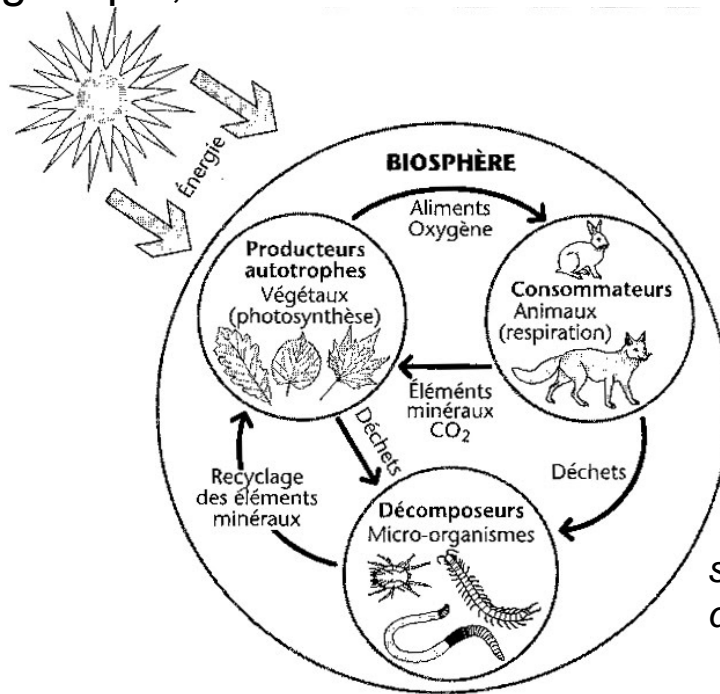
Étymologie: issu de οικος (oikos) qui veut dire maison et λογος (logos) qui veut dire science,

Définition: c'est la **science des relations entre les êtres vivants et le monde qui les entoure.**

Qu'est ce que la biosphère ?

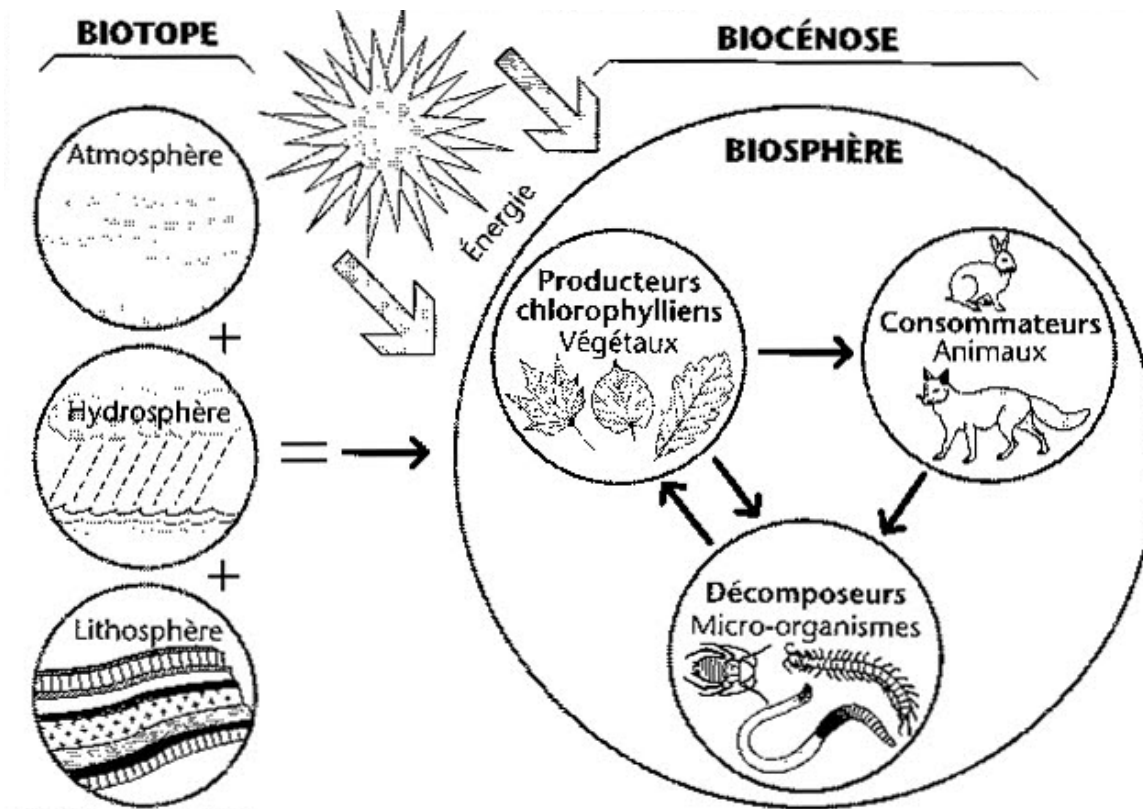
Pour simplifier, on peut la définir comme **l'ensemble des organismes vivants** qui peuplent la planète. Il est courant de distinguer **3 grandes classes** d'organismes vivants :

- les **végétaux "autotrophes"** qui tirent leur énergie directement du soleil, via la photosynthèse,
- les **animaux "hétérotrophes"** qui tirent leur énergie des végétaux ou des autres animaux qu'ils mangent
- les **décomposeurs** (champignons, bactéries, microfaune) qui décomposent la matière organique, "libérant" les éléments nutritifs indispensables aux végétaux.



*schéma tiré de "l'empreinte écologique"
de A. Boutaud et N. Gondran, éd. La découverte 2009*

La biosphère interagit bien sûr avec l'**atmosphère**, mais aussi avec l'**hydrosphère** qui inclut les océans, les rivières et les nappes phréatiques, et avec la **lithosphère**, qui est l'écorce terrestre minérale.



Le biotope: la composante abiotique (non-vivante) d'un milieu naturel c'est-à-dire son environnement physico-chimique (substrats rocheux, sols, sels minéraux, eau) et climatique (ensoleillement, température, pluviométrie, hygrométrie, vent, neige, pression atmosphérique)

Quelle différence entre la biosphère et la biocénose ?

Les deux termes désignent le même ensemble, les organismes vivants, mais la **biocénose** est l'ensemble des organismes et espèces qui vivent en interaction **dans un milieu donné, le biotope.**

Autrement dit, la **biosphère désigne le vivant en général**, alors qu'une **biocénose** est toujours particulière, car rattachée à un milieu naturel précis, lequel est caractérisé par des conditions de climat, de sols et de précipitations spécifiques.

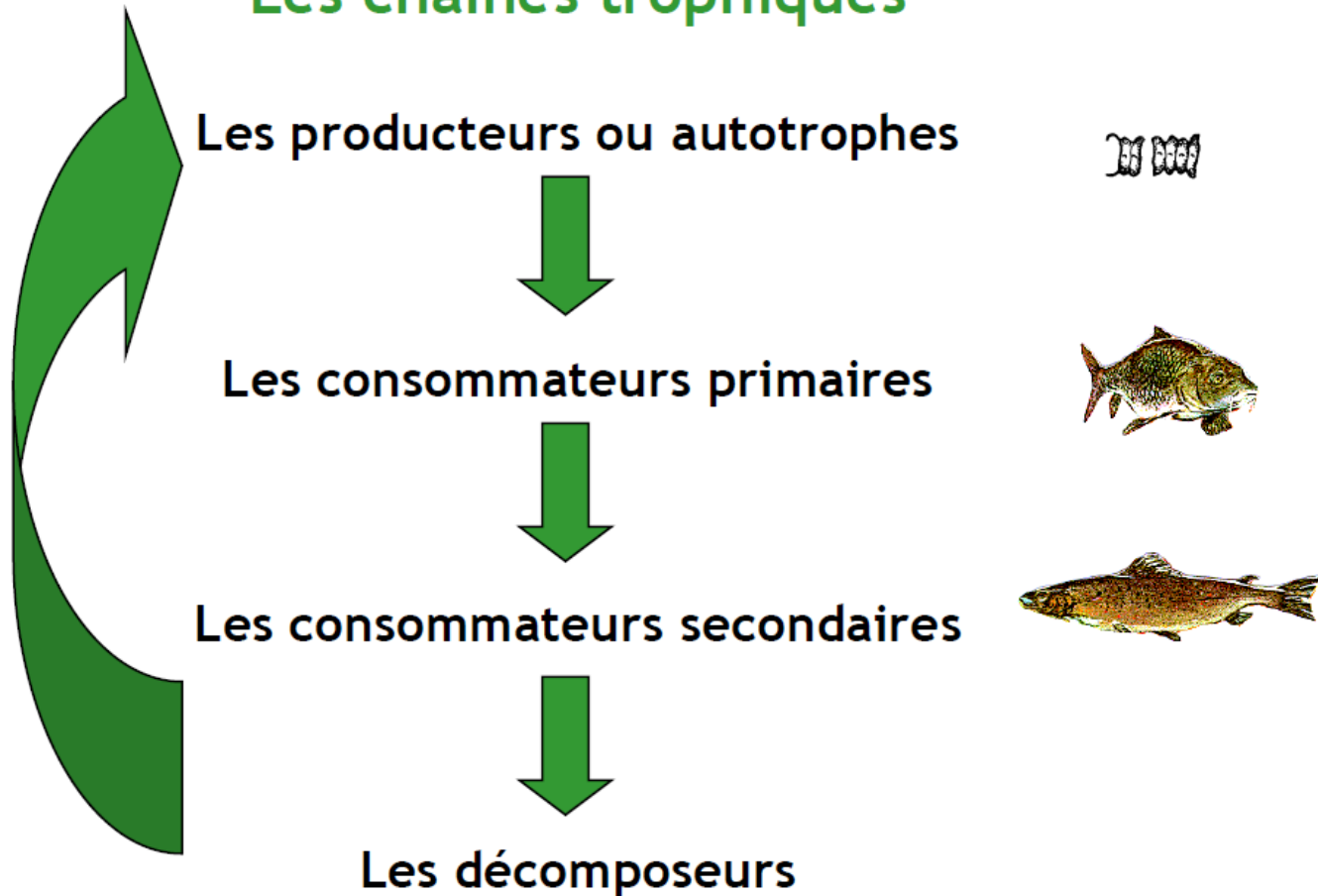
L'écosystème est l'addition d'une biocénose et de son biotope associé. Il forme le niveau structurel supérieur en écologie.

C'est une unité fonctionnelle qui comprend toutes les interactions existant entre les êtres vivants d'une part, et entre ces derniers et le biotope dans lequel ils vivent, d'autre part.

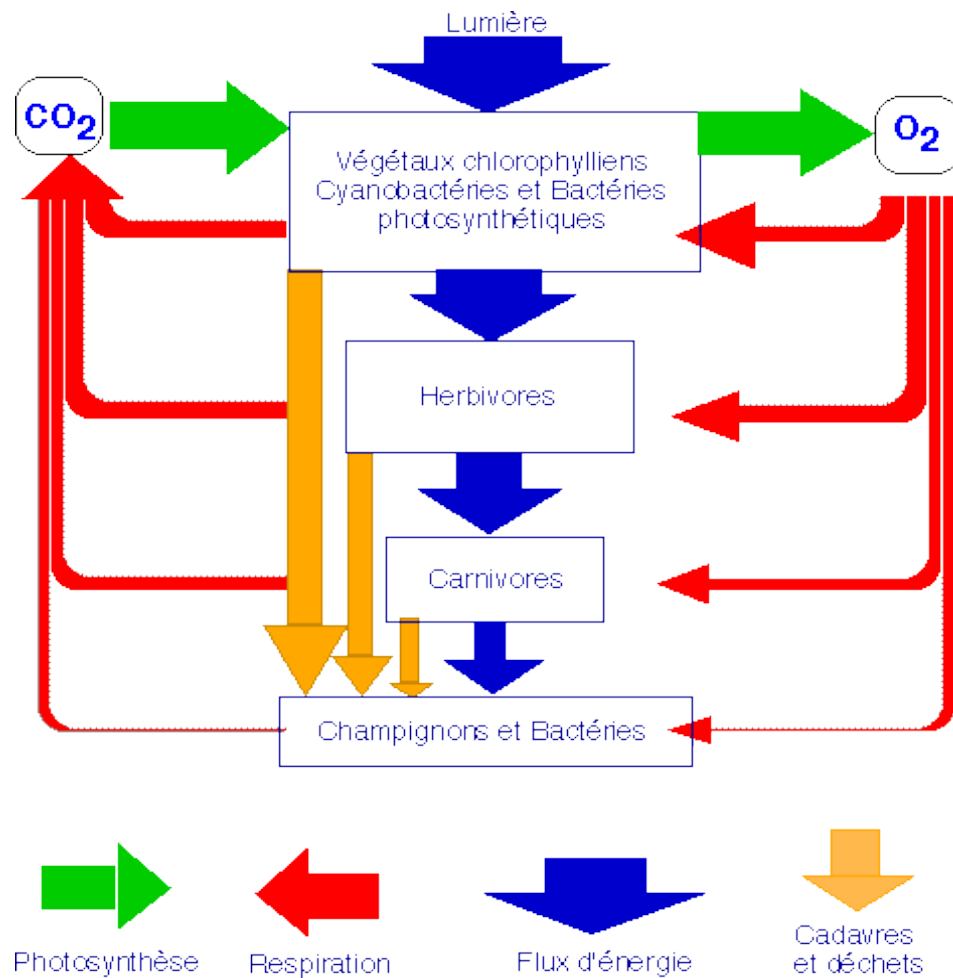
Cette unité est stable dans le temps et représente l'ensemble de référence en écologie.

Etres vivants, chaines trophiques et cycle de la matiere

Les chaînes trophiques



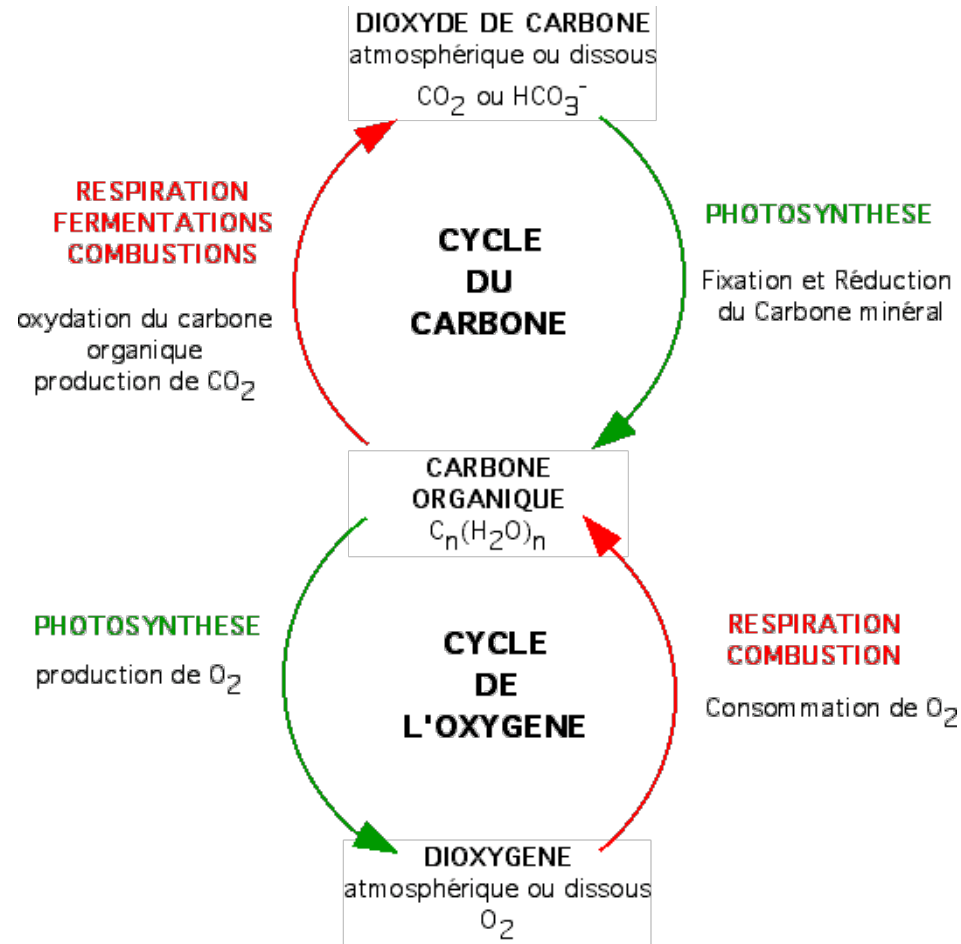
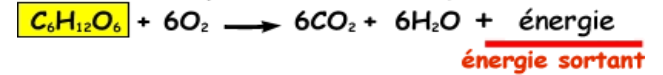
Ex: Le cycle du carbone et de l'oxygène et le flux d'énergie dans la biosphère



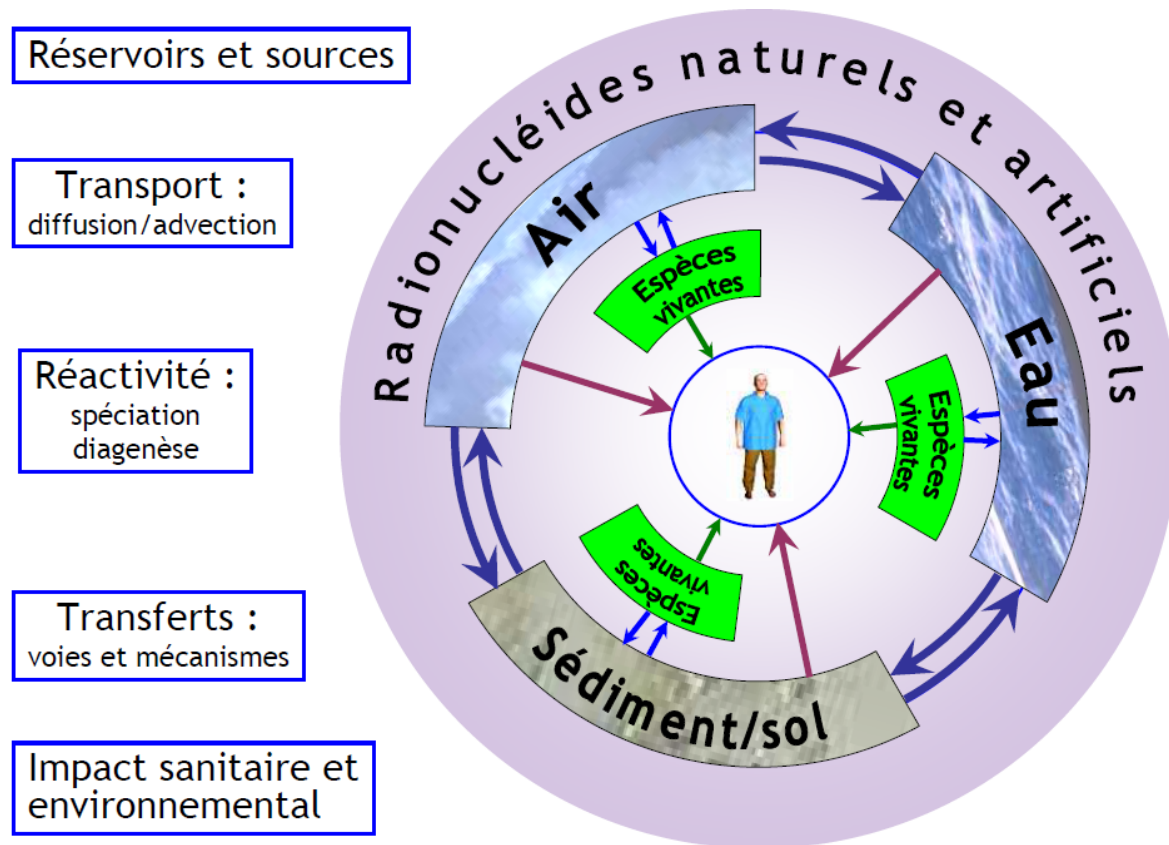
La photosynthèse



respiration aérobie





4) NOTIONS DE RADIOECOLOGIE




Qu'est ce que l'environnement?

Plusieurs réponses au plan de l'éthique:

Anthropocentrique  **Une espèce (*Homo sapiens*)**
Centré sur l'homme, l'environnement n'est considéré que dans la mesure où il affecte directement la santé de l'homme

Biocentrique  **Toutes les espèces**
Toutes les espèces, animales et végétales, ont une valeur morale

Ecocentrique  **Toutes les espèces + leurs écosystèmes**
La valeur morale est étendue aux écosystèmes en tant que systèmes de support de vie et producteurs de services

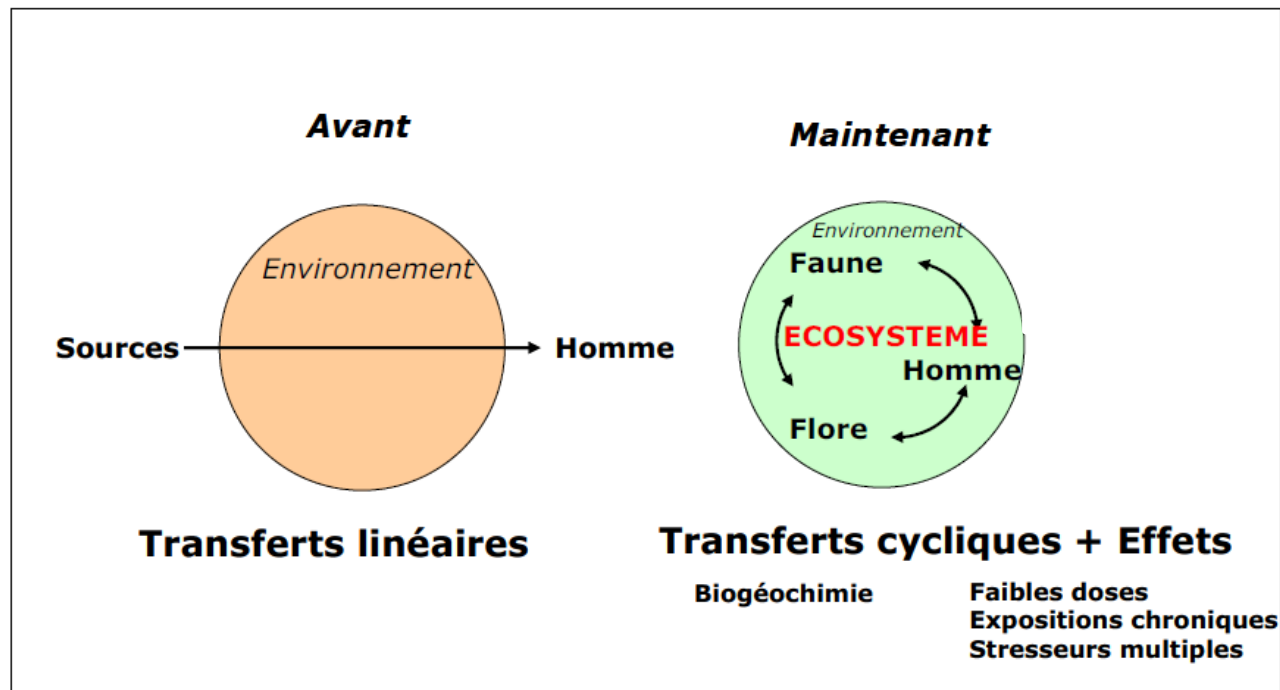
Il y a un consensus éthique actuellement pour reconnaître une valeur intrinsèque à tous les êtres vivants, même si la santé de ceux-ci ne se trouve pas en liaison directe avec celle de l'homme

Quel est le problème?

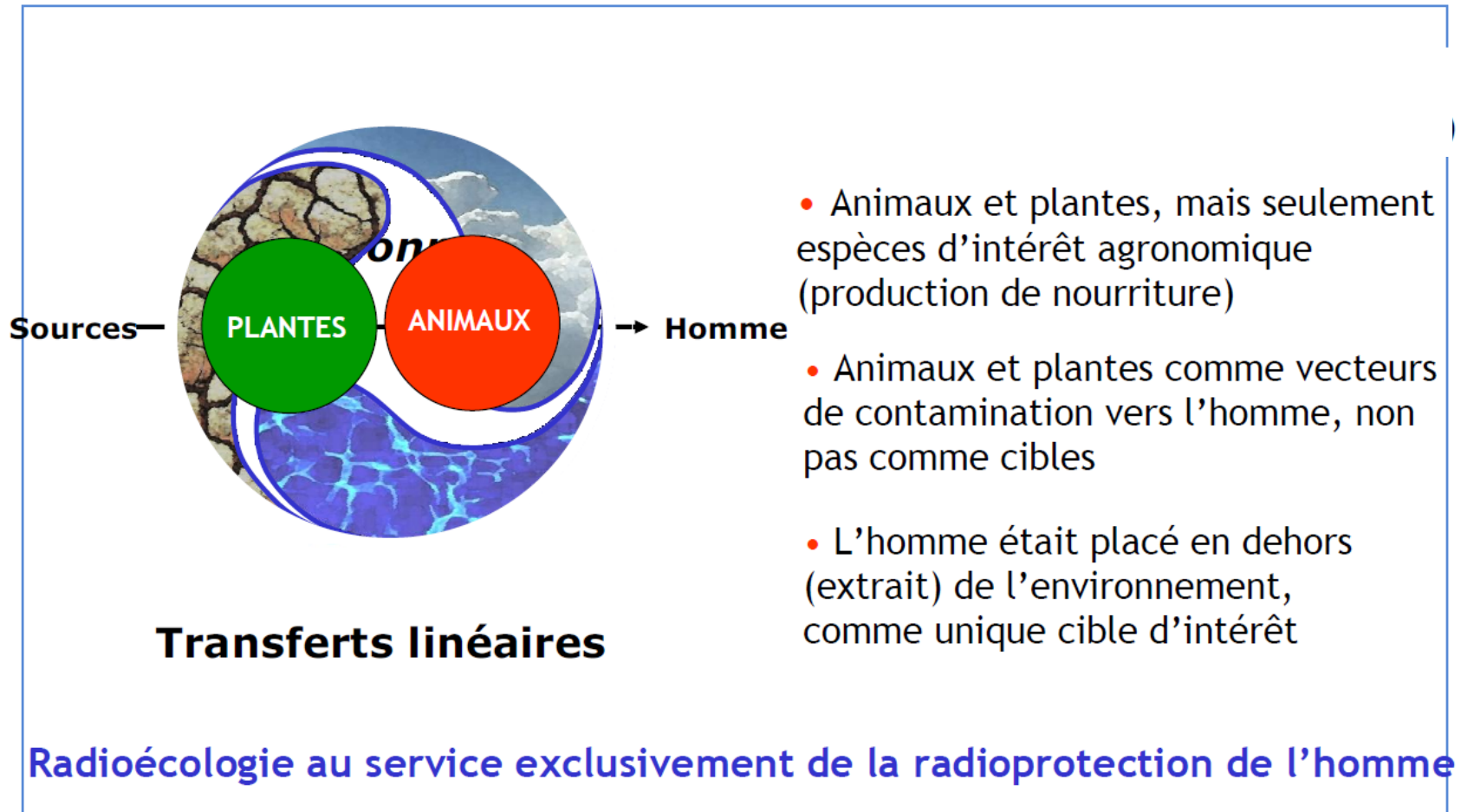
- Les radiations ionisantes causent des dommages à la vie humaine → Système international de **protection radiologique de l'homme** (CIPR)
- Mais qu'en est-il de la faune, de la flore et des écosystèmes ?
- La CIPR a longtemps stipulé que « la protection de l'homme induit implicitement une protection suffisante de l'environnement »
- Paradigme remis en cause car:
 - pas toujours vrai,
 - non démontré explicitement sur des bases scientifiques,
 - absence de critères spécifiques pour l'environnement,
 - difficile à justifier / réglementation pour toxiques chimiques
 - qu'en est-il des écosystèmes où l'homme est absent ?
- Construction d'un système pour la **protection radiologique de l'environnement** (Comité 5 de la CIPR)

Evolution de la radioécologie

- Evolution d'une vision anthropocentrique → vision écocentrique
L'environnement n'était pris en compte qu'en tant que vecteur de radioactivité vers l'homme, le détriment à l'environnement lui-même étant ignoré



Approche historique anthropocentrique

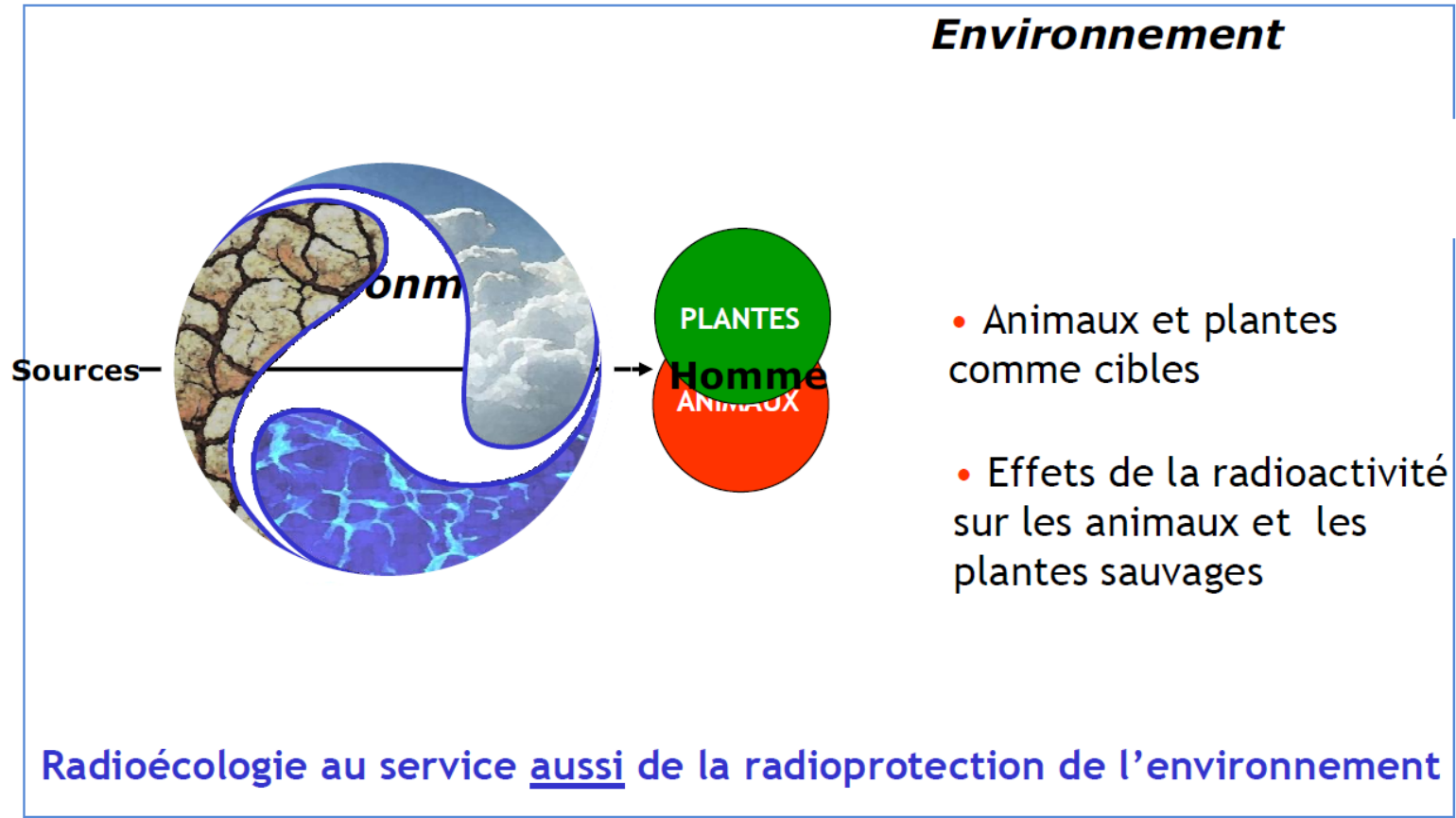


Fondements de l'évolution d'une vision Anthropocentrique (1977) vers une vision biocentrique (2005)

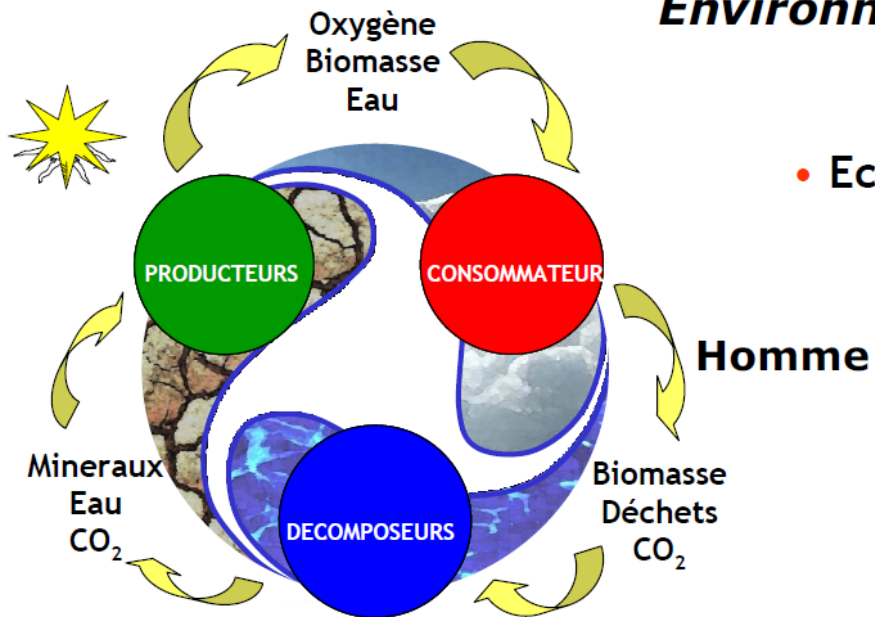
- La protection de l'environnement est devenue une préoccupation majeure (changement climatique, érosion de la biodiversité, ...)
- La protection de l'environnement vise la protection des plantes, des animaux et des écosystèmes en soi (et non plus seulement des humains)
- La protection de l'environnement constitue une préoccupation générale qui doit aussi être traitée par la radioprotection
- Du fait des effets réels ou potentiels des radiations des actions et des réglementations sont mises en oeuvre pour s'en protéger, mais il y a aussi les craintes du public auxquelles des réponses doivent être apportées
- La demande sociétale actuelle insiste pour que soient mises en place des mesures réglementaires de protection de l'environnement lui-même (besoin de transparence, d'harmonisation entre les approches radiologique/chimique)

La vision biocentrique

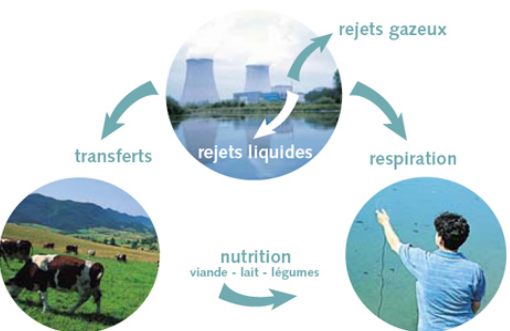
Vision actuelle développée par la CIPR



Environnement Incluant l'homme



- Ecosystème = biotope + biocénose



Place de la radioécologie



Terme source

Atmosphérique
Liquide
Accident de Transport
Accident nucléaire

Environnement

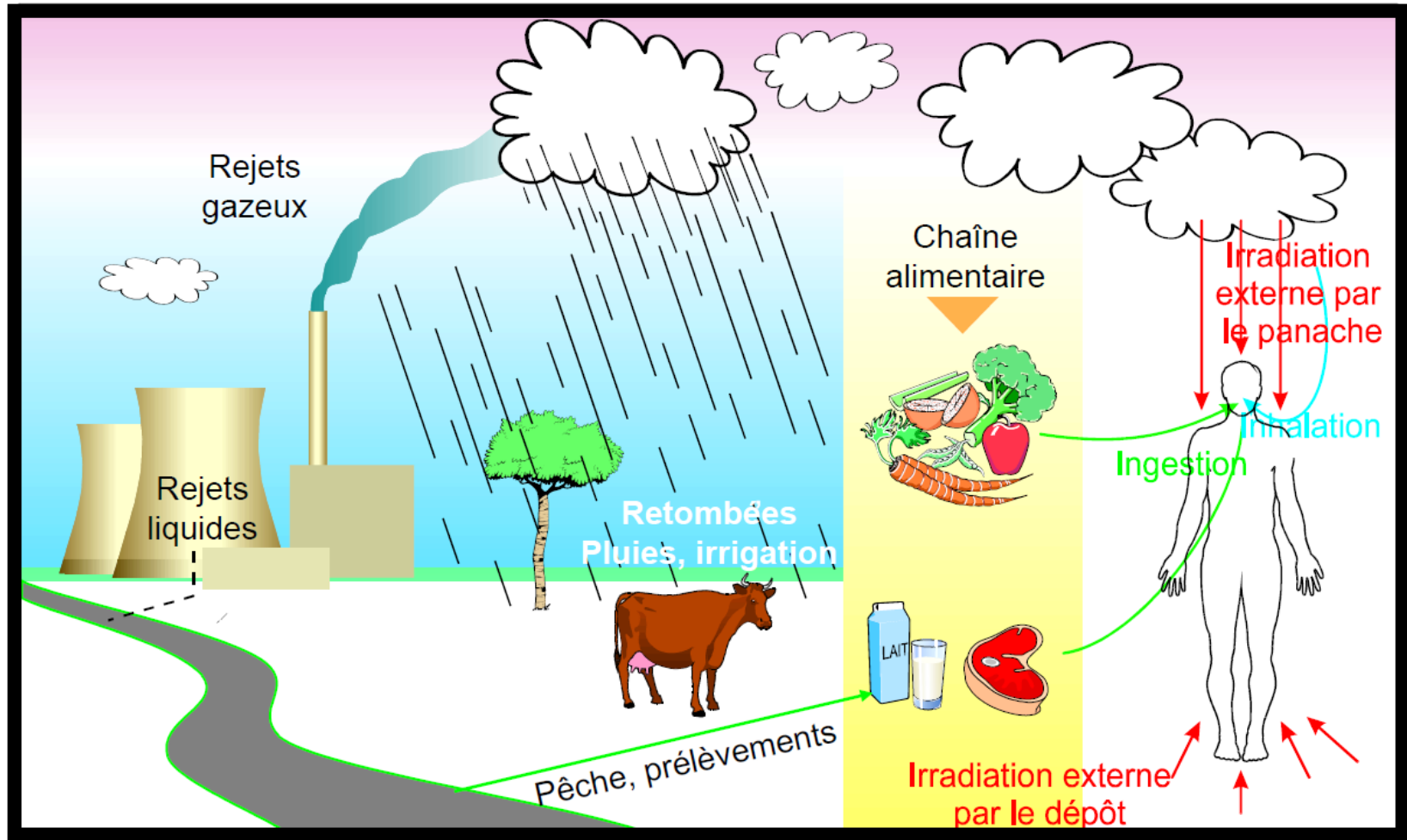
<u>Dispersion</u>	<u>Transferts</u>	<u>Utilisation</u>
Air Eau	Sols Végétaux Animaux	Alimentation Cadre de vie

Population

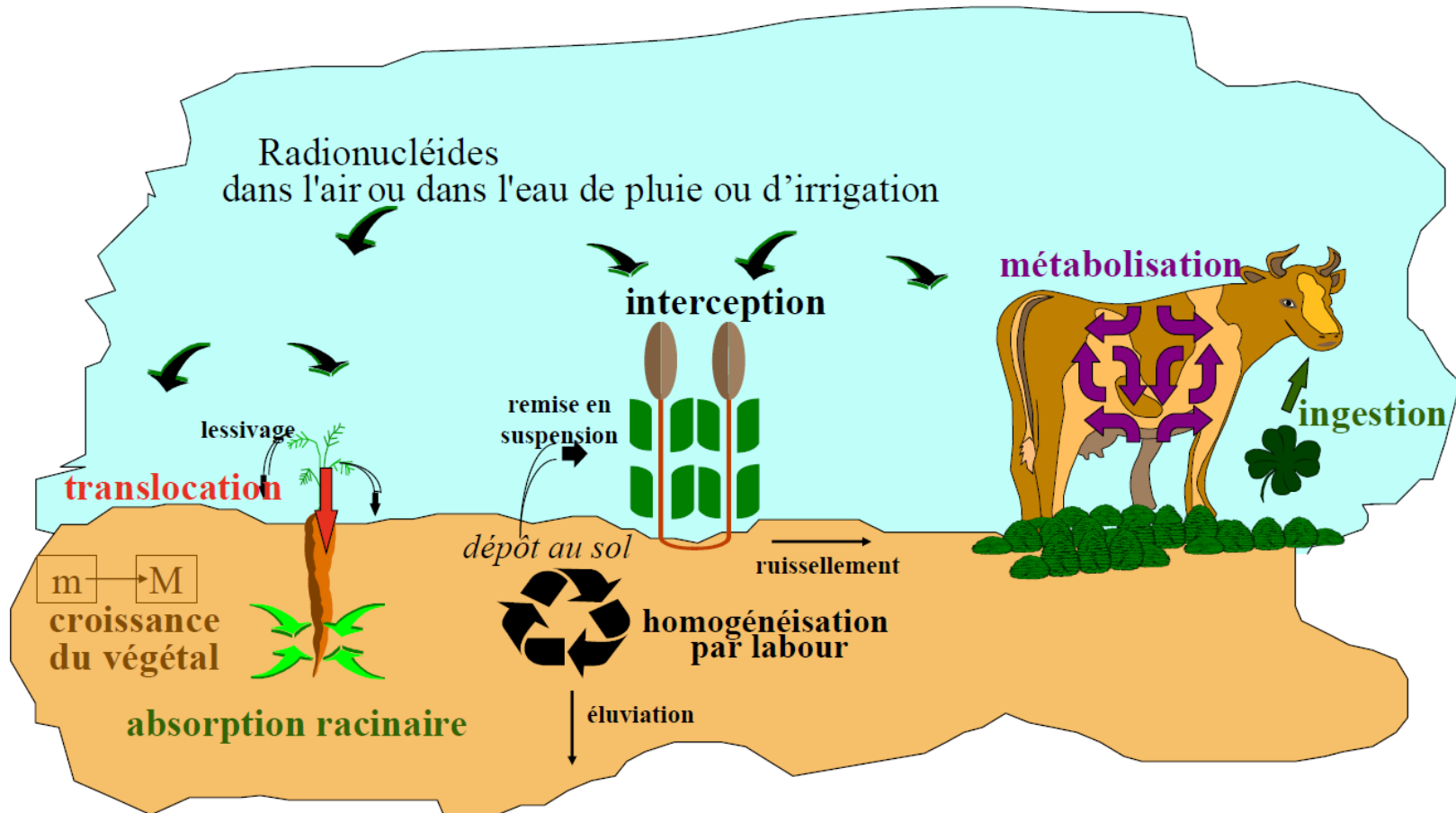
Expositions

Interne par ingestion
Externe au dépôt
Interne par inhalation

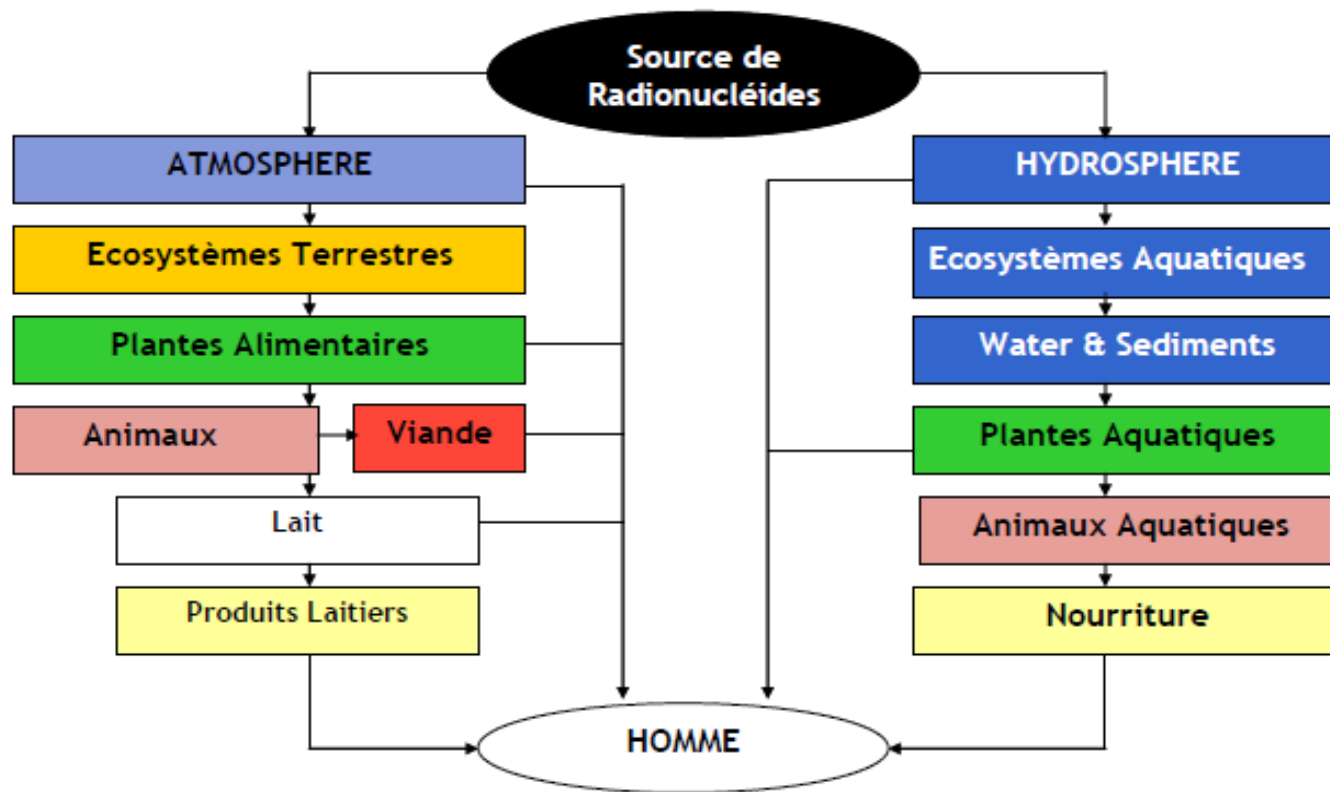
Les voies de transfert dans l'environnement et les voies d'atteinte à l'homme



Les principaux phénomènes de transfert dans la chaîne alimentaire terrestre

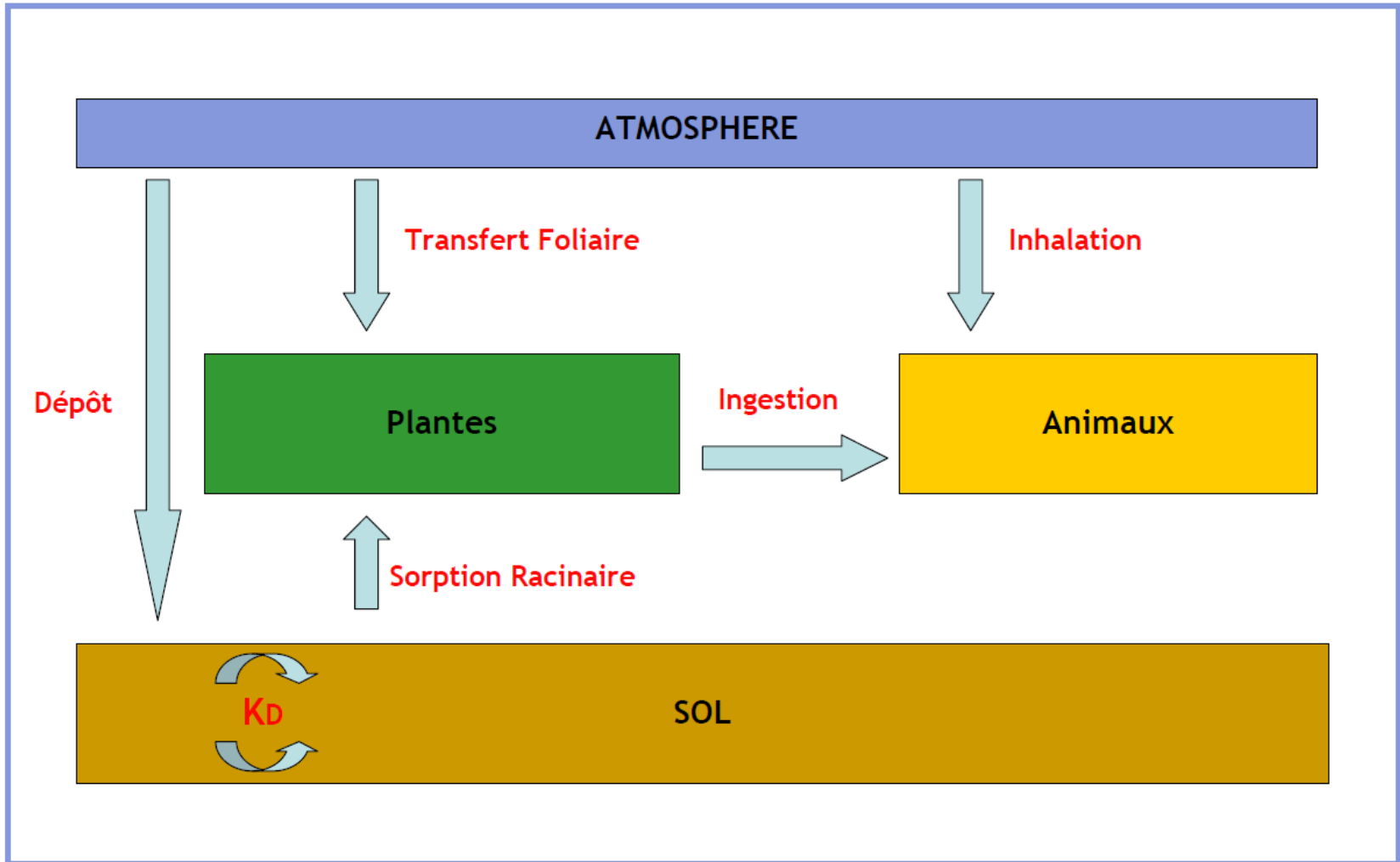


Chemin d'exposition physiologique



Les grandes voies de l'exposition indirecte de l'homme aux rayonnements

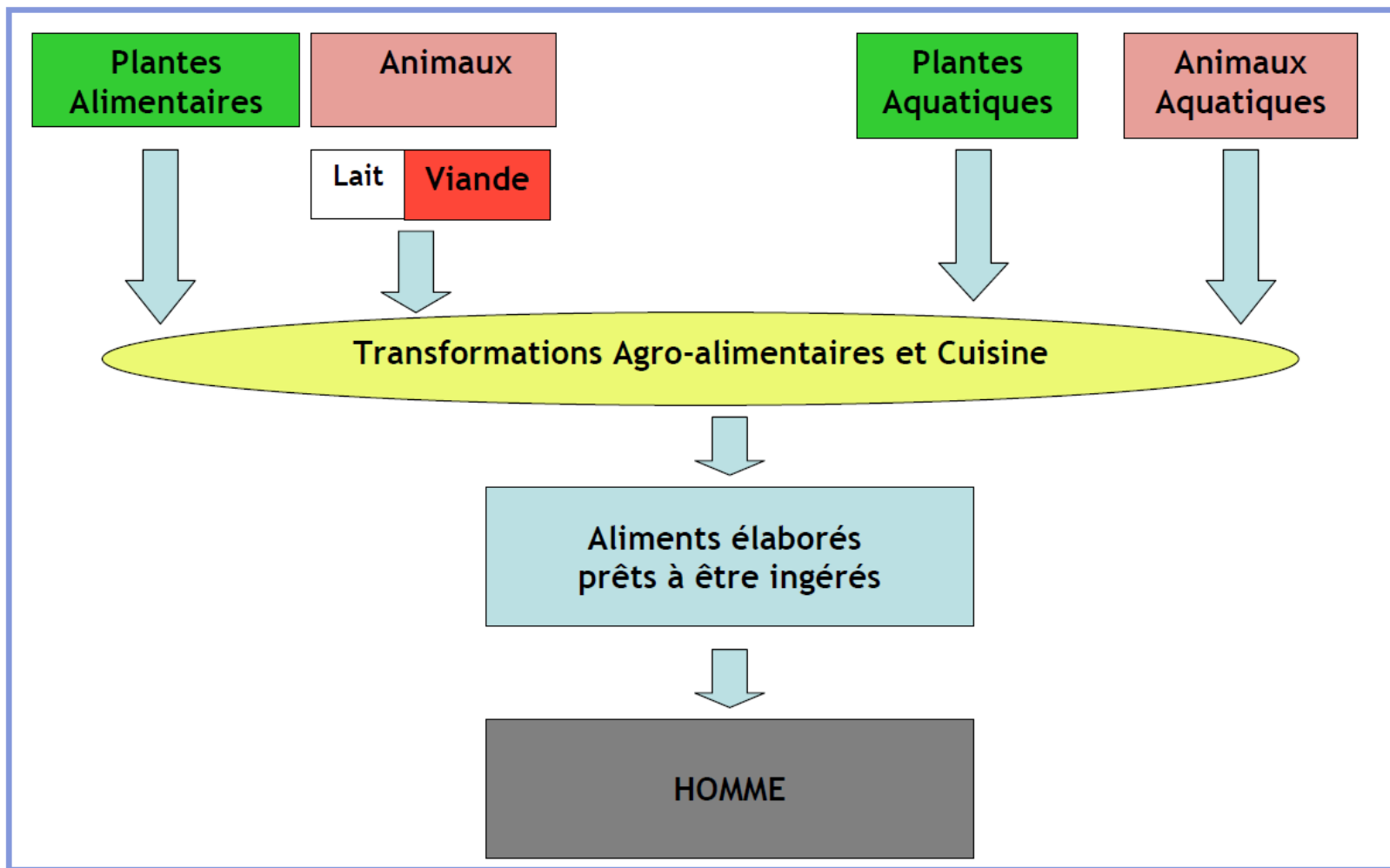
LES GRANDS AXES DE LA RADIOECOLOGIE



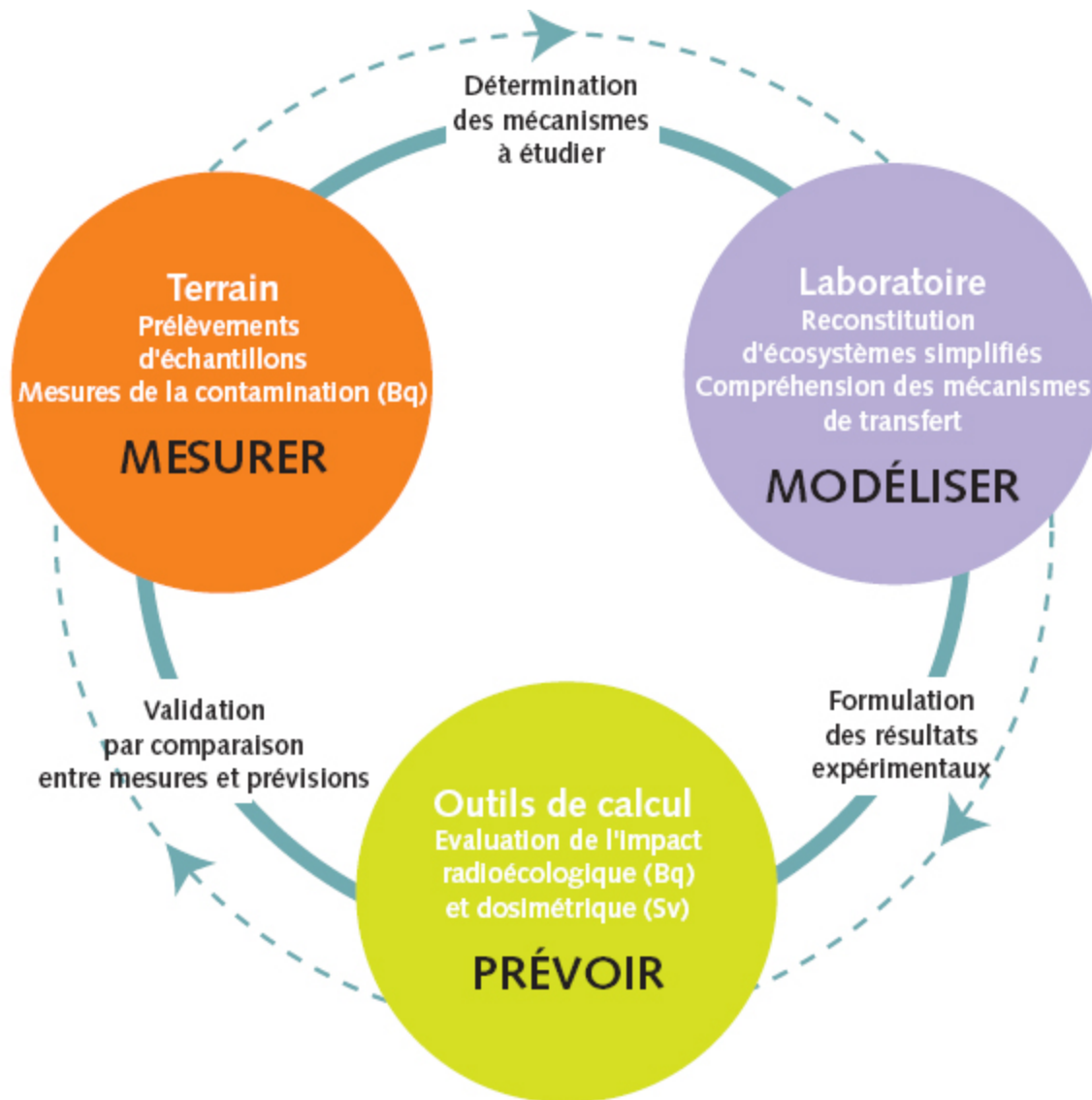
LES GRANDS AXES DE LA RADIOECOLOGIE



LES GRANDS AXES DE LA RADIOECOLOGIE



Les grandes voies d'étude de la radioécologie



La radioécologie marine

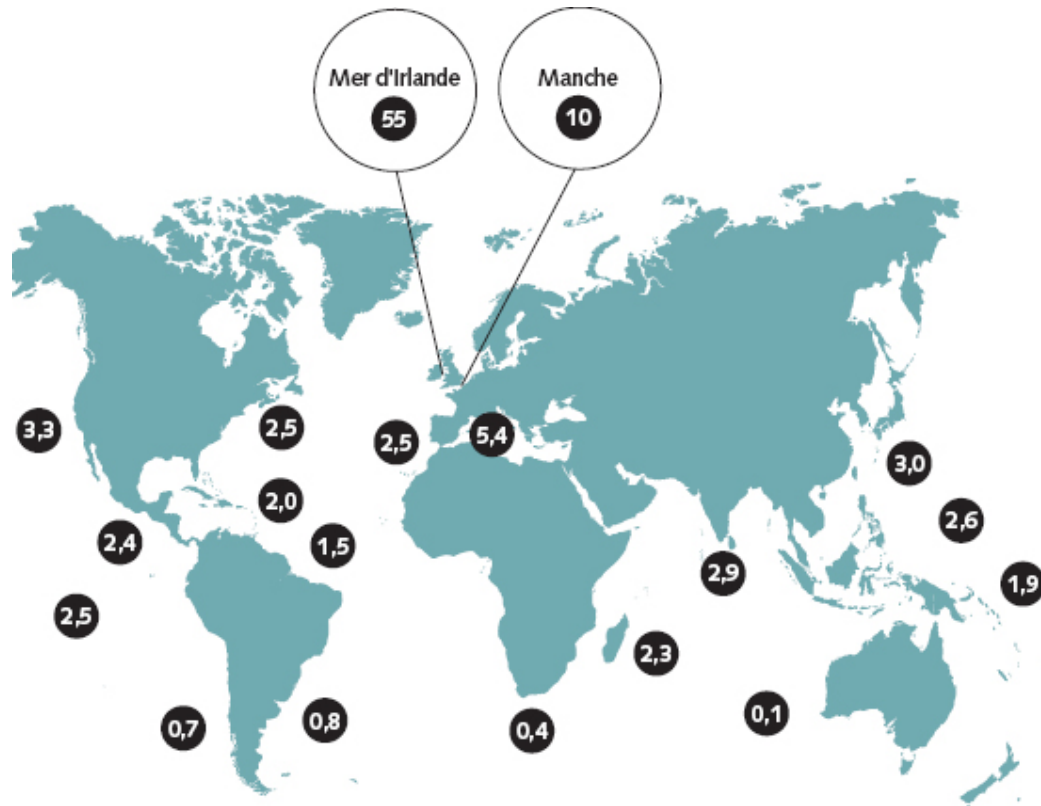
La radioécologie marine étudie l'évolution des niveaux de radioactivité en pleine mer et dans les zones littorales.

Elle permet d'effectuer des expertises sur les conséquences des rejets en mer des installations nucléaires.

La radioactivité naturelle de l'eau de mer est de l'ordre de 13 000 Bq/m³, essentiellement due au potassium 40.

S'y ajoute la radioactivité artificielle, dont le césium 137 est l'un des principaux éléments.

La radioécologie marine



Les océans sont contaminés de façon relativement homogène par les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires.

Les mers peu profondes et les estuaires subissent une contamination plus prononcée du fait des rejets des usines de traitement des combustibles irradiés de Sellafield (Grande-Bretagne) pour la mer d'Irlande et de La Hague (France) pour la Manche.

Ces rejets sont en nette diminution depuis plus de 10 ans.

La radioécologie marine

Transferts des radionucléides

Les radionucléides sont dispersés par les courants. Ils se fixent sur les particules en suspension dans l'eau qui décantent peu à peu vers le fond et sont stockés dans les sédiments, dont la radioactivité peut être de 100 à 10 millions de fois plus élevée que celle de l'eau de mer.

Les organismes marins peuvent, par des mécanismes physiologiques comme la filtration d'eau, accumuler certains radionucléides avec un facteur de concentration de 5 à 100 000 par rapport à l'eau de mer.

Les bio-indicateurs utilisés sont, par exemple, l'algue du genre fucus, l'huître, la moule, la coquille Saint-Jacques, le crabe ou le homard

Bio-indicateur:

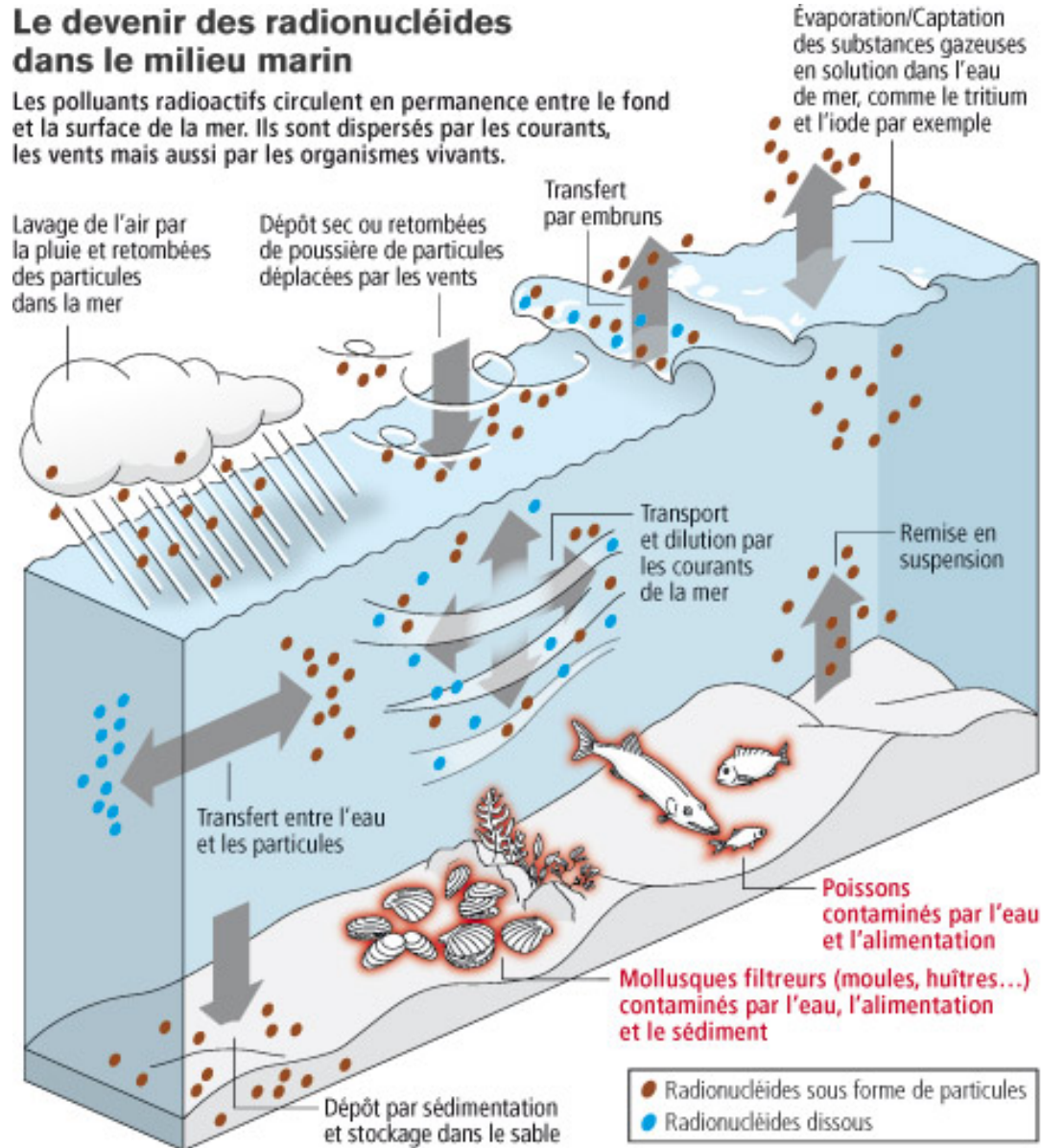
Organisme végétal ou animal qui fait l'objet de mesure permettant d'indiquer la présence ou les effets des polluants.

Les bio-indicateurs sont des outils d'évaluation de la qualité de l'environnement. 51

La radioécologie marine

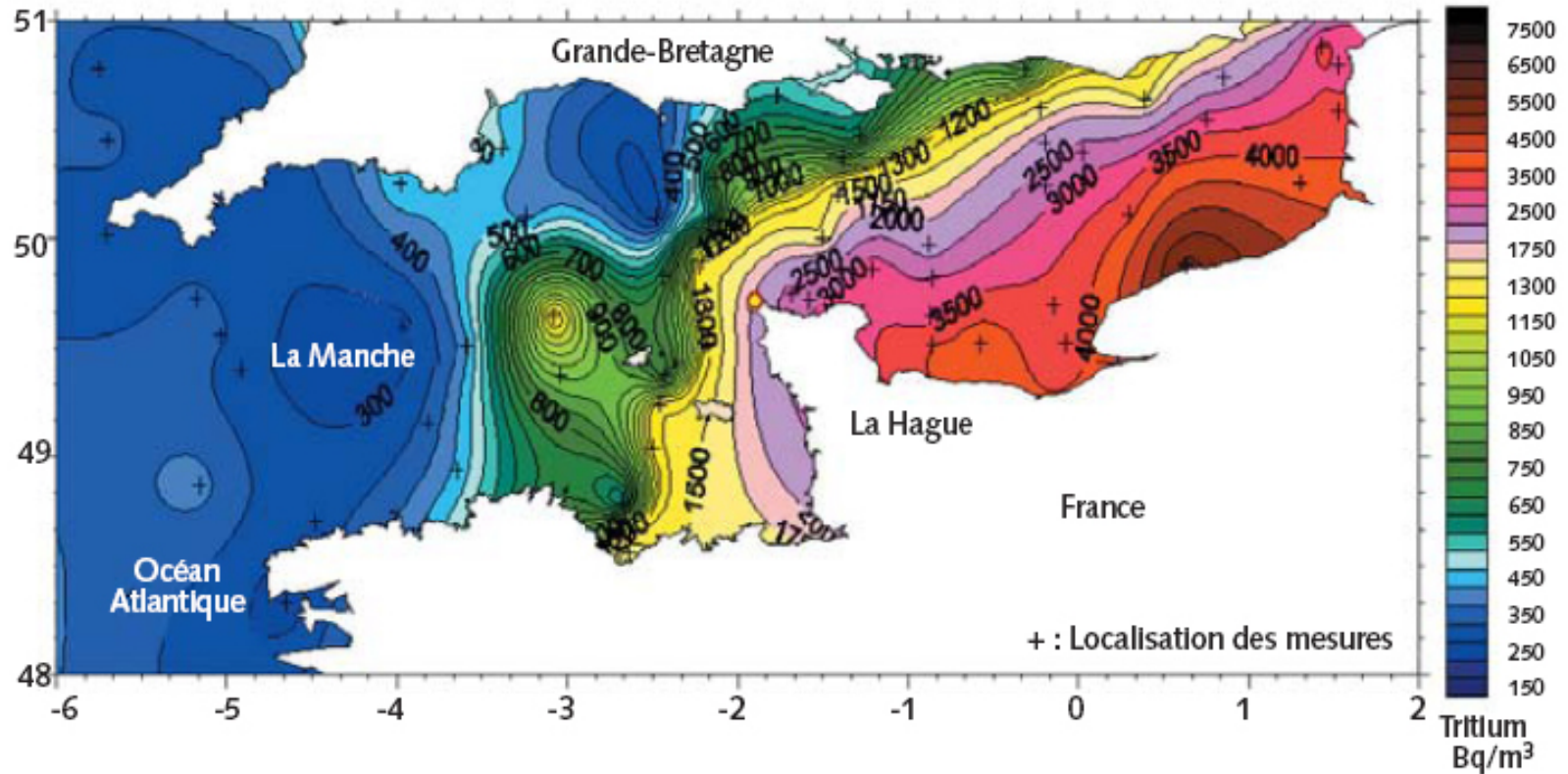
Le devenir des radionucléides dans le milieu marin

Les polluants radioactifs circulent en permanence entre le fond et la surface de la mer. Ils sont dispersés par les courants, les vents mais aussi par les organismes vivants.



Hervé Bouffly/IRSN - Source IRSN

La radioécologie marine

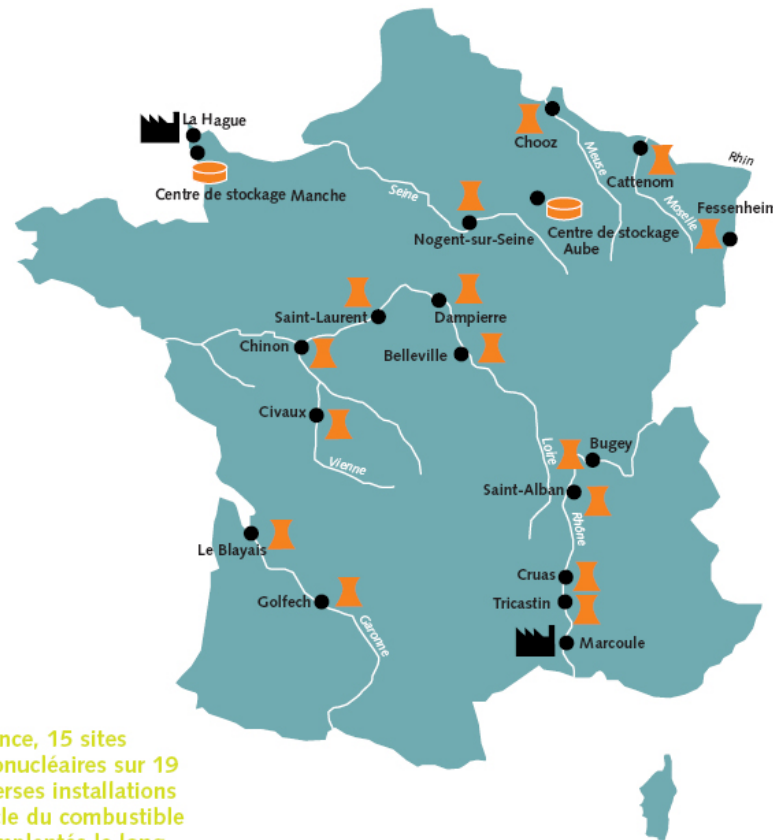


Certains radionucléides rejetés en mer constituent de remarquables outils pour les océanographes.




Par exemple, le suivi du tritium, l'un des radionucléides présents dans les rejets de l'usine de La Hague, permet de calculer que les eaux mettent de 110 à 152 jours pour aller de La Hague au Pas-de-Calais.

La radioécologie des eaux continentales

Les eaux douces, qui reçoivent les rejets liquides radioactifs des installations nucléaires et des laboratoires (centres de recherche, hôpitaux), constituent un ensemble d'écosystèmes étudié en radioécologie.



En France, 15 sites électronucléaires sur 19 et diverses installations du cycle du combustible sont implantés le long des fleuves et des rivières. Les autres sont au bord de la Manche et de la mer du Nord.

-  Centrales nucléaires EDF
-  Usine de traitement des combustibles irradiés
-  Centre de stockage de déchets radioactifs

La radioécologie des eaux continentales

Transferts des radionucléides

On observe les mêmes phénomènes de concentration de radionucléides que dans l'écosystème marin. Mais les facteurs de concentration dans les organismes vivants diffèrent entre eau douce et eau salée.

La présence de métaux lourds (zinc, plomb...) dans les cours d'eau modifie aussi l'intensité de fixation des radionucléides.

Les bio-indicateurs utilisés sont les mollusques comme la palourde asiatique et la moule zébrée, très abondantes, ainsi que les mousses aquatiques.



La contamination se fait par l'eau et la nourriture.

La décontamination est due à la désintégration physique des radionucléides et à leur élimination biologique.



La radioécologie terrestre

L'écosystème terrestre est complexe : les milieux (sol, eaux de surface, eaux souterraines), la topographie (plaine, montagne), la végétation (prairies, cultures, forêts), les chaînes alimentaires (végétaux, animaux) sont très variés

La contamination de l'écosystème terrestre est en général le résultat de dépôts atmosphériques.

Lors de l'accident de Tchernobyl, les masses d'air contaminées ont parcouru des milliers de kilomètres.

La radioécologie terrestre

Les radionucléides présents dans l'atmosphère se sont déposés peu à peu sous l'effet des turbulences du vent ; les dépôts ont été plus intenses par temps de pluie (1), à la rencontre d'un relief (2) ou d'une végétation haute (3)



1



2



3

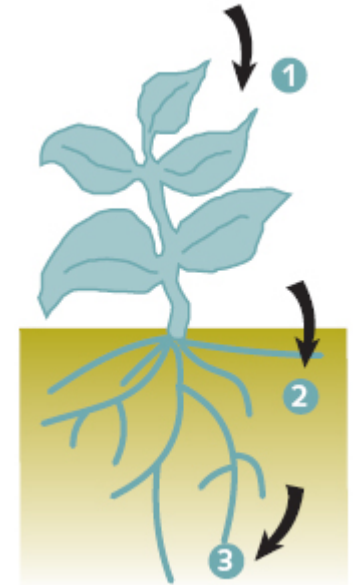
La radioécologie terrestre

Transferts des radionucléides

Les radionucléides déposés par les turbulences du vent ou les pluies contaminent directement les feuilles des végétaux.

Les radionucléides migrent ensuite dans le sol, où interviennent les transferts vers les racines.

Les principaux bio-indicateurs étudiés sont les mousses et les lichens.



La radioécologie terrestre

Certains animaux se contaminent par ingestion de végétaux, la chaîne alimentaire la plus courante étant : **herbe -> vache -> viande et lait.**



Pour une concentration constante de $0,037 \text{ Bq/m}^3$ d'iode 131 dans l'air et en considérant qu'une vache consomme en moyenne 11 kg d'herbe par jour, on retrouve 6,475 becquerels dans le litre de lait.

La radioécologie terrestre

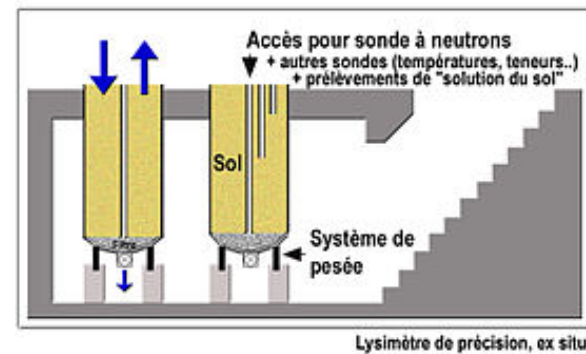
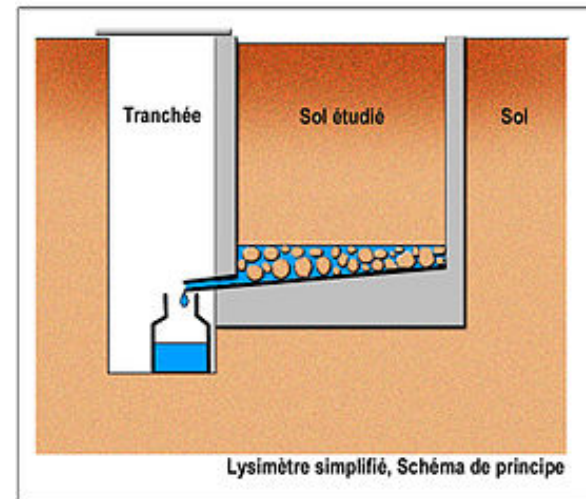
Une des expériences permettant d'étudier les transferts de radionucléides consiste à prélever sur un terrain un bloc de terre et à le placer en laboratoire, dans des conditions climatiques contrôlées.

On peut y pratiquer diverses cultures (blé, vigne, haricots...) qu'on peut contaminer à différents stades de la croissance.



La radioécologie terrestre

Stations expérimentales *in situ*: lysimètres



Les grandes voies d'étude de la radioécologie

