

Ecotoxicologie



Marc Girondot, Université Paris Saclay
marc.girondot@universite-paris-saclay.fr



Marc Girondot, Pr

- **Laboratoire Ecologie, Systématique, Evolution**
 - Université Paris-Saclay, CNRS et AgroParisTech

- Stratégies de conservation des tortues marines
- Adaptation des reptiles au changement climatique
- Evolution des tissus minéralisés
- Réponse des organismes aux pollutions dans les milieux naturels



Cours 1

- Qu'est-ce qu'une pollution, définition, milieux impactés
 - Hypothèses sous-jacentes : monde stable, nécessité d'un référentiel
- Typologie des polluants : chimique, physique, biologique
 - Polluants chimiques
 - Particules fines
 - Description des pollutions physiques et biologiques et de leur impact



Cours 2

- Bases du fonctionnement d'un écosystème, réseaux trophiques
- Transfert des polluants dans un réseau trophique
- Qualité d'un écosystème
- Espèces bioindicatrices



Cours 3

- Quelques effets populationnels des polluants chimiques
 - DDT
 - Métaux
 - Organochlorés
- Le problème des doses : Toutes les choses sont poison, et rien n'est sans poison ; seule la dose fait qu'une chose n'est pas poison - Paracelse
 - Relation dose effet
 - Hormèse
 - Effets non monotones
- Modèles statistiques appliqués aux effets : glm, glmm, p-value, ML, AIC, AICc, Akaike weight, Méthodes bayésiennes, BIC



Cours 4

- Effets des polluants sur la santé humaine
 - Ecotoxicologie – toxicologie
 - Effet aigu
- Les perturbateurs endocriniens
- Etude des cohortes
 - Analyse statistique de l'étude des cohortes – le problème de la quantité de données
- Les tests écotoxicologiques : comet, biomarqueurs + caractérisation chimique
- Sujets d'actualité
 - Glyphosate – Controverse CICR, agences nationales
 - Néonicotinoïdes – L'heure de gloire de la betterave

Toxicologie

La toxicologie est une discipline scientifique qui étudie les effets néfastes d'une source — molécule, radiation, nanomatériaux, etc. — sur des organismes ou des systèmes biologiques.





Toxicologie

Elle est à l'interface entre plusieurs disciplines — chimie, physiopathologie, pharmacocinétique, pharmacologie, médecine, etc. —, la toxicologie s'applique à un toxique ou une association comme un produit fini qui contient plusieurs constituants.

Elle s'intéresse à l'étiologie (origine) des toxiques et des intoxications, aux propriétés physiques et chimiques des toxiques, aux circonstances de contact avec l'organisme et au devenir du toxique dans l'organisme (administration, distribution, métabolisme, élimination) ; aux effets néfastes sur un organisme et à leurs mécanismes ; à la détection des toxiques (moyen, qualité, quantité) ; aux moyens pour combattre les toxiques (voies d'élimination, antidotes, traitement) ; aux méthodes de prévention, au diagnostic, au pronostic, à la surveillance médicale, etc.



Toxicologie de l'environnement

Etude des substances toxiques dans l'environnement et dans les populations et les individus exposés ainsi que les effets biologiques qui en résultent.

Le niveau d'organisation de la toxicologie est l'individu alors que celui de la toxicologie de l'environnement est l'environnement.



Environnement

L'environnement est « l'ensemble des éléments (biotiques ou abiotiques) qui entourent un individu ou une espèce et dont certains contribuent directement à subvenir à ses besoins », ou encore comme « l'ensemble des conditions naturelles (physiques, chimiques, biologiques) et culturelles (sociologiques) susceptibles d'agir sur les organismes vivants et les activités humaines »



air



sol



eau



Ecotoxicologie

Le terme inventé par Truhaut (1969) qui la considère comme une extension naturelle de la toxicologie appliquée aux effets sur les écosystèmes.

Plus récemment Newman a défini l'écotoxicologie comme *la science des contaminants dans la biosphère et leurs effets* sur les constituants de la biosphère en y incluant l'homme



ECOTOXICOLOGIE

Par définition, c'est une science pluridisciplinaire. Elle étudie au sein des écosystèmes les interactions entre les espèces et le milieu et fait appel à l'écologie. Elle étudie les effets des polluants sur les organismes vivants et fait appel à la toxicologie. Enfin, elle étudie les polluants et leur dispersion dans le milieu et fait appel à la chimie.



Définitions

Environnement =

L'environnement est « l'ensemble des éléments (biotiques ou abiotiques) qui entourent un individu ou une espèce et dont certains contribuent directement à subvenir à ses besoins »

Ecologie =

Science des relations des organismes vivants avec leur milieu de vie



Partie biologique des sciences de l'environnement

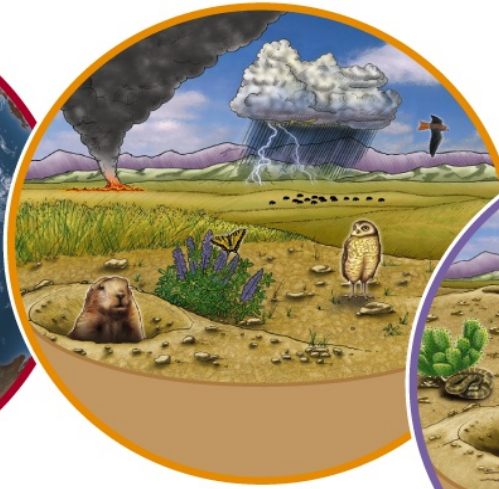


L'écologie

- Ecologie : des mots grecs "Oikos", maison / habitat, et "logos", discours / étude
- Ecologie : Science qui étudie les organismes (leur distribution et leur abondance), toutes les interactions qu'ils ont avec leur milieu ainsi que les conséquences de ces interactions.
- Le niveau d'organisation et d'interaction considéré peut être très variable



Biosphère



Ecosystèmes



Communautés



Populations



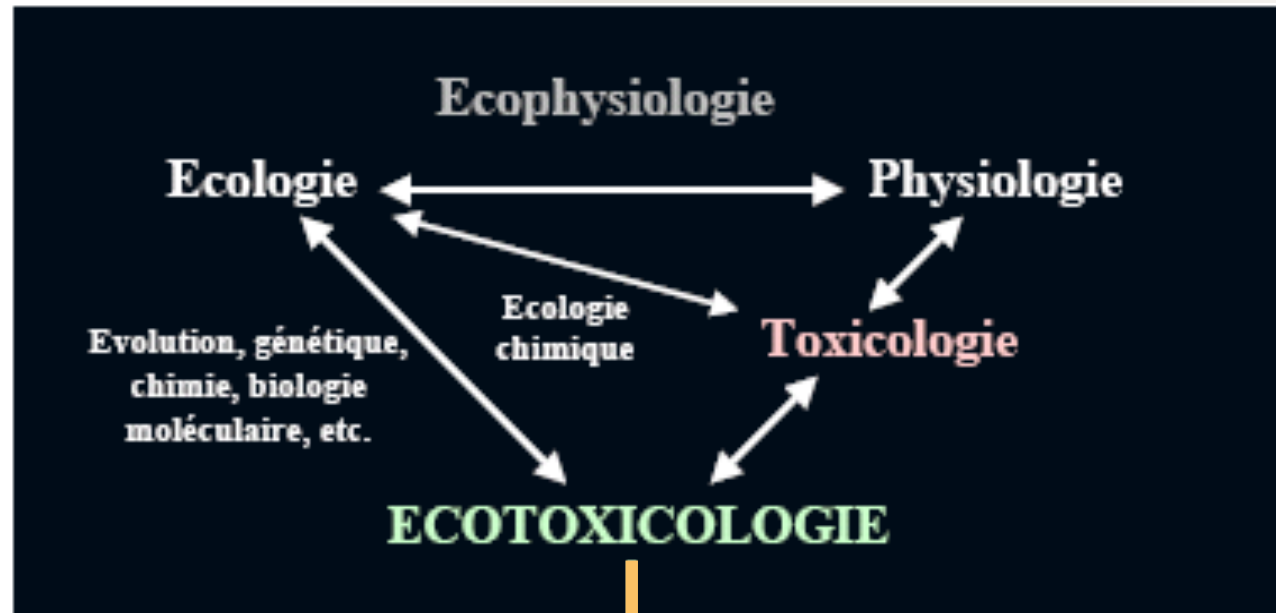
Individus

Qu'est-ce qu'un écosystème?

- **Définition** : Un écosystème est l'ensemble formé par une association d'une communauté d'êtres vivants (ou biocénose) et son environnement géologique, édaphique (sol), hydrologique, climatique, etc. (le biotope).
- Les éléments constituant un écosystème développent un réseau d'échange d'énergie et de matière.
- Le terme fut forgé par Arthur George Tansley en 1935 pour désigner l'unité de base de la nature.



Arthur George Tansley 1871-1955



Évaluation de la qualité des milieux

Évaluation du risque

Gestion environnement



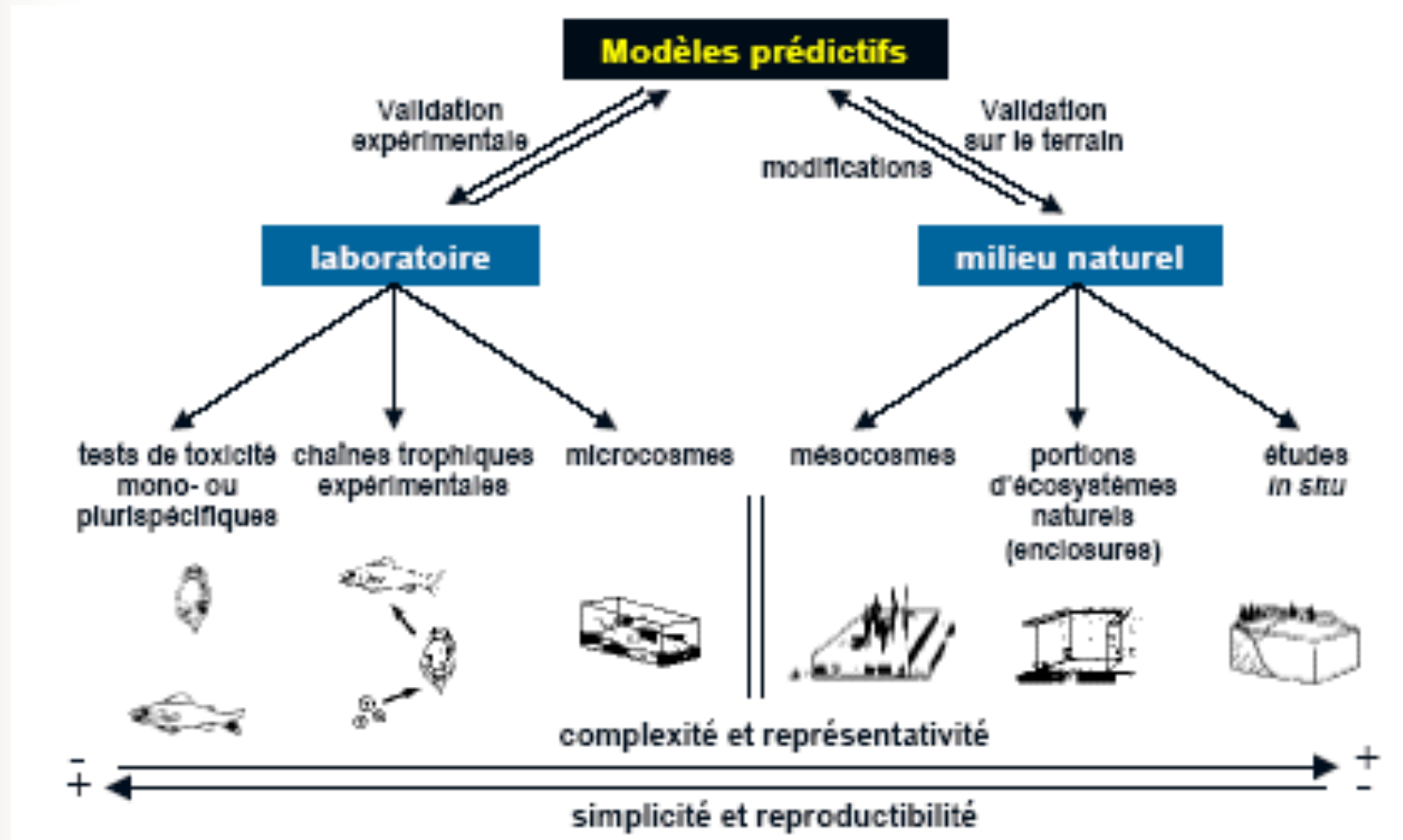
Spécificité de l'écotoxicologie

Etude des effets directs (ou indirects) et différés des polluants toxiques sur les individus, les populations et les biocénoses

Champ et finalité de l'écotoxicologie

- Etude des polluants directement ou indirectement toxiques, excluant d'importantes catégories dont les effets écologiques ne résultent pas de phénomène de toxicité (pollution par les gaz à effet de serre, pollution thermique des eaux).
- Prévision des impacts potentiel de la pollution d'un écosystème donné ou d'une fraction de l'écosystème, individu, population communauté, par un produit chimique nouveau ou par un effluent complexe d'origine industrielle.

Les outils de l'écotoxicologie






Pollution

« La pollution est une **modification défavorable du milieu naturel** qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de **l'action humaine**, au travers des effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux de l'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physicochimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et en produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède ou les possibilités récréatives du milieu »

« constitue une pollution toute modification du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la concentration des constituants chimiques naturels ou encore l'introduction dans la biosphère de substances chimiques artificielles produites par l'homme »

Dictionnaire encyclopédique des pollutions (Ramade, 1992)



- 
- Selon Moriarty (1983), le terme polluant se rapporte aux substances présentes dans l'environnement, en partie à cause des activités humaines et qui ont des effets délétères sur les organismes vivants.
 - Selon Bang (1980), la pollution est essentiellement un jugement de valeur sur ce que chacun souhaite trouver dans l'environnement ; ce jugement étant ou non étayé par des données scientifiques et implique toujours un choix.

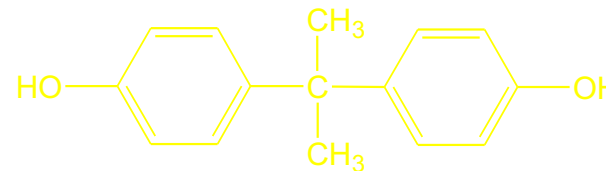
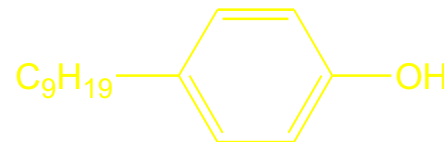
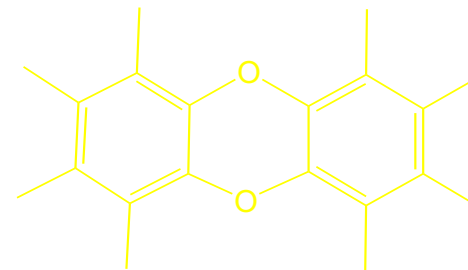
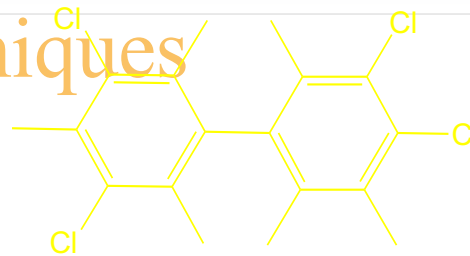


Les catégories de pollution

- Pollutions chimiques
 - ...
- Pollutions physiques
 - Radiations
 - Thermique
 - Lumineuse
 - Sonore
- Pollutions biologiques
 - Invasions biologiques

Principaux polluants chimiques

- Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)
- Les Polychlorobiphényle (PCB)
- Les Dioxines
- Pesticides
- Métaux lourds
- Plastifiants
- Surfactants non ioniques
- Dérivés halogénés
- Médicaments (PNSE)
- ...





Directive REACH

- Enregistrement, évaluation, autorisation et restriction des substances chimiques — en anglais : Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals (REACH) — est un règlement du Parlement européen et du Conseil de l'Union européenne, adopté le 18 décembre 2006, qui modernise la législation européenne en matière de substances chimiques, et met en place un système intégré unique d'enregistrement, d'évaluation et d'autorisation des substances chimiques dans l'Union européenne.
- Au 31 mai 2018, plus de 20 000 substances chimiques sont connues et leurs risques potentiels établis... elles sont des intervenants potentiels pour les études écotoxicologiques !

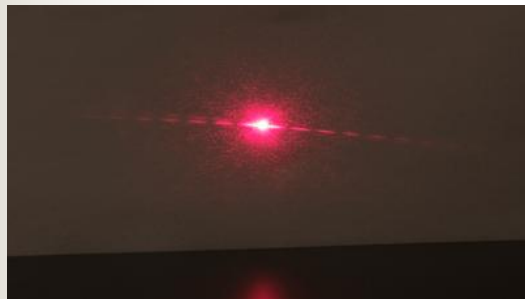


Les matières particulaires en suspension

- Les matières particulaires ou PM (acronyme de Particulate Matter en anglais) sont les particules en suspension dans l'atmosphère terrestre.
- Selon la taille des particules (diamètre aérodynamique ou « diamètre aéraulique »), on distingue:
 - PM₁₀ particules en suspension dans l'air, d'un diamètre aérodynamique (ou diamètre aéraulique) inférieur à 10 micromètres.
 - PM_{2,5} dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres, appelées « particules fines »
 - PM_{1,0} dont le diamètre est inférieur à 1,0 micromètre, appelées « particules très fines »
 - PM_{0,1} dont le diamètre est inférieur à 0,1 micromètre, appelées « particules ultrafines » ou « nanoparticules »

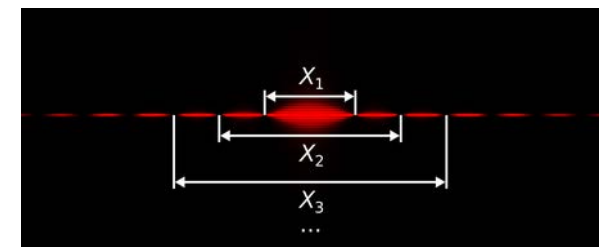
Comment sont mesurées les tailles

- La métrologie des « PM » (anglais : Particulate Matter) fait appel dans le cas de la surveillance de la qualité de l'air à différentes méthodes :
 - la référence métrologique est la gravimétrie par filtration, mais qui a l'inconvénient d'être une méthode discontinue ;
 - Des micro-balances à quartz permettent de déterminer les « PM » en continu ;
 - Des capteurs à diffraction laser permettent une évaluation par comptage optique moyennant une erreur qui peut être importante liée à la forme des particules.



Motif de diffraction

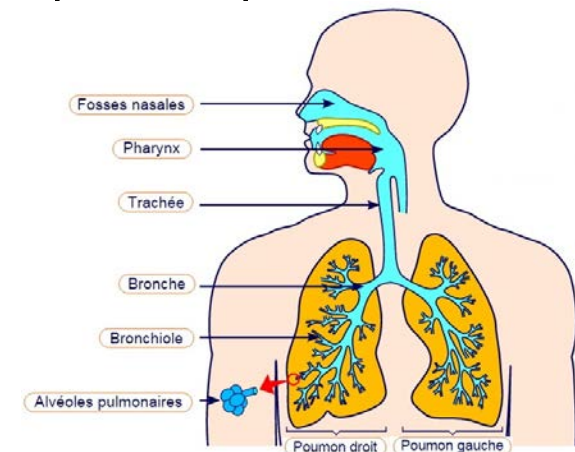
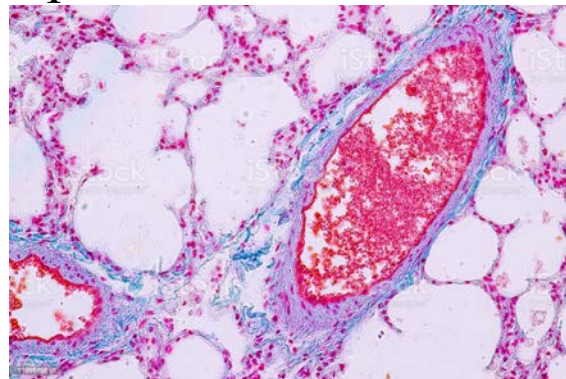
$$d = \frac{2n\lambda L}{X_n}$$



avec λ la longueur d'onde du laser et L la distance entre le cheveu et l'écran. d est le diamètre de la particule.

Pollution physique ou chimique ?

- les particules d'un diamètre aérodynamique supérieur à 10 micromètres sont retenues par les voies aériennes supérieures (nez, bouche) ;
- les PM_{10} , particules dites « respirables », incluent les particules fines, très fines et ultrafines et peuvent pénétrer dans les bronches ;
- les $PM_{2,5}$ incluent les particules très fines et ultrafines et pénètrent dans les alvéoles pulmonaires ;
- les $PM_{1,0}$ incluent les particules ultrafines et peuvent passer la barrière alvéolo-capillaire.





Pollution chimique ou physique ?

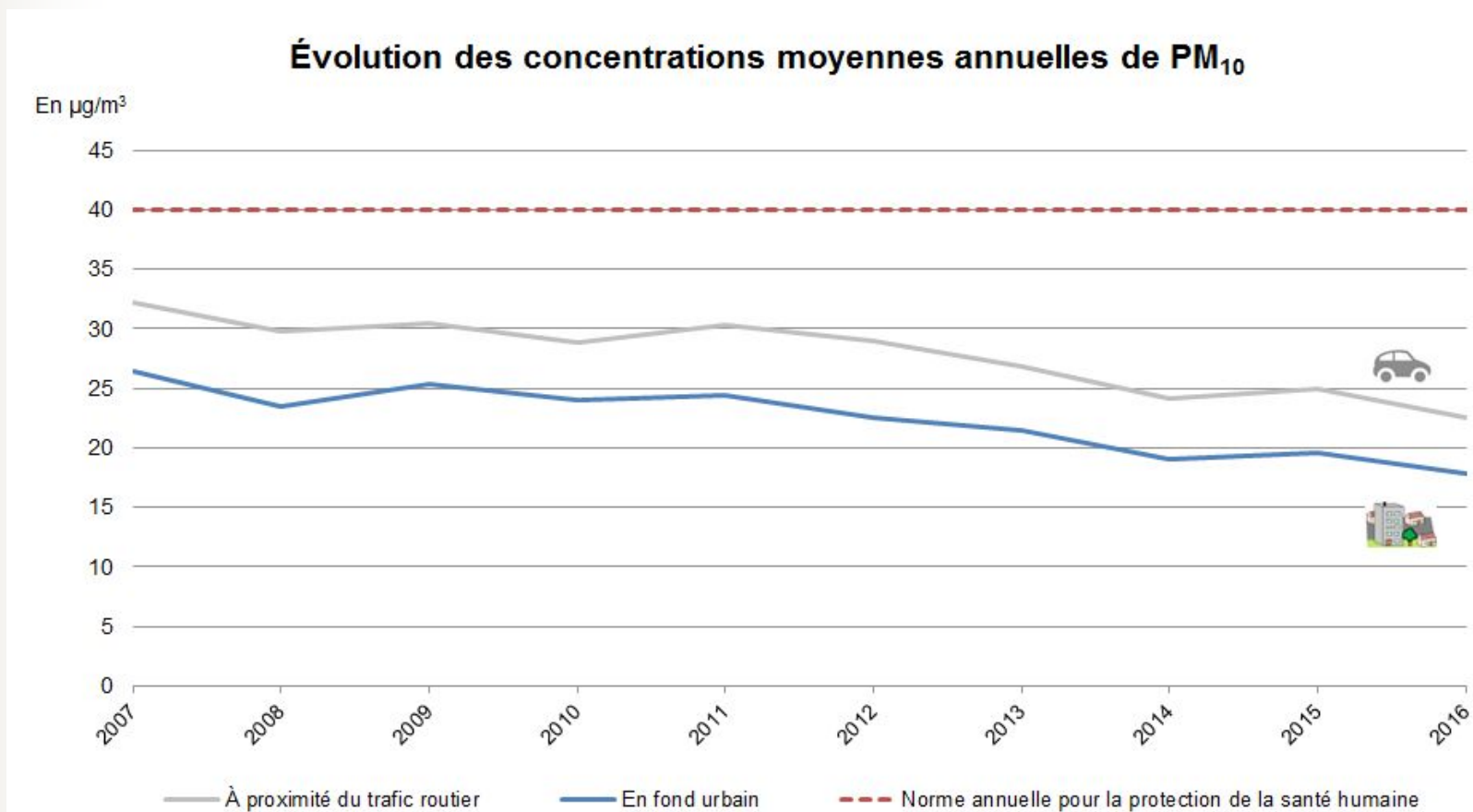
- Les particules ont des compositions chimiques différentes selon leur origine. Elles sont généralement composées de :
 - sels sous la forme nitrates, sulfates, carbonates, chlorures, etc. ;
 - composés carbonés organiques (HAP, oxydes, composés organiques condensables, etc.) (en anglais organic carbon notés OC) ;
 - des éléments traces tels que métaux lourds, etc. ;
 - carbone suie (en anglais black carbon, noté BC) lié aux combustions incomplètes de combustibles fossiles et de la biomasse.

Origine des PM selon les combustibles (% massique)

Sous-secteur	PM _{2,5}	PM _{1,0}
Bois	45,2	60,8
Gazole et GNR	16,0	20,5
Fioul domestique	1,7	2,3
Charbon	2,3	2,2
Total	65,1	85,8

- La part des PM 2,5 ou 1,0 du chauffage au bois est immense dans la proportion des modes de chauffage.
- En Île de France, il est interdit de faire du feu en foyer ouvert comme chauffage principal. Les foyers fermés sont moins émetteurs de PM lorsqu'ils sont neufs et bien réglés.
 - Question: Faut-il donner des subventions pour l'achat d'insert (foyer fermé) dans le cadre de la lutte contre l'augmentation du CO₂ ?

Evolution temporelle



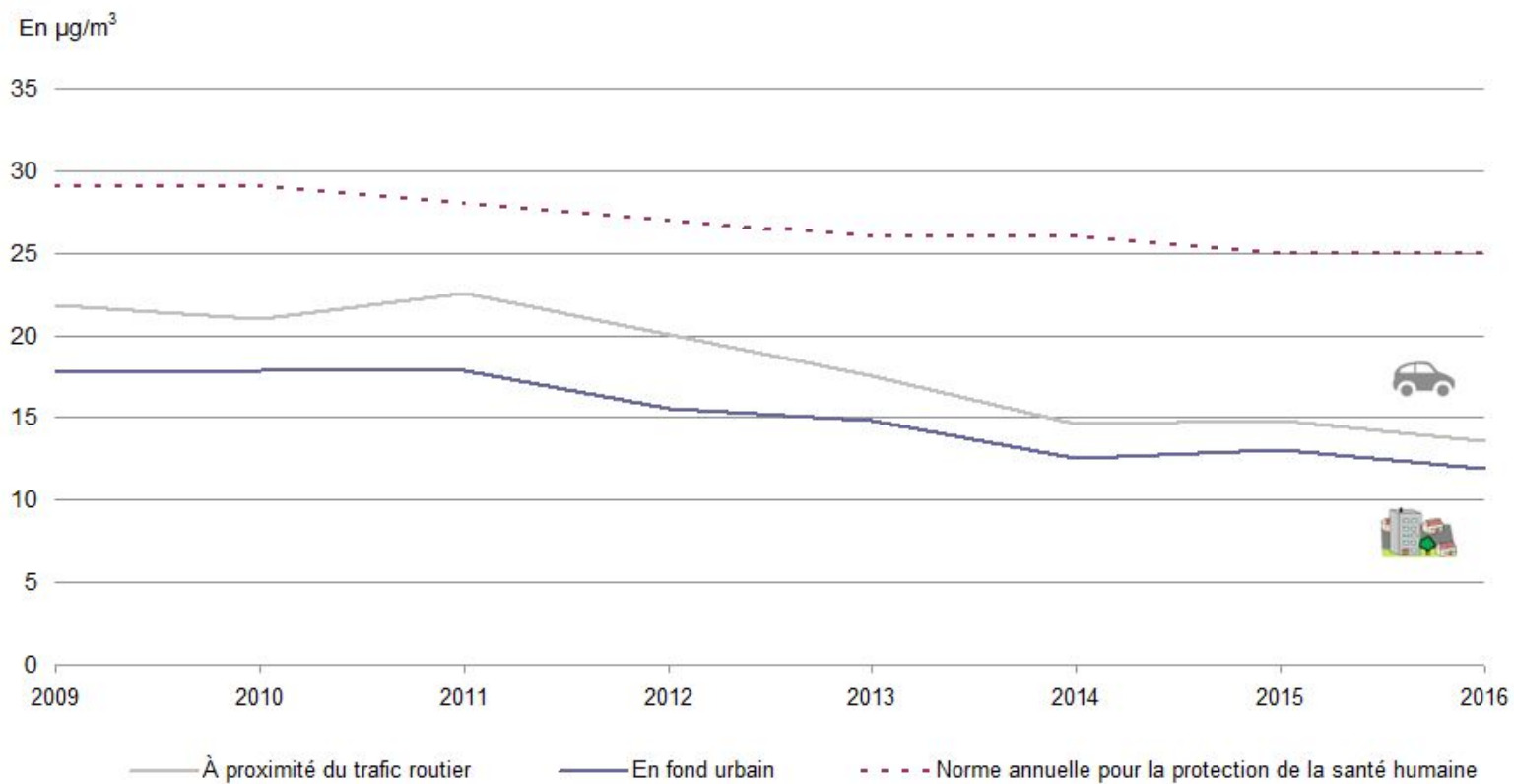
Note : Une modification des modalités de mesure des PM₁₀ est intervenue au 1^{er} janvier 2007 et ne permet pas de comparer les années 2007-2016 avec les années précédentes.

Champ : France métropolitaine et DOM.

Source : Géod'Air, juillet 2017

Evolution temporelle

Évolution des concentrations moyennes annuelles de PM_{2,5}

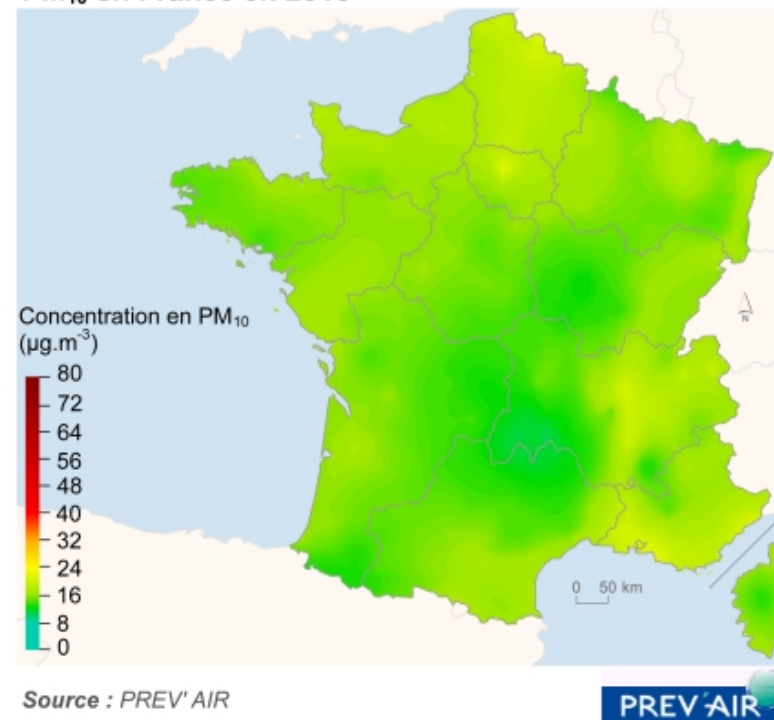


Champ : France métropolitaine et DOM.

Source : Géod'Air, juillet 2017

Hétérogénéité spatiale

Les concentrations moyennes annuelles de fond en PM₁₀ en France en 2016



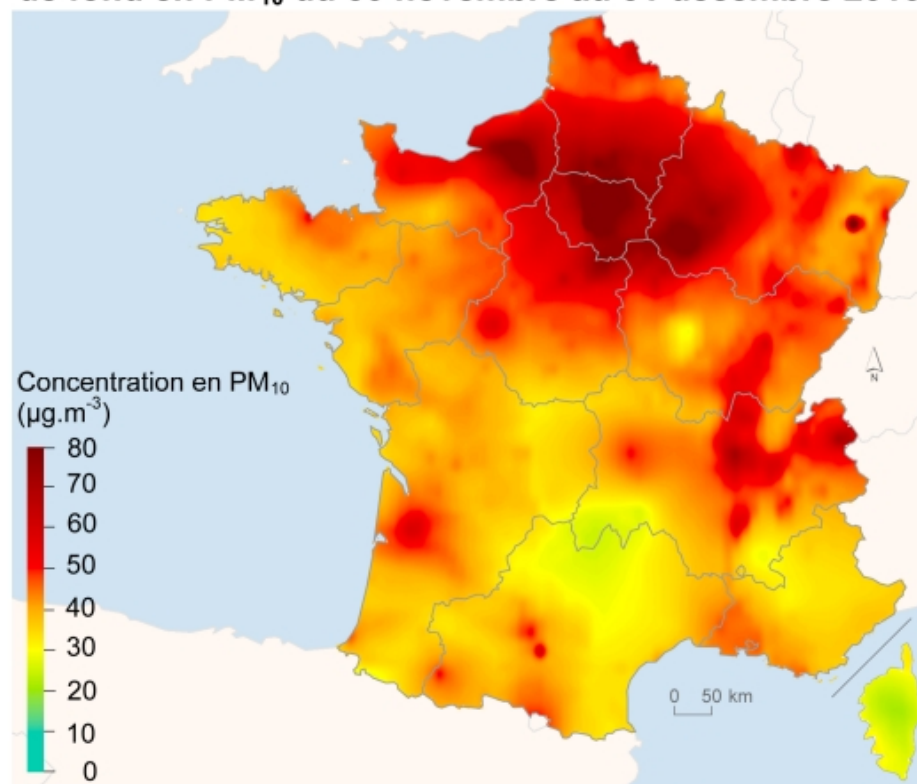
Source : PREVAIR

Note : norme annuelle pour la protection de la santé humaine : 40 µg/m³ ; cette carte résulte de la combinaison de résultats de simulation de modèle de qualité de l'air et d'observations des Associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (Aasqa) issues de la base de données nationale Géod'Air. Elle montre la répartition spatiale en situation de fond des concentrations moyennes annuelles en PM₁₀ mais n'est pas suffisamment précise pour faire apparaître des dépassements locaux de la norme annuelle pour la protection de la santé. Des cartes à l'échelle urbaine représentant les situations d'exposition au trafic sont réalisées par les Aasqa dans les grandes agglomérations.

Source : PREVAIR

Hétérogénéité spatiale

Maximum des concentrations moyennes journalières de fond en PM₁₀ du 30 novembre au 31 décembre 2016



Source : PREV' AIR



Source : PREV' AIR

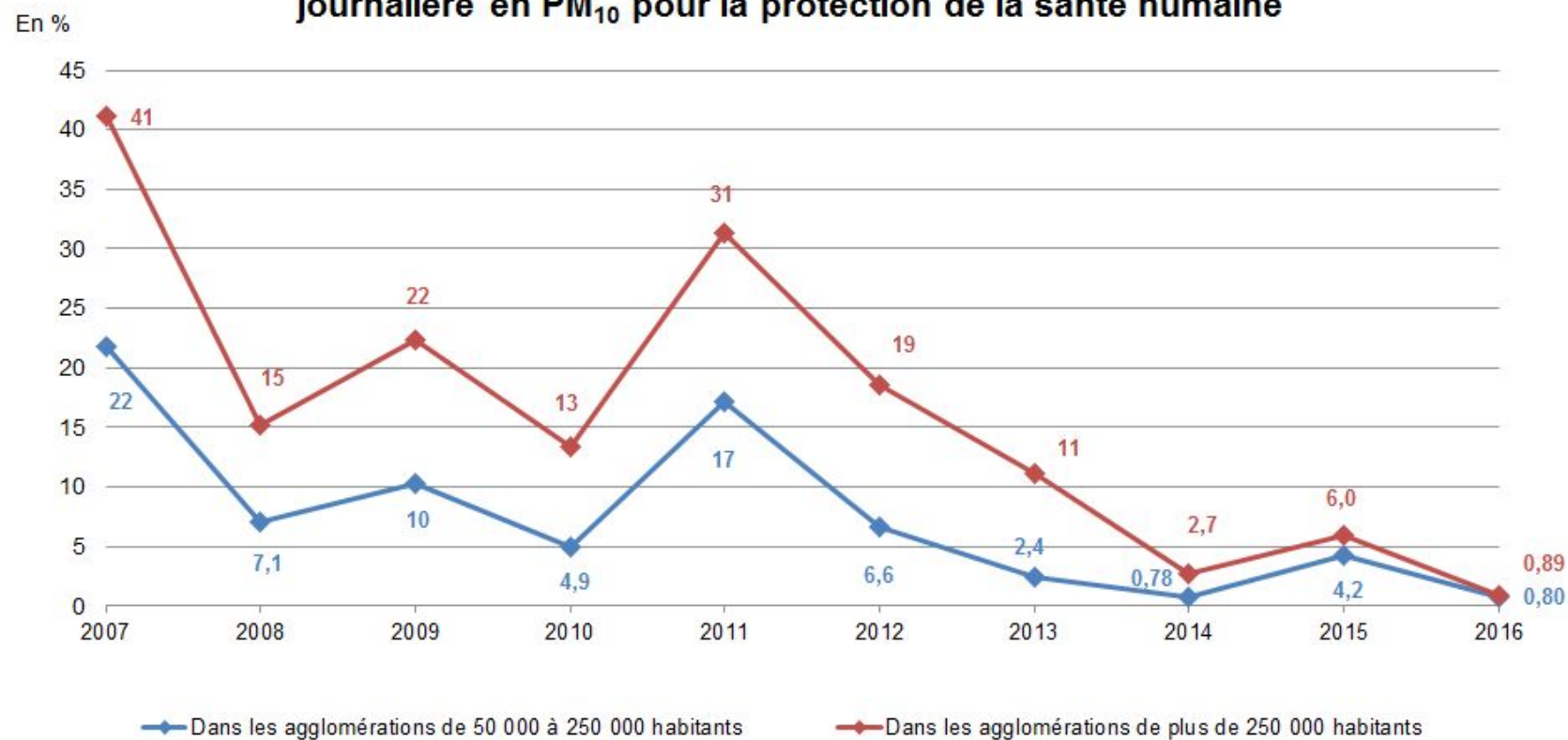


Concentration de fond

- Plan Particules 2010: « Il s'agit bien d'actions ayant pour objectif principal la réduction de la pollution de fond par les particules, de manière quasi-permanente, et pas seulement la seule prévention des pics de pollution. »
- Santé publique France 2018: les stations de « fond » : il s'agit de stations de mesure éloignées de sources localisées de pollution et qui permettent de rendre compte d'une mesure de la qualité de l'air globale en milieu urbain et rural influencée par l'ensemble des sources présentes sur la zone d'étude.
- La concentration de fond est celle qui décrit la pollution dans une région sans prendre en compte des événements temporeux exceptionnels.

Hétérogénéité spatiale et temporelle

Évolution du pourcentage de stations ne respectant pas la norme journalière en PM_{10} pour la protection de la santé humaine



Note : norme journalière en PM_{10} pour la protection de la santé humaine : $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à ne pas dépasser plus de 35 jours par année civile.

Champ : France métropolitaine et DOM.

Source : Géod'Air, juillet 2017. Traitements : SDES, 2017



Réglementation

- En matière de qualité de l'air, trois niveaux de réglementations imbriqués peuvent être distingués (européen, national et local). L'ensemble de ces réglementations a pour principales finalités :
 - L'évaluation de l'exposition de la population et de la végétation à la pollution atmosphérique.
 - L'évaluation des actions entreprises par les différentes autorités dans le but de limiter cette pollution.
 - L'information sur la qualité de l'air.



Réglementation

- La Directive 2008/50/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 mai 2008 est celle qui régit les émissions des particules fines. Elle s'appelle la directive pour la qualité de l'air ambiant et un air pur pour l'Europe. Elle est transposée dans la réglementation française.
- Les critères nationaux de qualité de l'air sont définis dans le Code de l'environnement, articles R221-1 à R221-3.
- L'arrêté du 19 avril 2017 est relatif au dispositif national de surveillance de la qualité de l'air ambiant. Cet arrêté abroge l'arrêté du 21 octobre 2010 relatif aux modalités de surveillance de la qualité de l'air et à l'information du public.

Réglementation pour les PM₁₀

Polluants	Valeurs limites	Objectifs de qualité	Seuil de recommandation et d'information	Seuils d'alerte
PM ₁₀	<p>En moyenne annuelle : depuis le 01/01/05 : 40 µg/m³.</p> <p>En moyenne journalière : depuis le 01/01/2005 : 50 µg/m³ à ne pas dépasser plus de 35 jours par an.</p>	<p>En moyenne annuelle :30 µg/m³.</p>	<p>En moyenne journalière :50 µg/m³.</p>	<p>En moyenne journalière :80 µg/m³.</p>



Effet sur la santé

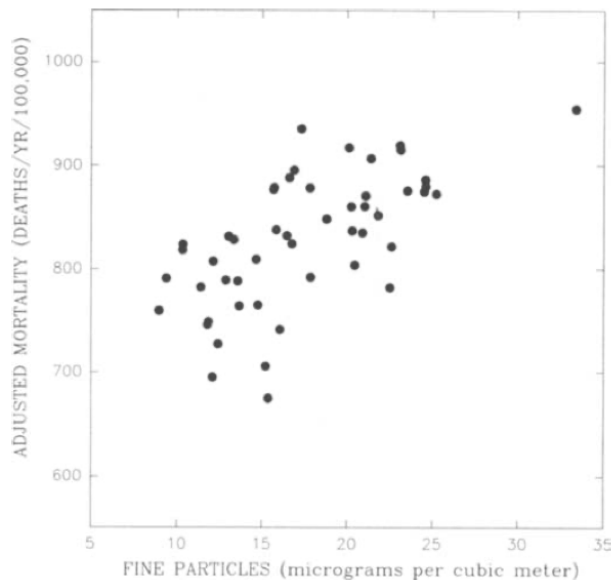
- Les PM_{1.0} (particules ultrafines, nanoparticules) peuvent franchir les barrières cellulaires et certaines (métalliques ou carbonées notamment) présentent une toxicité cellulaire.
- Ces particules présentent en outre une forme de toxicité liée à leur très petite taille, indépendante de la toxicité chimique ou radiologique intrinsèque de la molécule ou du composé chimique.
- Les PM sont — dans leur ensemble — désormais classées cancérigènes pour l'homme (groupe 1) par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), et leur inhalation cause ou aggrave divers troubles cardiovasculaires dont l'infarctus du myocarde, l'accident vasculaire cérébral et l'insuffisance cardiaque.
- L'exposition chronique aux PM amplifie ce risque et renforce l'apparition d'affections cardiométaboliques chroniques (par exemple, obésité, diabète de type 2 et hypertension).

- Groupe 1 : agent cancérigène (parfois appelé cancérigène avéré ou cancérigène certain).

La classification du CIRC indique la force des indications scientifiques disponibles quant à la cancérigénicité d'une substance. Il ne donne aucune indication sur le niveau de risque associé à l'exposition en question. Ainsi, si deux "agents" sont classés dans le même groupe, cela signifie que nous pouvons dire avec le même degré de certitude que [ces deux agents] peuvent provoquer le cancer, mais l'on ne peut pas dire à quel point chaque agent est dangereux ou à quelle dose il faudrait y être exposé pour que ces "agents" provoquent un cancer.

Effet sur la santé

- La pollution particulaire est l'un des prédicteurs significatifs du taux de mortalité dans la population qui la subit.
 - Pope III, C. A., Thun, M. J., Namboodiri, M. M., Dockery, D. W., Evans, J. S., Speizer, F. E., & Heath Jr, C. W. (1995). Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 151(3), 669-674.



Age-, sex-, and race-adjusted population-based mortality rates for 1980 plotted against mean fine particulate air pollution levels for 1979 to 1983. Data from metropolitan areas that correspond approximately to areas used in prospective cohort analysis.



Effet sur la santé

- Une étude de l'OMS du 25 mars 2014 indique que 7 millions de personnes sont décédées prématurément en 2012 dans le monde, décès attribuables aux effets de pollutions de l'air extérieur et domestique dont 5,9 millions en Asie-Pacifique.

Pollutions physiques: radioactivité



- La radioactivité est le phénomène physique par lequel des noyaux atomiques instables (dits radionucléides ou radioisotopes) se transforment spontanément en d'autres atomes (désintégration) en émettant simultanément des particules de matière (électrons [particules β], noyaux d'hélium [particules α], neutrons, etc.) et de l'énergie (photons [particules γ] et énergie cinétique).



Expériences naturelles

- Les expériences naturelles consistent à identifier un groupe témoin différent d'un groupe test à la suite d'un choc exogène naturel ou au moins non voulu.
- Le groupe assimilé au groupe test est celui qui a été frappé par le choc tandis que le groupe témoin n'a pas été atteint.
- Pour s'assurer de la similitude des groupes, on devrait les comparer avant l'évènement et ainsi s'assurer qu'ils ont les mêmes comportements.

Le 26 avril 1986



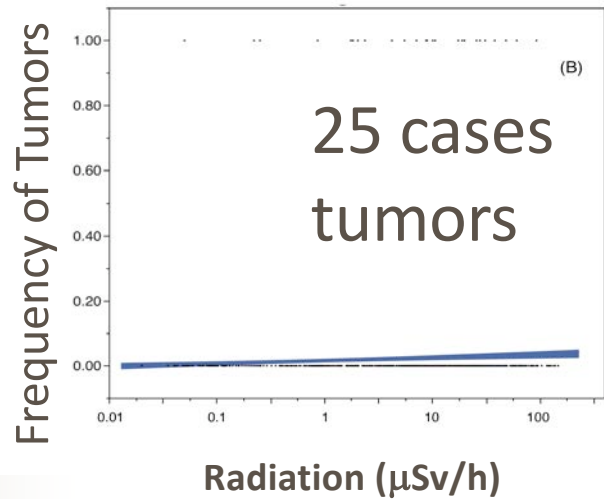
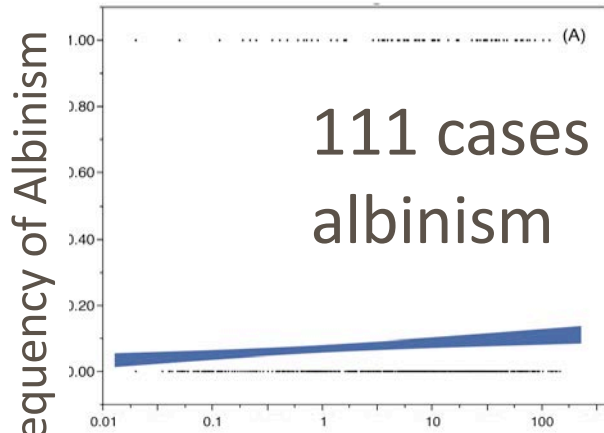
Chernobyl en Ukraine



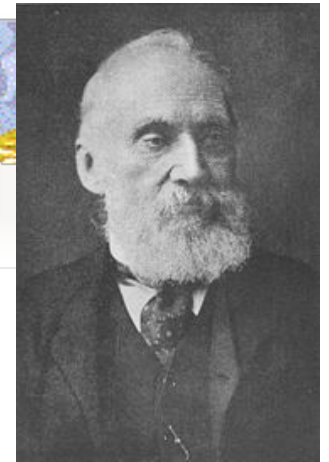
Effet des radiations à Chernobyl

Møller, A.P., et al. Mutation Research

N = 1669



William Thomson, Lord Kelvin, (June, 26th 1824 Irland – December, 17th 1907)

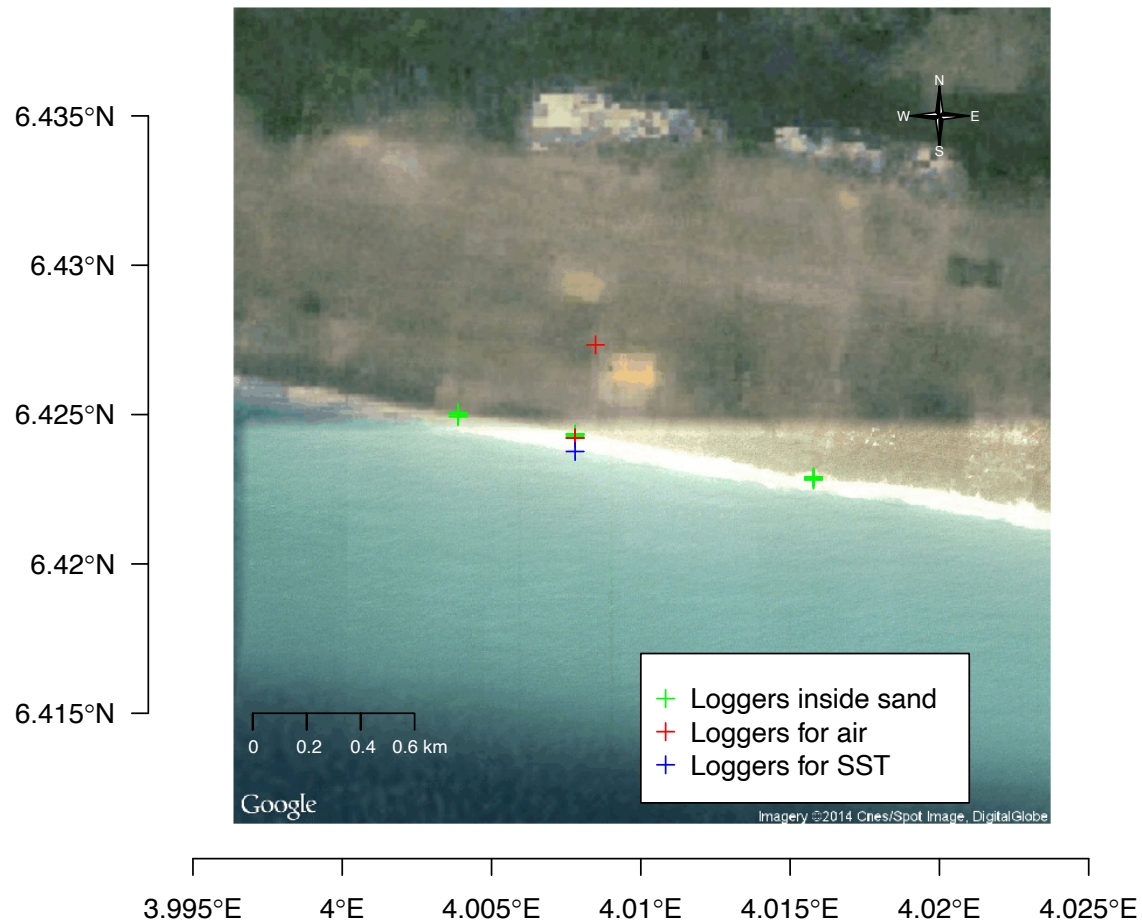


Pollutions physiques: thermique

- La température est une mesure de l'agitation atomique et moléculaire. Il s'agit d'une mesure macroscopique d'évènements microscopiques.
- L'unité de mesure de la température est le kelvin (symbole K) dans le système SI system. Les kelvins sont utilisés en l'honneur de William Thomson, Lord Kelvin, premier scientifique anoblit en Angleterre pour ses contributions scientifiques

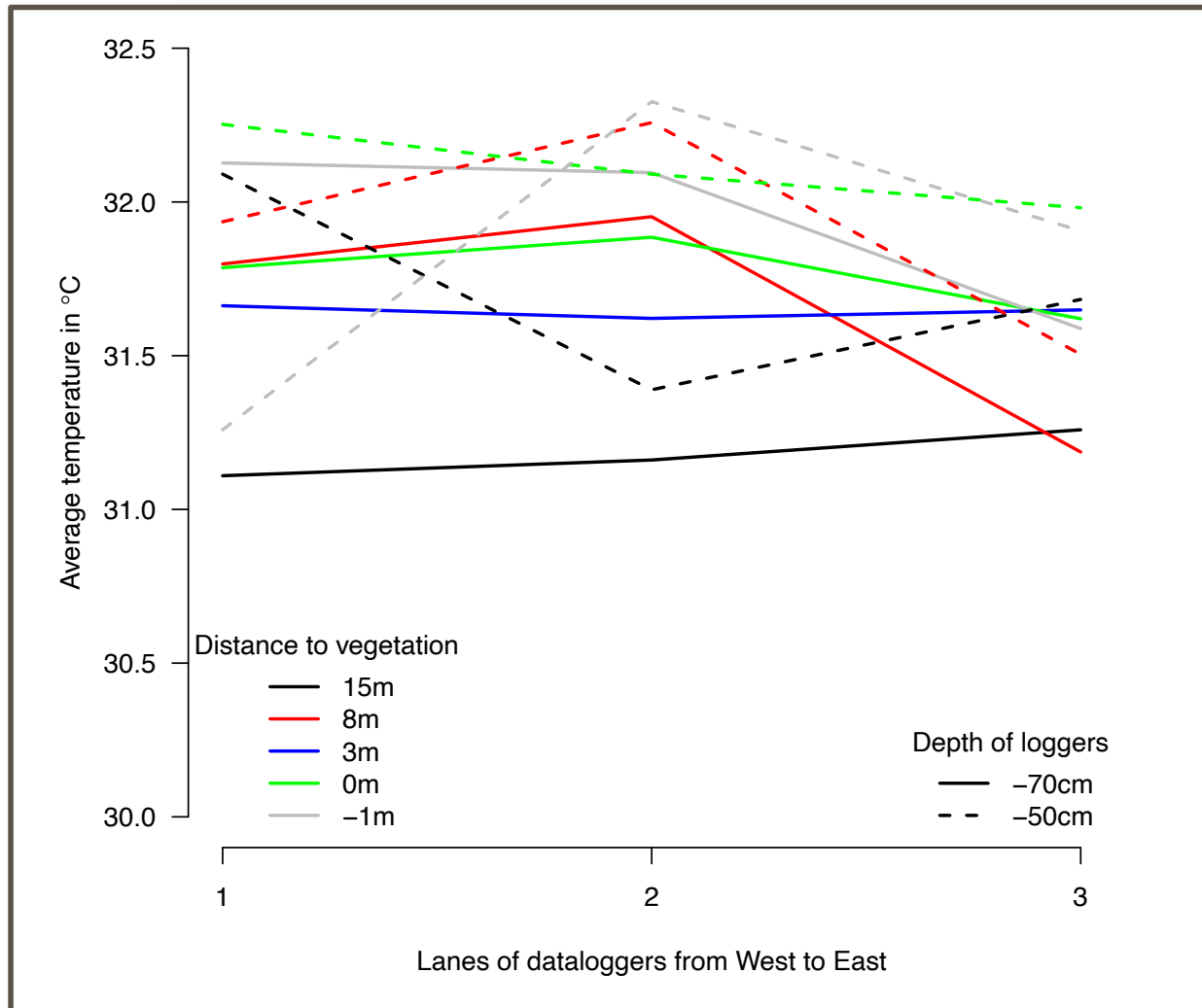


The river Kelvin is a small river flowing past his University



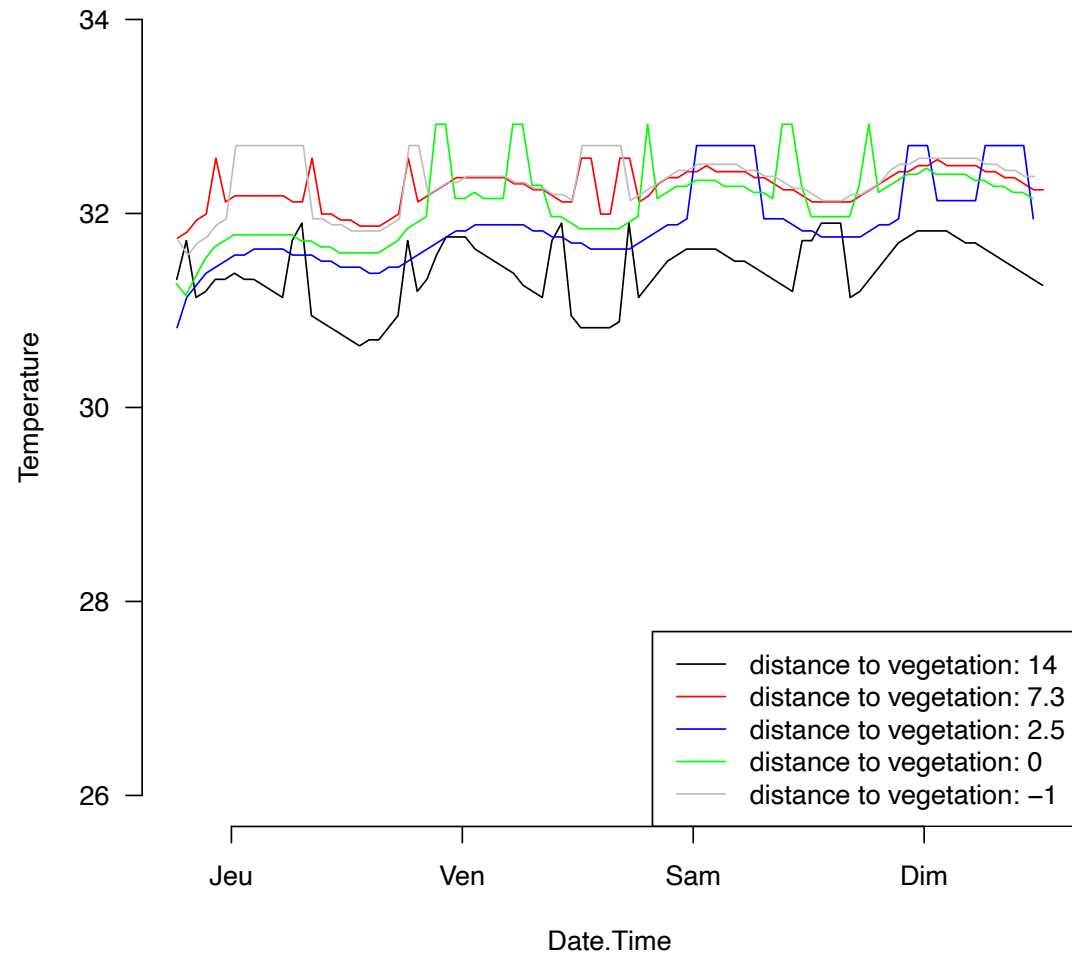
Dataloggers in Lekki beach, Nigeria

Average temperature according to distance of vegetation



Lane effect on sand temperature

Line, latitude 6.42422 longitude 4.00780; Depth=-50



Logger information



Scaling the thermal heterogeneity

- Based on temperature recording, thermal heterogeneity in soil at very small scale (10 m) can be very large (up to 3 °C) even in the absence of shading difference
 - *Physics of thermal properties of soil is very complex. Energy transfer depends on soil structure and composition. Particularly moisture in soil have a very complex interaction with energy loss and will change over time.*

Plastic in sand changes the physical properties of sand: thermal pollution?

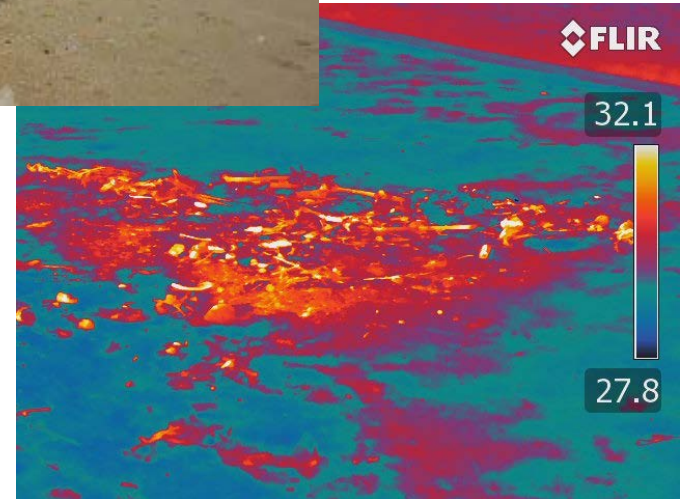
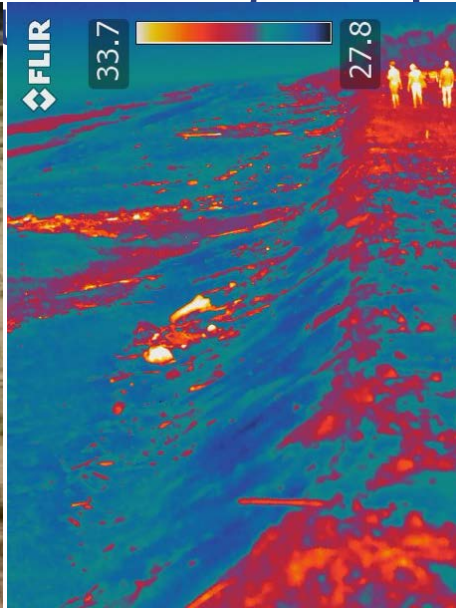
- Thermal properties of sand (thermal conductivity, thermal diffusivity) are determined by the physical properties of substrate
- When plastics are mixed to sand, what is the change of thermal properties of sand and then the temperature?



Adegbile, O.M. & Girondot, M. (2019) Plastic debris and sand temperature in a sea turtle nesting beach in West Lagos coast, Nigeria. 39th International Sea Turtles Symposium. Charleston, SC.

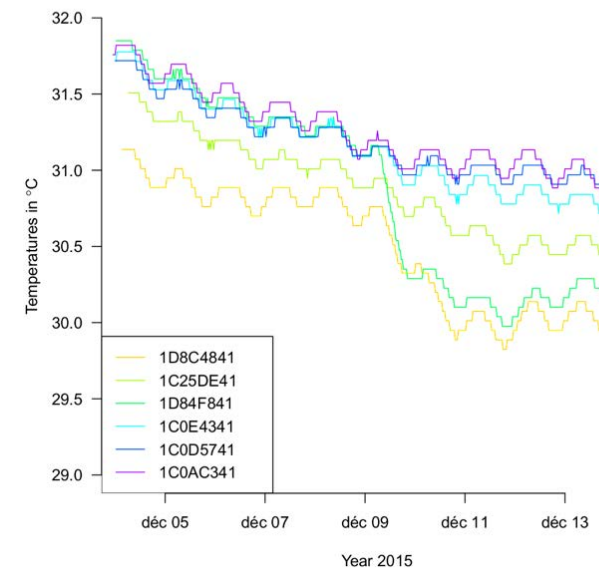
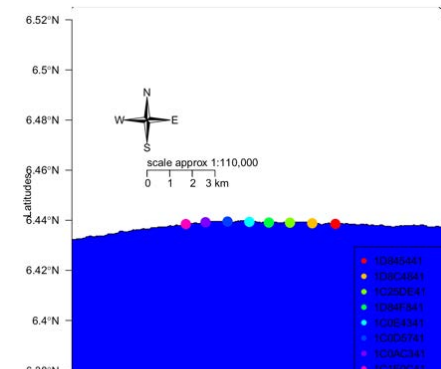


2. i. S. 1 can



Heterogeneity of temperatures in absence of plastic

- Temperature data loggers were deployed along the Eleko beach in Lagos Nigeria between at 50 cm depth and 3 m from vegetation at varying distances to determine the heterogeneity of the sand temperatures.
- Sand temperature heterogeneity can be at large as 1.5 °C but the closer the dataloggers are, the most similar are the temperatures.

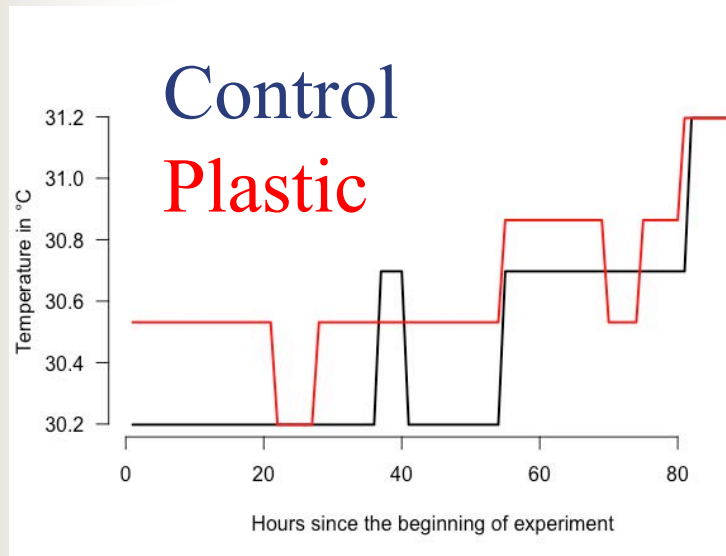


Experiment to analyze if plastics in sand can have an impact for marine turtles

- 2 replicates of temperature recorded at 50 cm depth in sand without plastics (C1 & C2) or with plastic (P1 or P2) at the top for a 5 day period (experiment 1) or 3 days (experiment 2). Each control and experiment dataloggers were localized at 1 m distant apart.
- Temperatures were recorded each hour.



Results of experiments



- In the 4 experiments, the temperature recorded by datalogger with plastic was always warmer than the temperatures recorded by datalogger without:
- $\Delta T = +0.036^{\circ}\text{C}$ (SE 0.014 $^{\circ}\text{C}$)
- $\Delta T = +0.353^{\circ}\text{C}$ (SE 0.021 $^{\circ}\text{C}$)
- $\Delta T = +0.186^{\circ}\text{C}$ (SE 0.028 $^{\circ}\text{C}$)
- $\Delta T = +0.418^{\circ}\text{C}$ (SE 0.026 $^{\circ}\text{C}$)

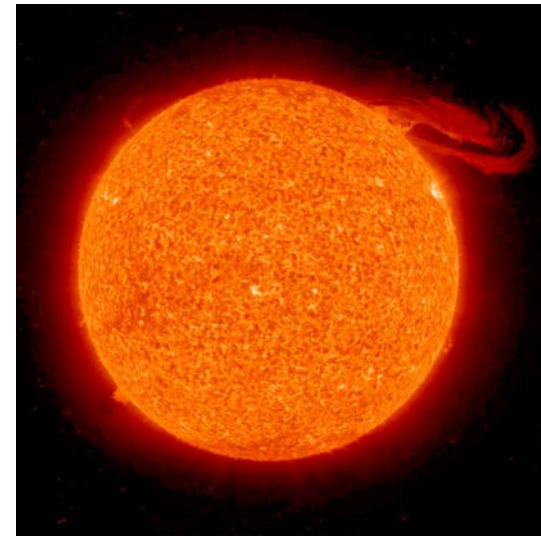


Scaling the thermal heterogeneity

- Climatic models use a 25km x 25km grid to give estimate of past and future climate
- This scale is not relevant at all to take into account thermal micro-habitat.

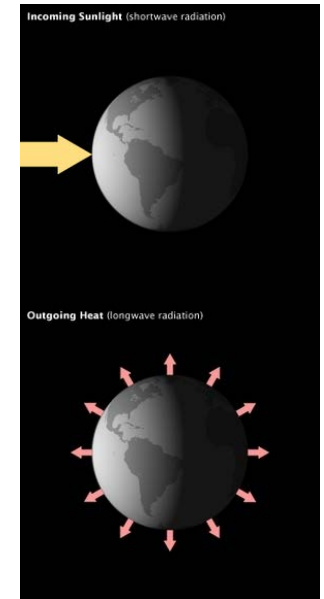
Pollutions physiques: lumineuse

- La lumière à la surface de la terre est d'origine solaire et est un indicateur de la période dans la journée ou de la période dans l'année via la photopériode.



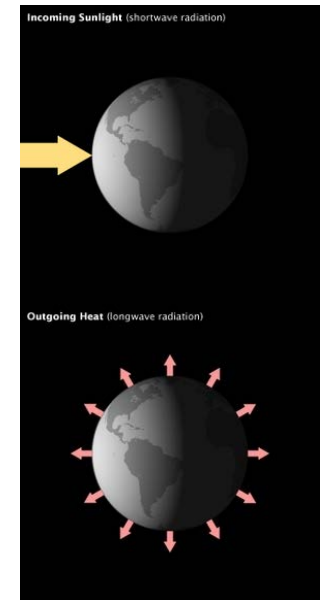
Quand est le minimum de la température journalière ?

- L'énergie reçue provient exclusivement du soleil
- L'énergie perdue provient du rayonnement infrarouge
 - Donc de l'énergie est perdue à tout moment et le minimum est lorsque les premiers rayons du soleil arrivent le matin



Quand est le maximum de la température journalière ?

- L'énergie recue provient exclusivement du soleil
- L'énergie perdue provient du rayonnement infrarouge
- Le moment de la journée où les pertes équilibrent les gains dépend de la saison. On peut l'approximer par 3 heures avant le coucher du soleil.



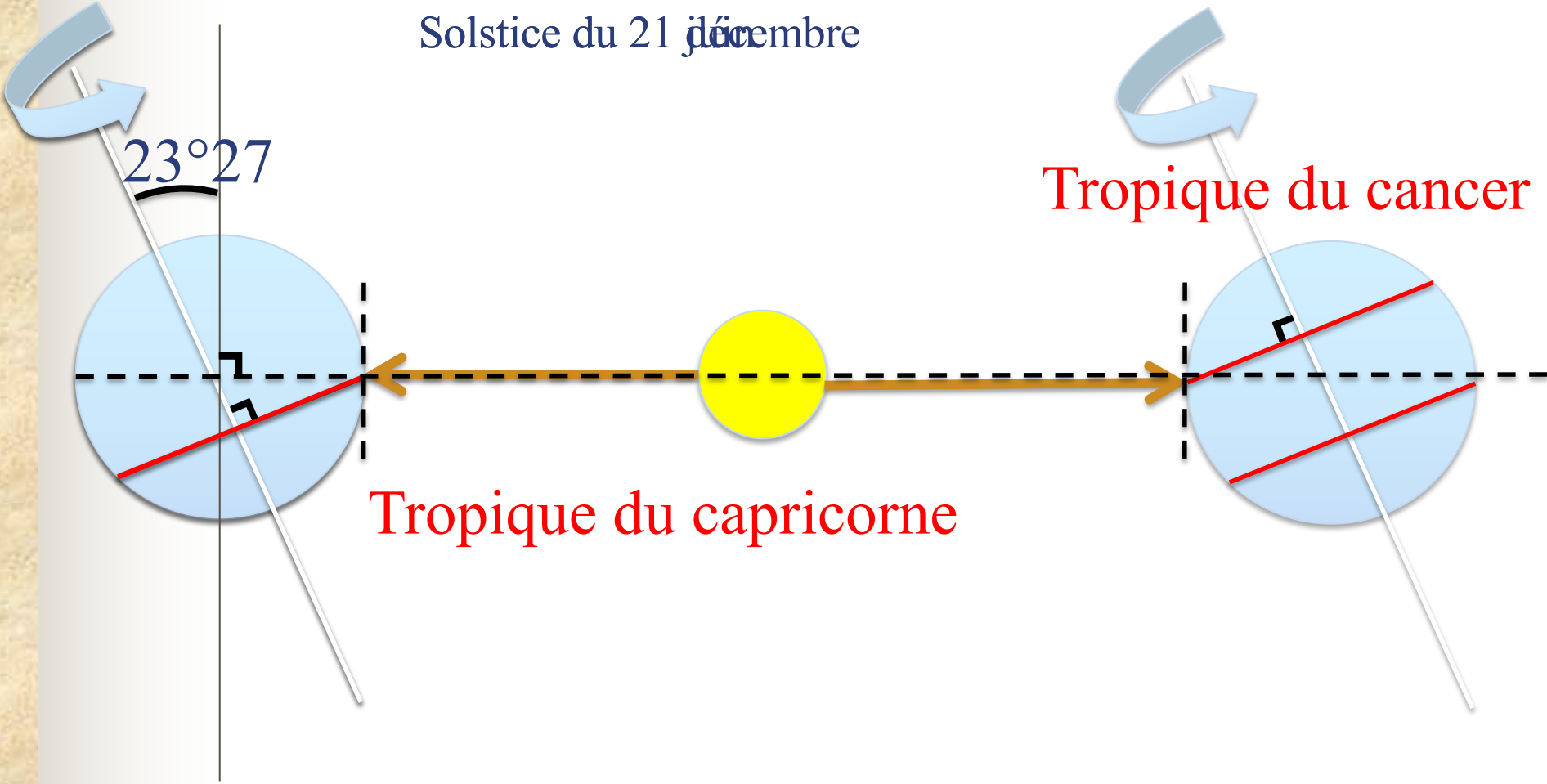


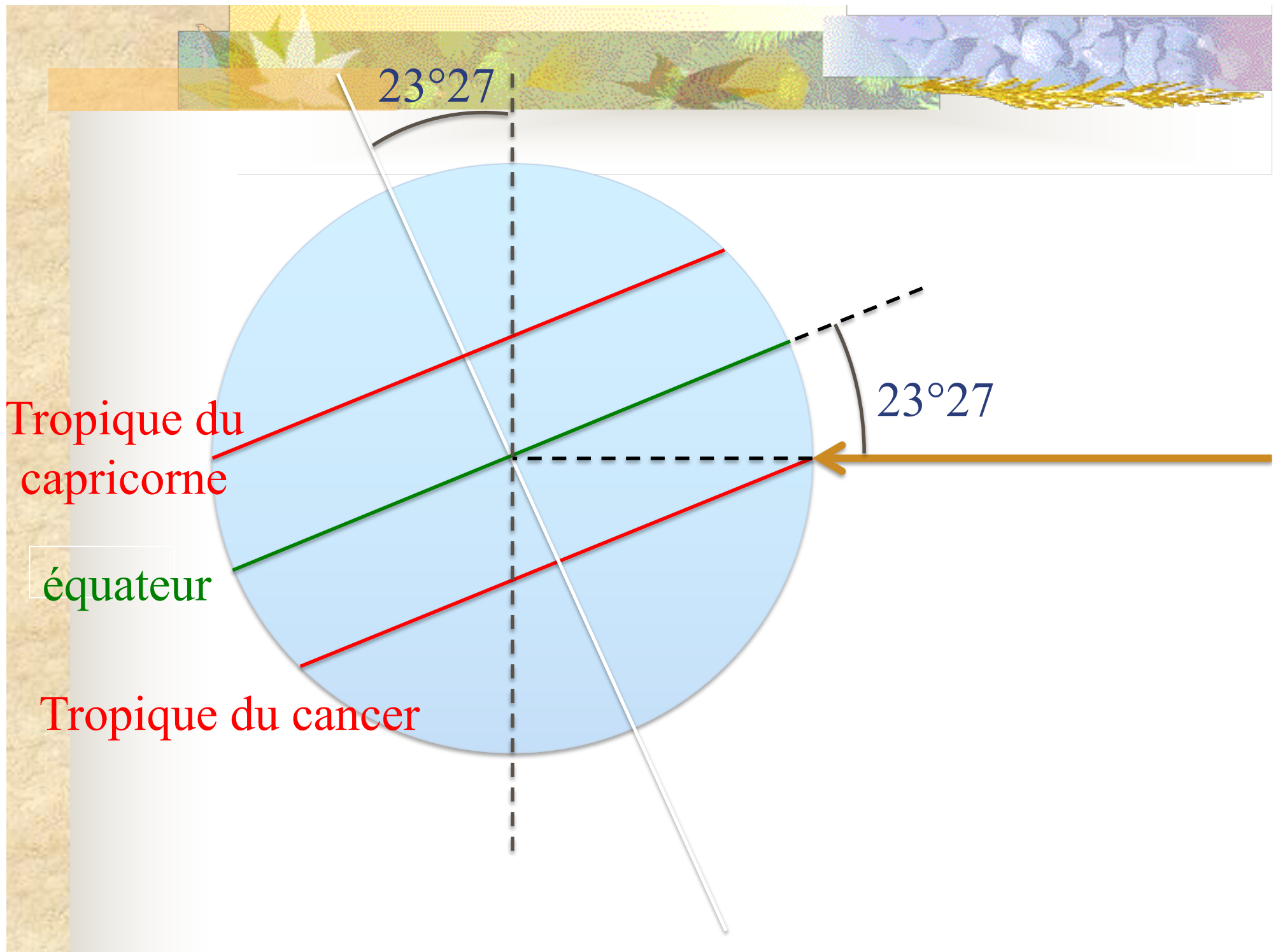
Conséquence

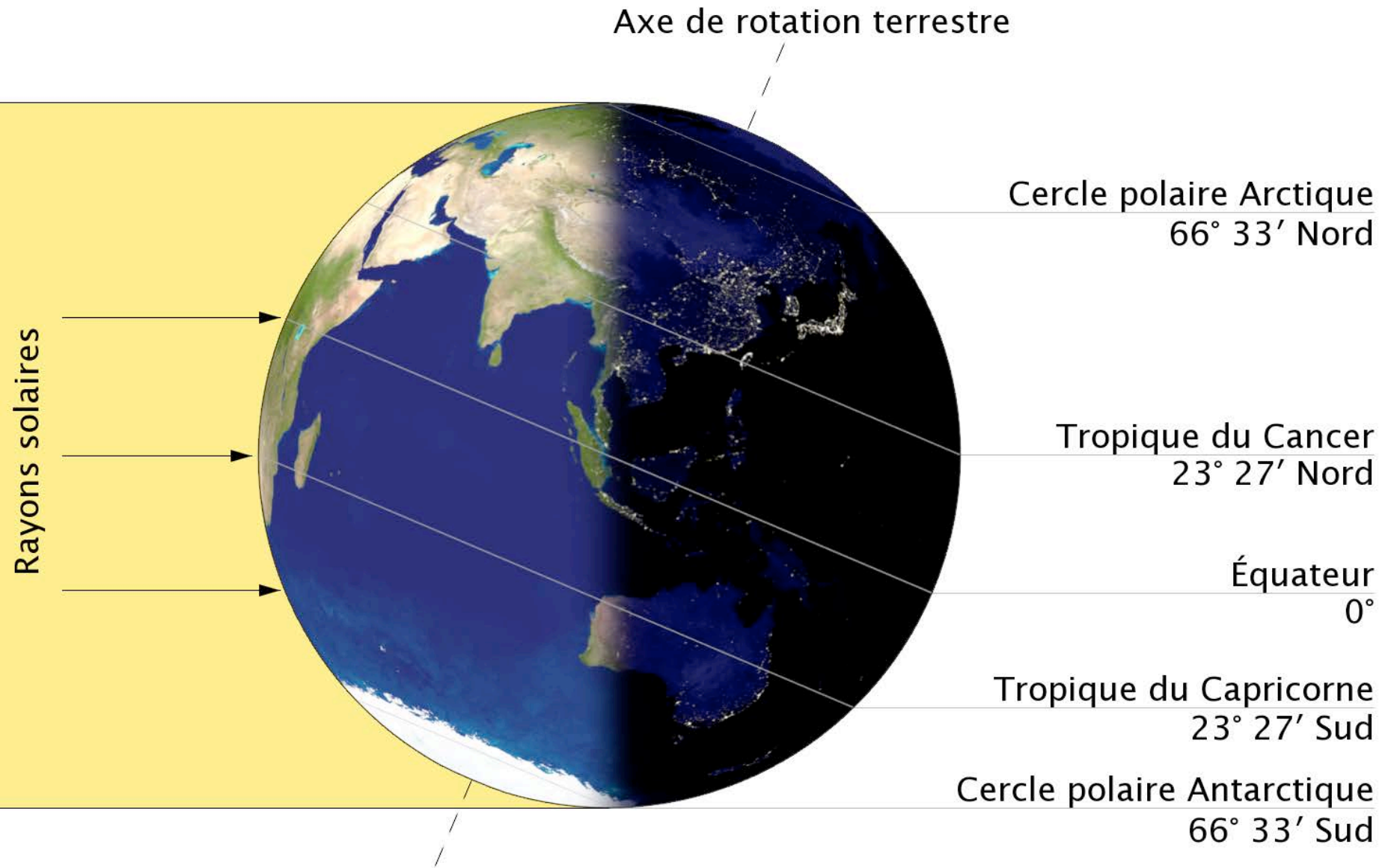
- Beaucoup d'êtres vivants utilisent la luminosité comme indicateur de la période de la journée la plus favorable pour exercer leur activité.



Solstice du 21 décembre

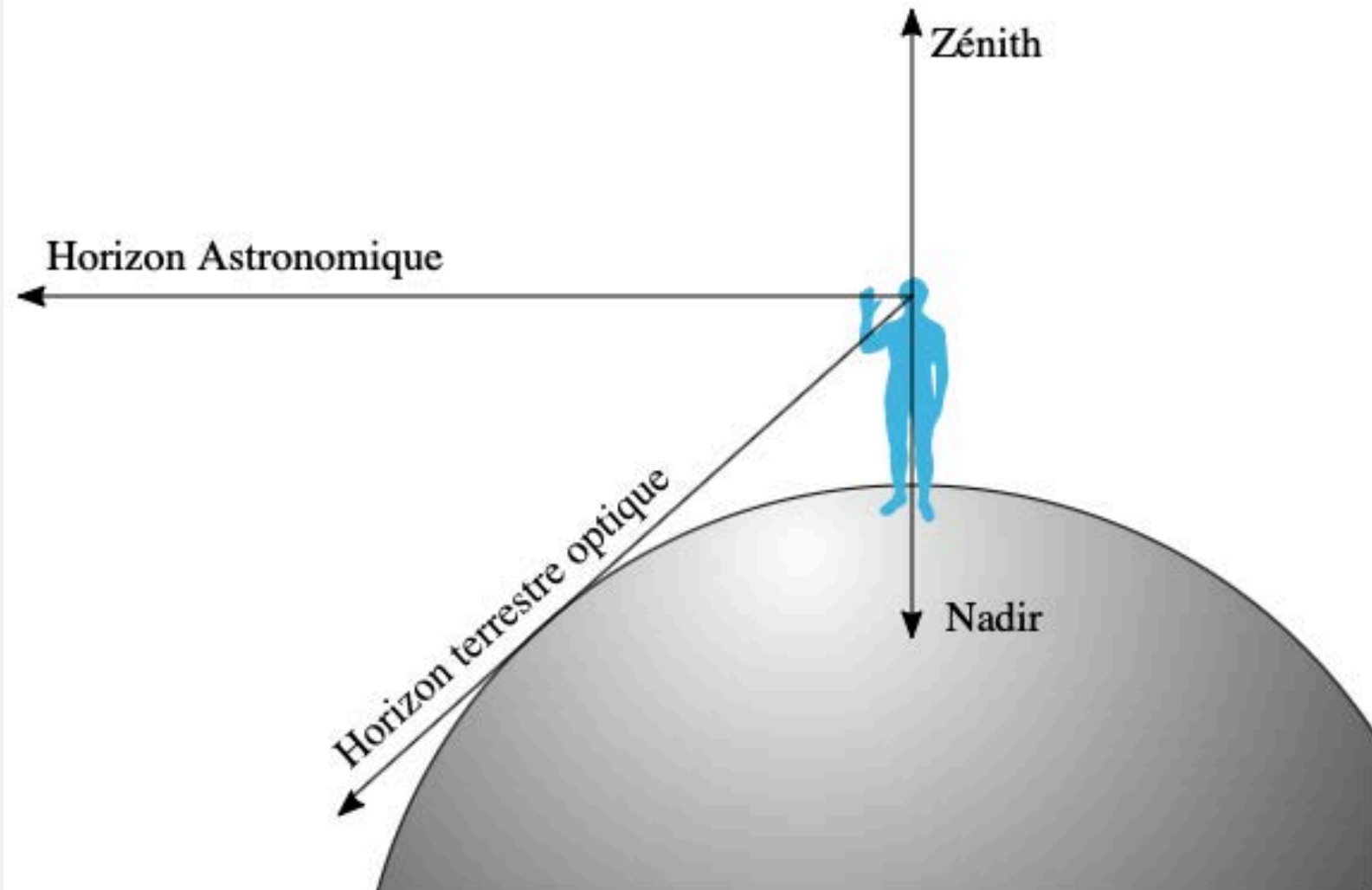







Les tropiques sont les deux parallèles du globe terrestre qui délimitent une bande à l'intérieur de laquelle le Soleil apparaît au zénith au moins une fois dans l'année.

Le zénith (سمت *samt*, « sommet ») et le nadir (نظير *nazīr*, « opposé »)



L'inclinaison des rayonnements solaires

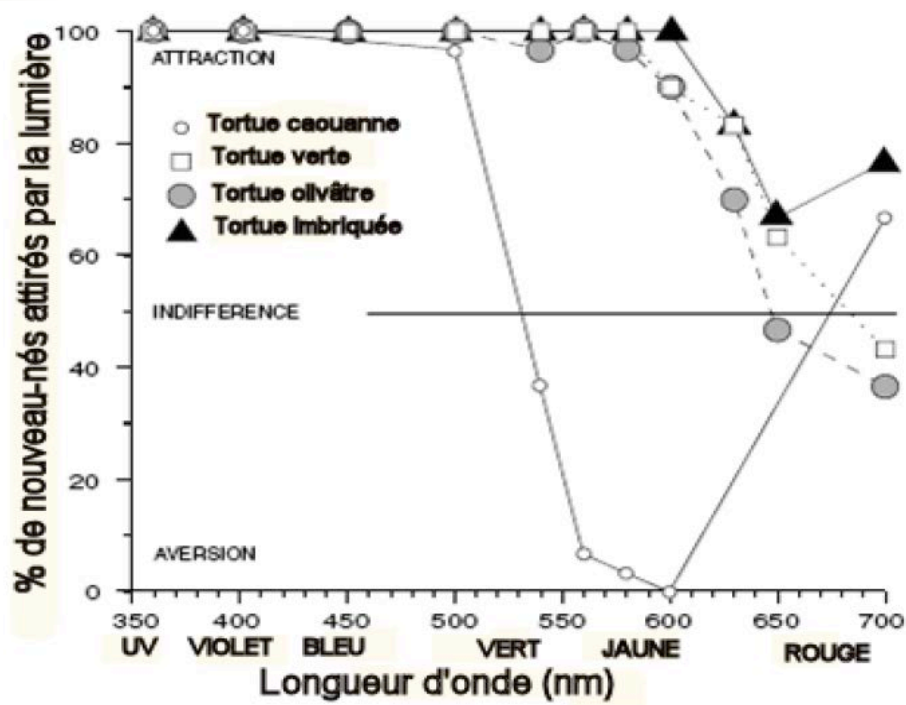
Localisation	Équateur	Bordeaux	Oslo	Pôle Nord
Latitude	0°	45°N	60°N	90°N
Angle d'incidence*	90°N	45°	30°	1°
Surface recevant l'énergie	1 m ²	1,4 m ²	2 m ²	57 m ²
Le faisceau de lumière :				



Conséquence

- Les animaux peuvent intégrer la photo-période qui donne une indication de la zone où ils sont et de la période de l'année.

Effet de la pollution lumineuse



Pollution lumineuse dans les villes

- Depuis l'apparition de l'ampoule électrique, la pollution lumineuse dans les villes se développe.



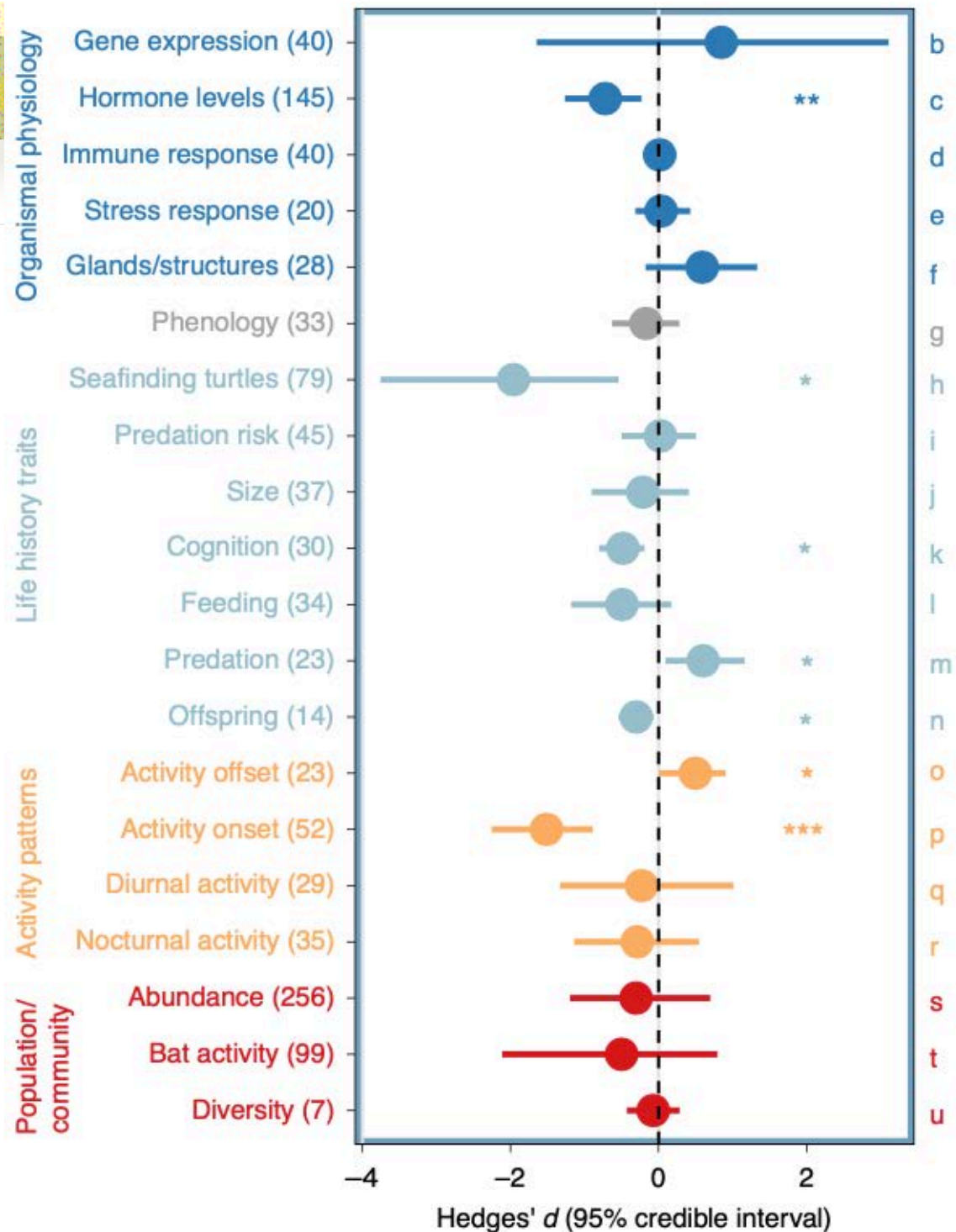


Pollution lumineuse

- Nearly a quarter of the global land area already lies under artificially light-polluted night-time skies.
 - Falchi, F. et al. The new world atlas of artificial night sky brightness. *Sci. Adv.* 2, e1600377 (2016).
- This is predicted to affect wild organisms, particularly because of the central role that light regimes play in determining the timing of biological activity.
- Sanders, D., et al. (2020). "A meta-analysis of biological impacts of artificial light at night." *Nat Ecol Evol.*

Artificial light at night (ALAN)

Thirty-five studies documented 338 observations reporting the impact on organismal physiology, 7 studies yielded 35 observations reporting the impact on organismal phenology, 58 studies reported 411 life history measures, 27 studies described 139 daily activity measures and 42 studies provided 381 observations of the impact on populations and ecological communities.





Hedges' d

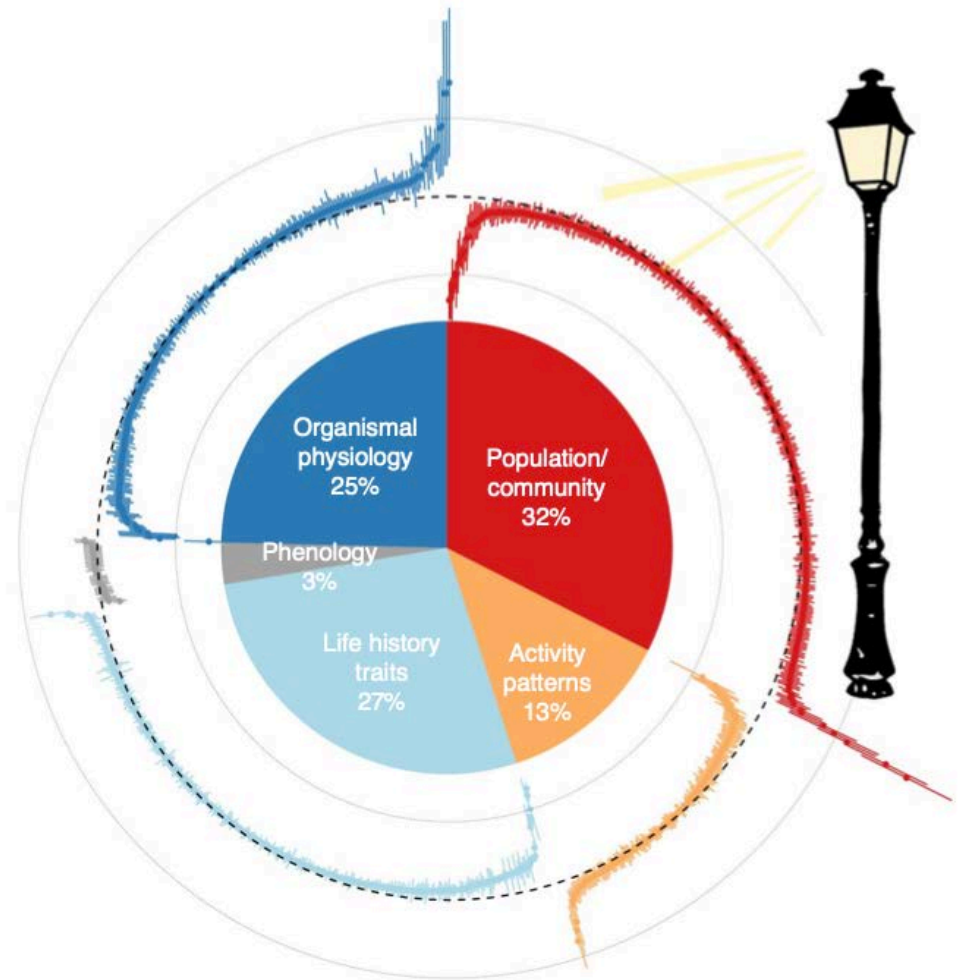
- A (population) effect size is based on means considering the standardized mean difference between two populations:

$$\frac{m_1 - m_2}{S}$$

- La formule exacte du d de Hedges corrige pour des biais éventuels.
 - Larry V. Hedges & Ingram Olkin (1985). *Statistical Methods for Meta-Analysis*. Orlando: Academic Press. ISBN 978-0-12-336380-0.

Conclusions

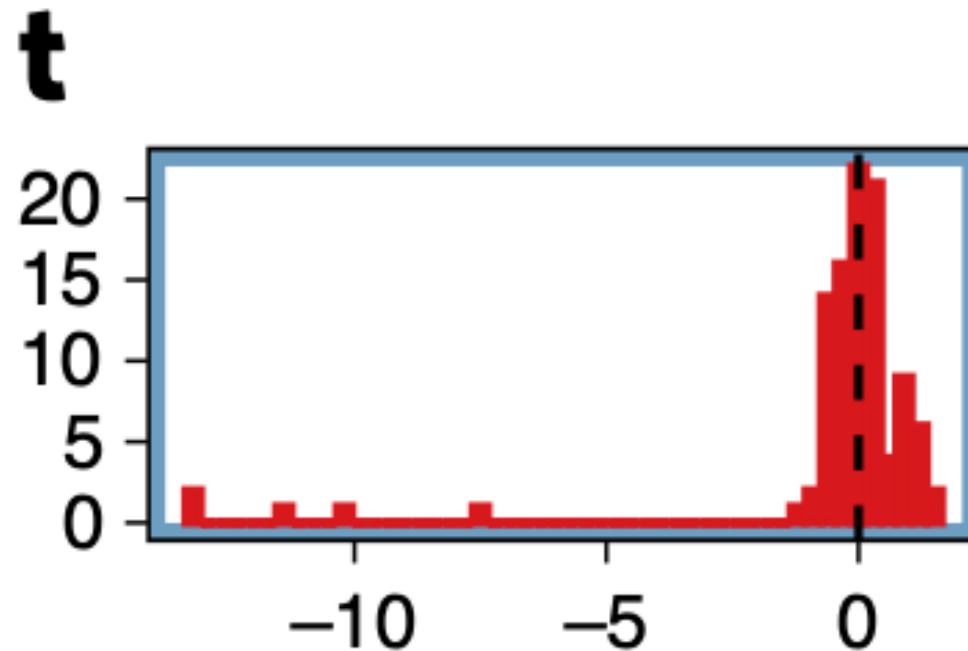
- Chez certaines espèces ALAN augmente et chez d'autres il diminue le pattern. A l'échelle globale, on peut croire qu'il n'y a pas d'effet.



Exemple de l'activité des chauves-souris



- Beaucoup sont insensibles à la lumière et quelques unes sont très sensibles:



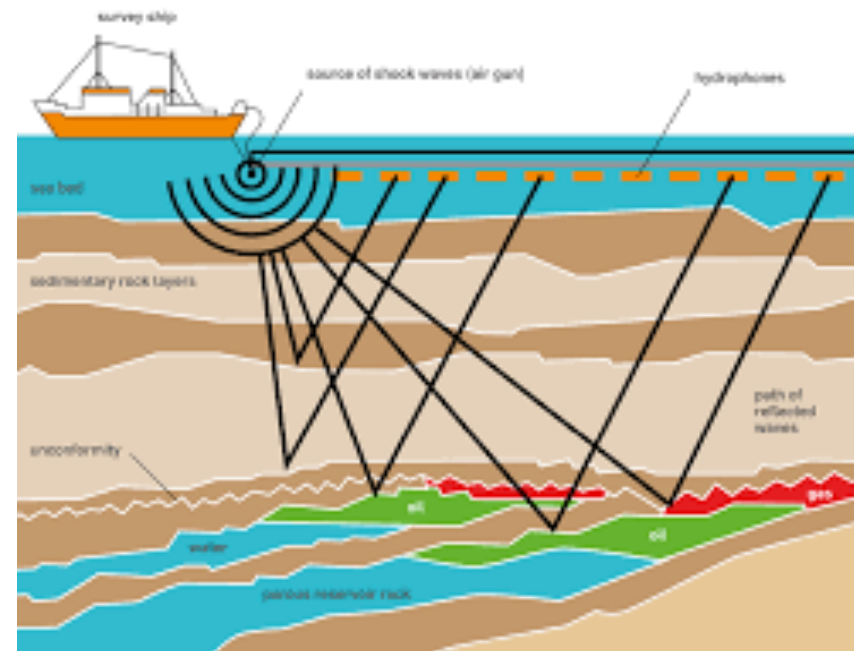


Pollutions physiques: sonore

- Le son est une vibration mécanique d'un fluide, qui se propage sous forme d'ondes longitudinales grâce à la déformation élastique de ce fluide.
- Le son est donc un changement de pression du milieu qui est ressenti par des récepteurs spécifiques.
- Le son est un des principaux moyen de communication:
 - Pour qu'il y ait communication, il est nécessaire qu'il y ait un émetteur et un récepteur qui sait interpréter le signal de l'émetteur.
- Une source externe sonore peut perturber la communication chez les animaux.

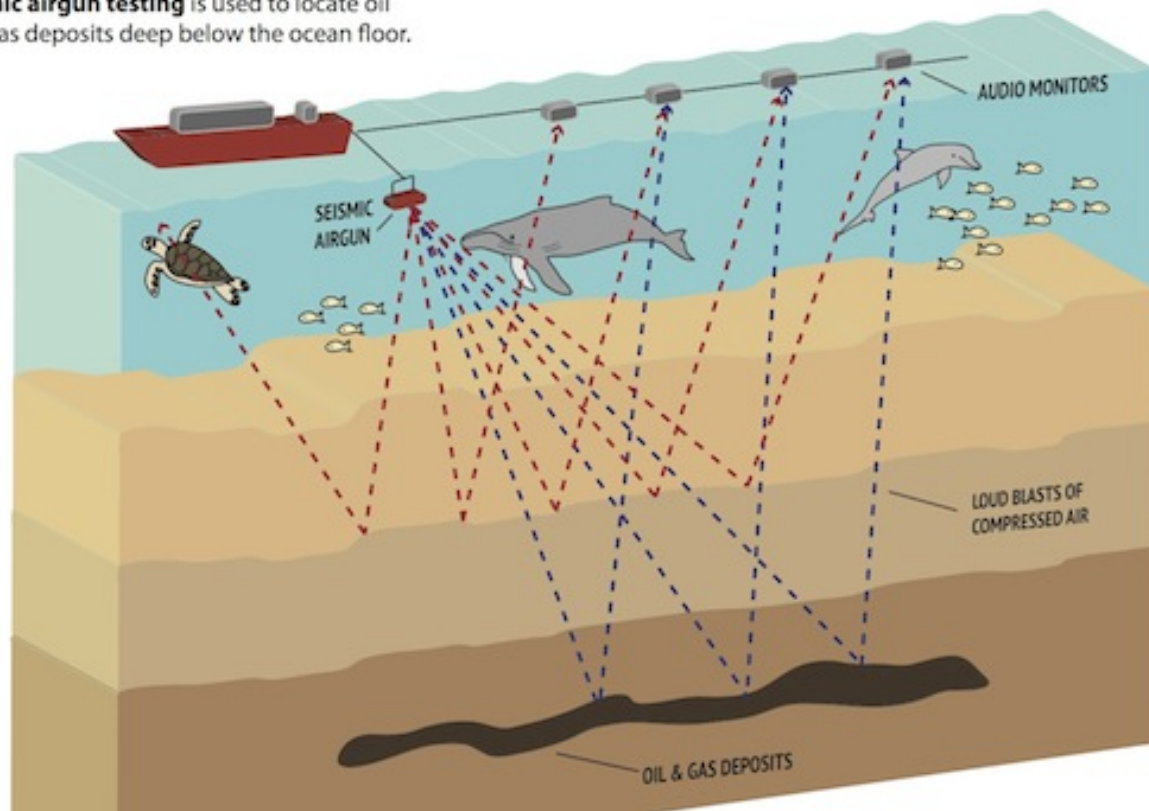
Le bruit dans les océans

- Les études de la structure du sous-sol en milieu marin utilisent des canons à air comprimé pour étudier la façon dont les ondes se propagent et pour en inférer la structure du sous-sol:



L'impact des airguns sur la faune est mal-connu

Seismic airgun testing is used to locate oil and gas deposits deep below the ocean floor.



Impact potentiel... mais c'est sans doute plus compliqué



Pollutions extraterrestres

- À ce jour, on recense plus de 80 constellations de satellites miniatures, ou “smallsats”, partiellement en orbite ou à l’état de projet : 26 américaines, 21 chinoises, 20 européennes et une quinzaine d’autres nationalités.
- Un des projets les plus ambitieux est la constellation Starlink de SpaceX, qui a procédé à un sixième lancement de 60 minisatellites mi-mars 2020. À terme, Elon Musk envisage de fournir un accès à internet haut débit rapide et bon marché au monde entier grâce à pas moins de 42 000 minisatellites en orbite basse ! Le projet Kuiper du fondateur d’Amazon Jeff Bezos comprend de son côté 3 236 satellites, et le fondateur de OneWeb, Greg Wyler, vise lui 648 satellites d’ici 2022.

