HORS-SÉRIE Le Monde

Réviser son bac avec Le Monde

2021

TERMINALE

ENSEIGNEMENT SCIENTIFIQUE

NOUVEAU PROGRAMME

Un cahier spécial de 16 pages pour se tester
+
Une carte mentale pour bien retenir

- L'ESSENTIEL DU COURS
- LES SUJETS INÉDITS
- LES ARTICLES DU *MONDE*
- LES CONSEILS DE RÉVISION

Antilles 9,30 €, Réunion 9,80 €, Maroc 90 DH, Tunisie 15 DT.
M 02422 - 10H - F: 8,90 € - RD

rue des écoles

En partenariat avec MAIF

Réviser son bac avec Le Monde

TERMINALE

ENSEIGNEMENT SCIENTIFIQUE

Une réalisation de rue des écoles

NOUVEAU PROGRAMME
Un cahier spécial de 16 pages pour se tester
+
Une carte mentale pour bien retenir

Avec la collaboration de :
Séverine Duparcq
Élisabeth Le Prettre
Claudie Libersa
Jean-Sébastien Perrin

En partenariat avec MAIF

L'enseignement scientifique, nouvelle matière née de la réforme du baccalauréat, est basé sur des compétences en physique, en chimie, en SVT, en mathématiques mais aussi en programmation. Il ne vise pas à construire un savoir encyclopédique, mais plutôt à « comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration » ; « identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques » ; « identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l'environnement. »

L'urgence climatique est un enjeu scientifique, mais également sociétal. Le premier thème intitulé « science, climat et société » permet, à travers une étude historique, de comprendre les relations étroites entre l'histoire et la Terre et celle de la vie et ainsi d'envisager les mécanismes complexes du changement climatique futur. Vous êtes amené(e) à percevoir l'impact de l'activité humaine sur l'augmentation des gaz à effet de serre et à comprendre l'équilibre radiatif de la Terre. L'analyse du système climatique, réalisée à l'aide de modèles numériques, repose sur des mesures et des calculs faisant appel à des lois physiques, chimiques, biologiques. Ces modèles permettent de prédire des fourchettes d'évolution du système climatique au XXIe siècle et de mettre en perspective les choix futurs de production d'énergie, en fonction de ces scénarios climatiques.

Le deuxième thème s'intitule « le futur des énergies ». La production énergétique dépend de la consommation et des choix de société. En parcourant l'histoire de l'électricité et les recherches actuelles, on constate qu'il est possible de produire de l'électricité sans émettre de gaz à effet de serre. Il existe néanmoins des risques : pollution chimique, déchets radioactifs, accidents industriels, recyclage des panneaux solaires, etc. Le transport de l'électricité entraîne également des pertes énergétiques très coûteuses. Pour les minimiser, on utilise des modèles mathématiques d'optimisation sous contraintes, qui nécessitent des traitements numériques lorsqu'ils mettent en jeu un nombre important d'inconnues et de données. Pour que soit mise en œuvre une adaptation efficace, « les choix énergétiques supposent une compréhension globale du système Terre ».

Le troisième thème – « Une histoire du vivant » – aborde les conséquences de l'activité humaine sur la biodiversité et sur la sélectivité naturelle, ainsi que le principe de la vaccination. Les modèles démographiques sont expliqués et les limites des ressources naturelles sont présentées, compte tenu d'une augmentation exponentielle de la population mondiale. En effet, il est important de prédire les effectifs humains futurs, mais aussi la manière dont vont évoluer les ressources qui leur sont nécessaires. L'intelligence artificielle permet déjà de faire des prédictions plus fines en utilisant de nombreuses données (big data). En effet, une dernière partie vous invite à vous plonger dans le monde futur du numérique.

Dans cet ouvrage, vous trouverez toutes les clés de la réussite. Tout d'abord, de quoi réviser en vue de l'épreuve : pour chaque chapitre, une synthèse du cours tel que les nouveaux programmes le définissent. Ensuite, des sujets corrigés, qui vous permettront de vous entraîner. Enfin, les articles du *Monde* constituent l'une des richesses de cet ouvrage et vous permettent une mise en perspective du cours : ils l'approfondissent, en éclairent certains points, mobilisent les acquis en les illustrant à travers un texte stimulant et pertinent, qui présente l'histoire, les enjeux et les débats autour de chaque thème.

Message à destination des auteurs des textes figurant dans cet ouvrage ou de leurs ayants-droit : si malgré nos efforts, nous n'avons pas été en mesure de vous contacter afin de formaliser la cession des droits d'exploitation de votre œuvre, nous vous invitons à bien vouloir nous contacter à l'adresse bucquet@lemonde.fr.

En partenariat avec MAIF

Complétez vos révisions du bac sur www.assistancescolaire.com :
méthodologie, fiches, exercices, sujets d'annales corrigés...
des outils gratuits et efficaces pour préparer l'examen.

Le Monde CAMPUS



A l'approche du baccalauréat 2021 et durant l'examen, Le Monde Campus vous propose des conseils de lectures et de révisions, des quiz, des directs avec des professeurs, ainsi que les sujets et corrigés des épreuves.

Toute l'année, nos journalistes racontent comment les étudiants et jeunes diplômés se forment, travaillent et changent la société.

Rendez-vous sur la rubrique **Lemonde.fr/campus** et dans *Le Monde* avec les pages « Le Monde Campus 021 » et les suppléments mensuels « Le Monde Campus ».

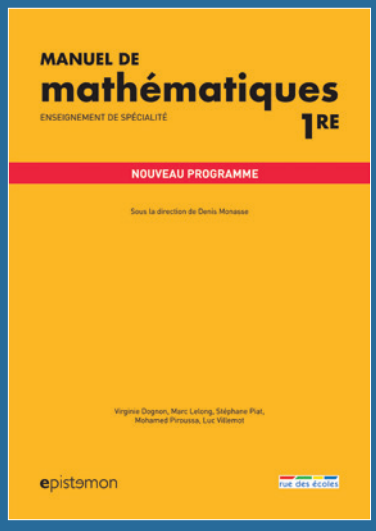
Le Monde CAMPUS |

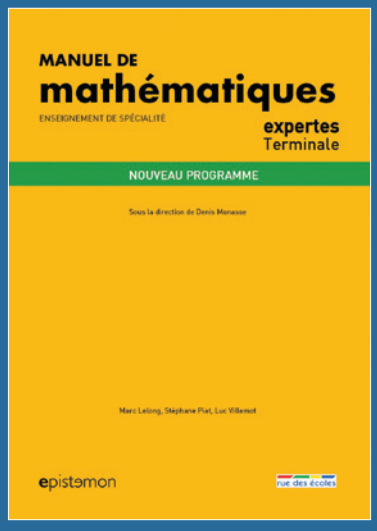
NOUVEAU PROGRAMME

MANUELS DE MATHÉMATIQUES

Des manuels de mathématiques inédits, conformes aux nouveaux programmes et accessibles à tous.

- Une place très importante donnée aux démonstrations, au raisonnement et faisant appel à la créativité.
- De nombreux approfondissements permettant aux élèves ou à leurs professeurs de choisir des thèmes d'étude complémentaires.
- Une annexe dédiée à la programmation Python.





Cible : élèves de première et terminale
format : 17 x 24 cm | 368 pages | 19,50 €

Retrouvez toutes nos collections pour préparer le baccalauréat sur www.ruedesecoles.com

rue des écoles

SOMMAIRE

Science, climat et société p. 5

chapitre 01 – L'atmosphère terrestre et la vie p. 6

chapitre 02 – La complexité du système climatique p. 8

chapitre 03 – Le climat du futur p. 10

chapitre 04 – Énergie, choix de développement et futur climatique p. 12

Le futur des énergies p. 25

chapitre 05 – Histoire, enjeux et débats p. 26

chapitre 06 – Deux siècles d'énergie électrique p. 28

chapitre 07 – Les atouts de l'électricité p. 30

chapitre 08 – Optimisation du transport de l'électricité p. 32

Une histoire du vivant p. 45

chapitre 09 – La biodiversité et son évolution p. 46

chapitre 10 – L'évolution comme grille de lecture du monde p. 48

chapitre 11 – L'évolution humaine p. 50

chapitre 12 – Les modèles démographiques p. 52

chapitre 13 – L'intelligence artificielle p. 54

Les corrigés p. 77

Le guide pratique p. 91

La carte mentale p. 94

SCIENCE, CLIMAT ET SOCIÉTÉ






L'atmosphère terrestre et la vie

L'atmosphère de notre planète est très particulière car elle est très riche en dioxygène (O_2). La présence de ce gaz en de telles quantités est le fruit d'une longue histoire, débutée il y a des milliards d'années, et étroitement liée à la présence de vie sur Terre.

De l'atmosphère primitive à l'atmosphère actuelle

L'atmosphère terrestre actuelle est très différente de ce qu'elle était initialement. En effet, peu après sa formation il y a 4,57 milliards d'années (ou Giga-années, Ga), l'atmosphère dite primitive devait être très dense et essentiellement composée de vapeur d'eau (H_2O à l'état gazeux), de CO_2, et de diazote (N_2). Pourtant, aujourd'hui, notre atmosphère est composée essentiellement de N_2 et d'O_2, respectivement à hauteur de 78 % et 21 %. Et le CO_2 ne représente actuellement que 0,03 % des gaz atmosphériques.

La Terre primitive a fortement refroidi après sa formation. La vapeur d'eau s'est alors condensée en eau liquide qui a formé les premiers océans terrestres. Une partie du CO_2 atmosphérique s'est alors solubilisée dans ces océans et, à la suite d'une série de réactions chimiques que nous ne détaillerons pas ici, s'est retrouvée piégée sous forme de roches carbonatées comme le calcaire. L'atmosphère est donc devenue beaucoup moins dense : elle ne contenait plus beaucoup de vapeur d'eau et n'était plus constituée que de CO_2 et de N_2.

Or, c'est à cette période, il y a environ 4 Ga, que la vie est sans doute apparue dans les océans sous forme de micro-organismes de type bactérie. Certaines de ces bactéries, les cyanobactéries, réalisent la photosynthèse et ont formé des structures en forme de choufleur composées de nombreuses couches très fines de calcaire, les stromatolithes, dont les plus anciens spécimens connus ont un âge estimé à 3,5 Ga environ.



Figure 1. Filament de cyanobactéries actuelles, semblable à ceux pouvant être à l'origine de la formation de stromatolithes, aujourd'hui encore.

La photosynthèse pratiquée à partir de ce moment par les êtres vivants s'est mise à consommer du CO_2 et à produire de l'O_2. En effet, son équation bilan est la suivante :

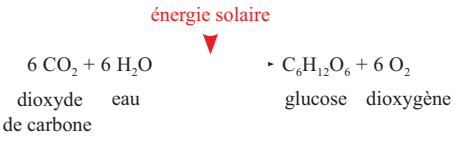


Figure 2. Équation bilan de la photosynthèse.

La teneur en CO_2 atmosphérique s'est donc mise à diminuer et ce gaz a fini par ne plus être présent en grande quantité dans l'atmosphère. Cela ne signifie pas que son rôle est devenu insignifiant pour autant, comme on le verra dans d'autres chapitres.

La teneur en O_2 n'a pas immédiatement augmenté dans l'atmosphère à la suite de sa production par photosynthèse. En effet, dans un premier temps, jusqu'à il y a environ −2,4 Ga, cet O_2 a oxydé des espèces chimiques comme des ions fer, présents dans les océans, ce qui a entraîné la formation de roches comme les fers rubanés qui constituent à l'heure actuelle les principaux gisements de minerai de fer exploités. Puis, à partir de −2,4 Ga, toutes ces espèces chimiques réductrices ayant été oxydées, l'O_2 a commencé à s'accumuler dans l'atmosphère jusqu'à en constituer environ 21 %.

Aujourd'hui, la teneur atmosphérique en O_2 est globalement stable. En effet, sa production par les êtres vivants photosynthétiques (on parle de sources d'O_2) est globalement compensée par la respiration de ces mêmes êtres vivants, ainsi que les êtres vivants non photosynthétiques, qui en consomment (on parle de puits d'O_2).

Quant au N_2, sa quantité globale dans l'atmosphère n'a presque pas varié au cours des temps géologiques, ce gaz étant extrêmement peu réactif. En revanche, l'atmosphère étant

MOTS-CLÉS

ATMOSPHÈRE : L'enveloppe la plus externe que peut posséder une planète, composée de ses éléments les plus légers, majoritairement des gaz.

ENVELOPPES TERRESTRES : Les différentes grandes couches qui constituent notre planète. En plus de l'atmosphère, on trouve notamment l'hydrosphère, constituée d'eau ; la lithosphère, la plus externe des enveloppes constituées de roches ; et la biosphère, constituée des êtres vivants et qui est particulière, car elle est dispersée dans les autres enveloppes.

ROCHES CARBONATÉES : Roches majoritairement formées d'ions carbonates (CO_3^{2-}) associés à d'autres ions chargés positivement. La plus courante des roches carbonatées est le calcaire, formé principalement du minéral appelé la calcite, qui est un carbonate de calcium ($CaCO_3$).

ROCHES CARBONÉES : Roches, généralement assez riches en carbone (souvent plus de 50 % mais leurs caractéristiques sont très variées), qui se forment à partir de la transformation de matière organique qui a été enfouie, chauffée et comprimée. Elles comprennent notamment les charbons, les pétroles et le gaz naturel. Malgré leurs noms semblables, elles sont très différentes des roches carbonatées.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

devenue beaucoup moins riche en gaz qu'elle ne l'était initialement (l'essentiel de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone présents à l'origine ont quitté l'atmosphère), il est devenu en proportion majoritaire.

La couche d'ozone

L'existence d'une haute teneur en O_2 dans l'atmosphère a pour conséquence la formation naturelle d'un autre gaz, l'ozone (O_3). En effet, le rayonnement solaire, et plus spécifiquement les plus énergétiques de ses rayons ultraviolets (les UV-C), dissocient certaines molécules d'O_2 en 2 atomes d'oxygène. C'est ce que l'on appelle une photodissociation. Chacun de ces atomes d'oxygène, très instable isolément, réagit avec une autre molécule d'O_2 pour former une molécule d'ozone O_3.

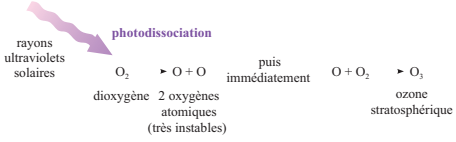


Figure 3. La formation de l'ozone dans la stratosphère.

Ce phénomène a lieu essentiellement entre 20 et 40 km d'altitude, dans la couche de l'atmosphère appelée la stratosphère. Il est à l'origine de la formation de ce que l'on appelle la couche d'ozone. Attention toutefois à ce terme qui fait imaginer une couche massive d'ozone pur située en altitude. En réalité, il s'agit d'une zone de l'atmosphère enrichie en ozone sans que celui-ci soit pour autant un composant majoritaire.

Néanmoins, cet ozone stratosphérique absorbe, lui aussi par photodissociation, une grosse partie des rayonnements ultraviolets du rayonnement solaire (le reste des UV-C, quasiment tous les UV-B et une partie des UV-A). La couche d'ozone absorbant les plus dangereux des rayons UV, elle en protège donc les êtres vivants. Après sa photodissociation, l'ozone stratosphérique redonne un O_2 et un oxygène atomique pouvant réagir pour reformer soit de l'O_2, soit à nouveau de l'O_3. L'ozone est donc en permanence créé et détruit dans la stratosphère.

CO_2 atmosphérique et cycle du carbone

À l'heure actuelle, le CO_2 ne constitue plus que 0,03 % des gaz atmosphériques. Cependant, ce n'est pas parce que sa teneur est faible dans l'atmosphère qu'il ne joue pas un rôle important. Nous allons examiner les échanges qui ont lieu entre l'atmosphère et les autres enveloppes de la Terre et qui aboutissent à faire varier la concentration de CO_2 atmosphérique. L'ensemble de ces échanges constitue ce que l'on appelle le cycle du carbone. Attention : on parle bien de cycle du carbone et pas de cycle du CO_2, parce que le CO_2 atmosphérique peut être transformé en d'autres espèces chimiques carbonées à la suite de son passage dans une autre enveloppe terrestre.

Voici une représentation simplifiée de ce cycle, valable à notre échelle de temps humaine et pas géologique. Les chiffres sont donnés en Gigatonnes (Gt, soit un milliard de tonnes) de carbone. Il est important de se rendre compte qu'il s'agit d'estimations et il faut comparer les ordres de grandeur des chiffres plus que les chiffres eux-mêmes.

De manière très résumée, on peut dire que du carbone est échangé entre l'atmosphère et trois réservoirs principaux : les êtres vivants (la biosphère), les océans (l'hydrosphère) et certaines roches (présentes dans la lithosphère) qui constituent le gros du stock de carbone. Les échanges (ou flux) sont grossièrement à l'équilibre entre la majorité des réservoirs, les phénomènes retirant ou injectant du CO_2 dans l'atmosphère se compensant approximativement.

Cependant, il existe une exception majeure : à l'heure actuelle, le flux de carbone est beaucoup plus important depuis le réservoir des roches carbonées (gaz naturel, pétrole et charbon) vers l'atmosphère que dans le sens inverse. En effet, ces roches constituent nos principales sources d'énergie aujourd'hui. Et nous en utilisons bien plus que la quantité qui se renouvelle naturellement. Cela signifie d'une part que ces sources d'énergies sont non renouvelables à notre échelle de temps humaine (et qu'il faudra bien utiliser autre chose quand il n'y en aura plus), et d'autre part que nous sommes en train d'injecter dans l'atmosphère de grandes quantités de CO_2, originellement prisonnier de la lithosphère sous une autre forme. Les conséquences de ce phénomène seront analysées dans le chapitre suivant.

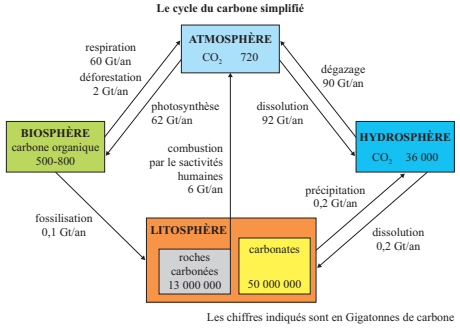


Figure 4. Le cycle du carbone.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• Le recul de l'Amazonie, moteur du réchauffement p. 18
(Claire Gatinois, dans *Le Monde* daté du 26.11.2015)

ZOOM SUR…

RAYONS UV, ADN ET COUCHE D'OZONE

Les rayons ultraviolets (UV) sont un type de rayonnement électromagnétique. Leur longueur d'onde est comprise entre 400 et 100 nm, ce qui les place dans le spectre des rayonnements électromagnétiques entre la lumière visible et les rayons X. Du fait de leur faible longueur d'onde, ce sont des rayonnements assez énergétiques et ils peuvent endommager les molécules qu'ils rencontrent comme l'ADN des êtres vivants. Le plus souvent, les rayons UV causent des mutations à l'ADN en soudant deux bases azotées thymine ensemble, formant ce qu'on appelle un dimère de thymine. Les mutations de l'ADN peuvent causer des malformations embryonnaires, des cancers ou même tuer les cellules touchées si elles sont trop nombreuses. Plus la longueur d'onde des UV est faible, plus ils sont énergétiques et plus ils sont dangereux. On distingue donc trois catégories d'UV : les UV-A (longueur d'onde 315 à 400 nm) qui sont les moins dangereux mais quand même cancérigènes, les UV-B (280 à 315 nm) dangereux et les UV-C (100 à 280 nm) très dangereux. Seuls les UV-A et les moins énergétiques des UV-B du rayonnement solaire parviennent jusqu'à la surface de notre planète, les plus dangereux des UV-B et les UV-C étant absorbés par l'atmosphère et notamment par la couche d'ozone. C'est ce qui rend la vie terrestre possible ! C'est pour cette raison qu'un accord international (le protocole de Montréal) a été conclu pour limiter voire éliminer la production de certains gaz (notamment certains appelés les CFC) dégradant la couche d'ozone (ce qu'on a appelé le « trou de la couche d'ozone »). Il s'agit à l'heure actuelle du principal accord international environnemental qui a réellement été couronné de succès, le taux atmosphérique des gaz destructeurs d'ozone ayant fortement diminué et la couche d'ozone elle-même semblant en voie de se reconstituer.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La complexité du système climatique

Ce chapitre présente un certain nombre d'éléments fondamentaux sur le climat de notre planète. Une première partie définit le *climat*, présente en quoi consiste la *climatologie*, tout en expliquant en quoi celle-ci diffère de la *météorologie*, un autre domaine scientifique avec lequel elle est souvent confondue. Une deuxième partie expose nos connaissances sur le réchauffement climatique actuel, notamment sur ses causes. Enfin, une dernière partie évoque les nombreux facteurs qui amortissent ou amplifient ce réchauffement climatique.

Climat, climatologie et météorologie

Le climat est défini comme l'état des conditions de l'atmosphère, dans un endroit donné, pendant une période de temps assez longue. Les conditions atmosphériques associées à un climat donné, bien que variables d'année en année, sont relativement constantes. Il s'agit de : la température, la pression atmosphérique, le degré d'hygrométrie, la pluviométrie, la nébulosité, la vitesse et la direction des vents.

On distingue les climats locaux (que l'on peut définir sur des échelles géographiques variées, allant de quelques mètres pour les microclimats à des milliers de kilomètres pour les climats régionaux) et le climat global qui est celui régnant à l'échelle de la planète entière.

La science qui étudie le climat est la climatologie. Elle analyse les variations des conditions atmosphériques et cherche à les expliquer sur de longues périodes de temps, pluriannuelles, séculaires, millénaires voire plurimillénaires.

Elle se distingue de la météorologie qui étudie, elle, comme son nom l'indique, les météores (de l'ancien français *metheores*, « phénomène qui se passe dans l'atmosphère »). Les météores sont, au sens large, les phénomènes atmosphériques, ce qui peut englober aussi bien les météorites que les éclairs, les nuages ou le vent. Concrètement, la météorologie se concentre sur ces derniers phénomènes et cherche à les expliquer et, souvent, à prédire leur apparition et leur évolution. Elle a donc un aspect plus concret et plus directement utilisable que la climatologie. De plus, la météorologie concerne des échelles de temps beaucoup plus courtes, typiquement de l'ordre du jour ou de la semaine.

Le réchauffement climatique et ses causes

La température moyenne globale de la Terre a augmenté d'environ 1 °C depuis un siècle et demi. Cette augmentation, unique dans l'histoire de la Terre par sa rapidité, est ce que l'on appelle le réchauffement climatique.

Le réchauffement climatique est dû à une augmentation de l'effet de serre sur notre planète. Celui-ci est directement lié à l'existence d'une atmosphère sur la Terre. D'ailleurs, il est également observé sur les autres planètes du système solaire dotées d'une atmosphère (comme Vénus et Mars), alors qu'il est inexistant sur des corps qui en sont dépourvus, comme la Lune.

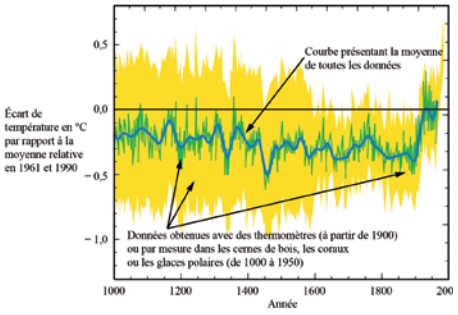


Figure 1. Variation de la température globale terrestre depuis 1 000 ans.

Il est à noter que l'expression « effet de serre », bien qu'extrêmement utilisée dans le langage courant, est assez malheureuse, puisque le réchauffement observé dans une serre que peu souvent provoqué par cet effet. De manière plus rigoureuse, on préfère parler de *forçage radiatif*.

MOTS-CLÉS

RAYONNEMENT THERMIQUE : rayonnement émis par un « corps chaud », c'est-à-dire un corps dont la température n'est pas au zéro absolu (-273°C) et qui possède donc une certaine agitation thermique. Dans la gamme de températures qui nous est usuelle, ce rayonnement est invisible, car il est constitué de rayons infrarouges. La longueur d'onde de ce rayonnement est d'autant plus faible que la température d'un corps est élevée : nos yeux, sensibles à la lumière visible, commenceront à distinguer une partie de ce rayonnement (d'abord sous la forme d'un rougeoiement) lorsque la température se mettra à dépasser 700 °C environ.

INLANDSIS : énorme glacier d'échelle continentale, de plusieurs kilomètres d'épaisseur. Il en existe actuellement deux, celui du Groenland et le plus grand, celui de l'Antarctique.

BANQUISE : glace qui se forme en mer lorsque l'eau des océans gèle.

ALBÉDO : capacité d'une surface à réfléchir la lumière. Un albédo de 1 correspond à une capacité à réfléchir la totalité de la lumière incidente (miroir parfait). Un albédo de 0 correspond à une absorption totale de la lumière et donc à une absence complète de lumière réfléchie (corps noir parfait).

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

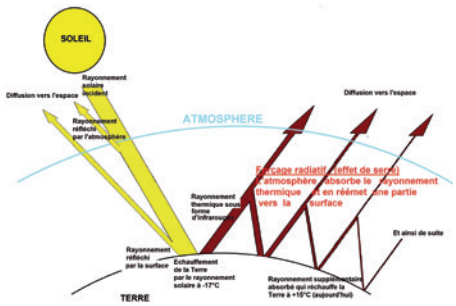


Figure 2. Le forçage radiatif (ou effet de serre).

La Terre reçoit, comme les autres corps du système solaire, de l'énergie du Soleil sous forme d'un rayonnement électromagnétique, notamment dans le domaine de la lumière visible.

En l'absence d'atmosphère, la Terre en réfléchirait une partie mais absorberait le reste, ce qui l'échaufferait à une température moyenne que l'on peut estimer à environ –17°C (à comparer avec les températures dans l'espace où il n'y a presque rien à chauffer et qui vont très approximativement de –270°C à –170°C Cette chaleur serait ensuite réémise vers l'espace sous forme de rayons infrarouges (qui sont la gamme de longueurs d'onde du rayonnement thermique d'un corps étant à cette température).

En revanche, l'atmosphère absorbe le rayonnement thermique infrarouge de la Terre. Échauffée, elle réémet elle-même un rayonnement thermique infrarouge dans toutes les directions. La moitié de ce rayonnement est donc perdu en direction de l'espace. Cependant, l'autre moitié est renvoyée en direction de la Terre et contribue de nouveau à son réchauffement, avant d'être réémise elle aussi sous forme d'infrarouges. L'atmosphère va la réabsorber, la réémettre pour moitié vers l'espace et pour moitié de nouveau vers la Terre. Et ainsi de suite.

En quelque sorte, l'atmosphère force une partie du rayonnement infrarouge à ricocher, ce qui élève la quantité d'énergie reçue par la surface terrestre. Celle-ci est ainsi bien plus réchauffée : +15°C en moyenne à l'heure actuelle, au lieu des –17°C attendus.

Un point important est que tous les gaz de l'atmosphère ne sont pas responsables du forçage radiatif, car tous n'absorbent pas les infrarouges. Les gaz concernés sont appelés gaz à effet de serre (GES). Ce sont principalement, par ordre décroissant de contribution à l'effet de serre dans l'atmosphère terrestre actuelle, la vapeur d'eau (H_2O à l'état gazeux, 60 %), le dioxyde de carbone (CO_2, 26 %), l'ozone (O_3, 8 %), le méthane et le protoxyde d'azote (CH_4 et N_2O, 6 % à eux deux). Il faut souligner que tous ces gaz sont présents naturellement dans l'atmosphère.

Cependant, les teneurs de certains d'entre eux (CO_2, CH_4 et N_2O) ont drastiquement augmenté depuis le début de l'ère industrielle (début du XIXe siècle environ), comme le montrent les dosages de l'air des bulles prises dans les glaces anciennes. La conséquence directe est une augmentation du forçage radiatif et donc de la température globale.

Les facteurs modulateurs du réchauffement climatique

Les facteurs modulateurs du réchauffement climatique sont des phénomènes qui n'en sont pas à l'origine, mais qui, soit l'amortissent, soit l'amplifient.

Les principaux amortisseurs du réchauffement climatique sont les océans. En effet, ils absorbent non seulement une part importante de la chaleur excédentaire mais également une part du CO_2 atmosphérique : celui-ci y passe sous forme dissoute (voir schéma du cycle du carbone du chapitre précédent). Cet effet amortisseur n'est cependant pas sans conséquence.

Tout d'abord, l'augmentation de la température des océans (dans les faits, surtout le premier kilomètre près de la surface) entraîne une augmentation de leur volume par dilatation thermique : elle est la principale responsable de l'augmentation du niveau marin, évaluée à un peu moins de 20 cm depuis 1880. Contrairement à une idée répandue, la fusion des glaces continentales n'a pour l'instant que peu contribué à cette hausse, car l'essentiel de celles-ci – les inlandsis (glaviers de grande étendue et de grande épaisseur) du Groenland et de l'Antarctique – n'a pas encore été trop affecté par le réchauffement climatique. Quant à la fusion de la banquise, elle n'a quasiment aucun impact sur le niveau des océans.

D'autre part, l'absorption de CO_2 par les océans conduit à leur acidification, ce qui a un impact sur la vie marine, comme en témoignent le blanchiment et la mort massive des coraux.

Il existe également des effets amplificateurs du réchauffement climatique.

D'une part, la hausse des températures entraîne une évaporation plus importante de l'eau océanique et donc une augmentation des teneurs en vapeur d'eau (qui est un important GES) dans l'atmosphère.

D'autre part, la fonte des surfaces englacées, si elle n'a que peu d'impact sur le niveau de la mer, entraîne une diminution de l'albédo terrestre. La Terre, devenant moins réfléchissante, absorbe plus de rayonnement solaire, ce qui la réchauffe et provoque une accentuation de la fonte des glaces. C'est un cercle vicieux.

Enfin, l'augmentation de la température entraîne un dégel du permafrost (sols normalement gelés toute l'année), qui contient beaucoup de matière organique. Cette matière organique, une fois dégelée, va être transformée par fermentation en CO_2 et en méthane (qui sont tous deux des GES), dont la teneur augmentera donc dans l'atmosphère.

ZOOM SUR…

PRESSION ATMOSPHÉRIQUE, DEGRÉ D'HYGROMÉTRIE, PLUVIOMÉTRIE, NÉBULOSITÉ

La pression atmosphérique est la pression exercée par l'atmosphère, du fait de sa masse. Elle se mesure avec un baromètre et s'exprime aujourd'hui en hectopascals (hPa). Sa valeur moyenne au niveau de la mer est, très approximativement, de 1 000 hPa. De basses pressions correspondent généralement à un air montant (et donc, « pesant moins » sur ce qui est en dessous), alors que de hautes pressions indiquent que l'air est en train de descendre (et « appuie » plus sur la surface de la Terre en dessous).

De manière simplifiée, le degré d'hygrométrie (ou humidité relative) représente la saturation de l'air en vapeur d'eau. Il se détermine avec un hygromètre et est exprimé en %. Un air à 0 % d'humidité est totalement sec ; un air à 100 % contient le maximum de vapeur d'eau qu'il peut emmagasiner (cette teneur varie notamment en fonction de la température de l'air).

La pluviométrie est l'évaluation de la quantité des précipitations, c'est-à-dire de la quantité d'eau qui tombe depuis l'atmosphère, sous forme de pluie ou de neige. Elle se mesure avec un pluviomètre (qui est un simple récipient gradué) et s'exprime généralement en mm d'eau tombée par m^2 par an, souvent abrégé en mm de précipitations. La pluviométrie en climat très aride (désertique, par exemple) est de quelques centaines de mm/an, alors qu'elle est généralement de plus de 8 000 mm/an sous un climat équatorial humide.

La nébulosité est une estimation de l'ennuagement du ciel. Elle est déterminée par un observateur qui l'estime en unités appelées octa : 1 octa correspond à un huitième du ciel occupé par des nuages. Un ciel parfaitement dégagé aura donc une nébulosité de 0 octa et un ciel totalement nuageux en aura une de 8 octas.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le climat du futur

Les nombreux modèles climatiques numériques sont basés sur des mesures et sur des calculs physiques, chimiques et biologiques. Ils prennent aussi en compte les activités humaines. Ils prédisent tous une évolution de la température moyenne entre 1,5 et 5 °C d'ici à la fin du XXIe siècle. Cette augmentation est directement dépendante du niveau de concentration des gaz à effet de serre. Quelles seront les conséquences des activités humaines sur l'évolution actuelle du climat, enjeu majeur pour l'avenir de la planète ?

Les modèles climatiques

Les modèles climatiques simulent l'atmosphère et son évolution. Vu la complexité du système climatique, il est impossible de le simuler analogiquement, c'est à dire avec des sortes de maquettes reproduisant la réalité. On utilise donc des programmes informatiques de simulation numérique.

Dans les faits, on met en équations le système climatique selon les lois physiques connues : on choisit les paramètres essentiels qui le caractérisent (température, précipitations, etc.) et on décrit mathématiquement leurs interactions et ce qui contrôle leur évolution. Une simulation est ensuite obtenue à partir de ces données, grâce à un très gros programme informatique. Comme on ne peut pas résoudre les équations à l'échelle de l'atmosphère entière, on découpe celle-ci en de nombreux petits volumes : on réalise ce que l'on appelle un maillage, car ça ressemble à ce que l'on obtiendrait si on entourait la Terre avec un (gros) filet de pêche (en 3 dimensions). Chaque « petit » volume fait ainsi typiquement 200 km × 200 km × 1 km. Un ordinateur résout ensuite les calculs au sein de chaque volume et sur une durée de temps déterminée (par exemple, mois par mois pendant 10 ans). On obtient ainsi une simulation numérique du climat.

Mais attention : l'atmosphère n'étant pas isolée des autres enveloppes terrestres (hydrosphère, biosphère, lithosphère), sa modélisation est couplée à celle des autres enveloppes.

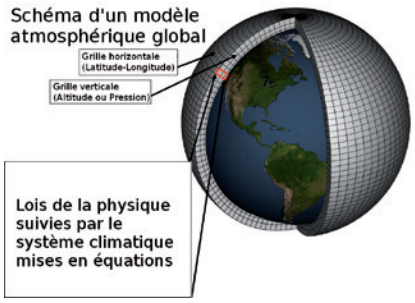


Figure 1. Schéma d'un modèle climatique et de son maillage (Source : Wikimedia).

Afin de vérifier que les modèles climatiques décrivent correctement le climat et son évolution – et donc que les simulations obtenues sont valables –, on confronte les résultats de ces dernières aux mesures et observations effectuées « en vrai ». Ainsi, les modèles climatiques sont utilisés depuis des décennies (les premiers datent des années 1960) et ont été validés et affinés au fil du temps.

L'un des grands intérêts de ces modélisations est qu'elles permettent de réaliser des projections climatiques, c'est-à-dire de simuler le climat du futur. On fixe des paramètres correspondant à la situation actuelle, puis on calcule ce que serait le climat dans 10, 50, 100 ans. On peut ainsi comparer l'évolution du climat en fonction de plusieurs scénarios.

Ce que nous apprennent les modèles : impact de l'humanité sur le climat et prévisions pour le futur

Le réchauffement climatique qui se produit actuellement est unique par sa rapidité. De nombreuses méthodes, comme la glaciologie – l'étude des glaces – ou la paléopalynologie – l'étude des pollens – nous fournissent des

ZOOM SUR…

LES APPORTS DE LA GLACIOLOGIE À LA CONNAISSANCE DES CLIMATS DU PASSÉ

Pour connaître les climats du passé, on utilise plusieurs méthodes, très différentes, dont on compare les résultats afin d'obtenir des résultats fiables.

Une méthode très utilisée – car donnant des résultats très précis – est l'étude des anciennes glaces des inlandsis du Groenland ou de l'Antarctique : les couches les plus profondes de ces immenses glaciers de la taille d'un continent et pouvant faire plusieurs kilomètres d'épaisseur ont plusieurs centaines de milliers d'années. En effet, la glace est formée à partir des précipitations qui, elles-mêmes, proviennent de l'évaporation de l'eau océanique. Or, l'atome d'oxygène de la molécule d'eau existe naturellement sous deux formes (appelées isotopes), l'une composée de 8 protons et 8 neutrons, l'oxygène 16 (^{16}O) et l'autre, beaucoup plus rare et plus lourde, composée de 8 protons et 10 neutrons, l'oxygène (^{18}O). Il va se produire ce que l'on appelle un fractionnement isotopique : les molécules d'eau comportant un ^{18}O, plus lourdes que celles comportant un ^{16}O, vont s'évaporer moins facilement et se retrouver en proportion plus faible dans l'eau des nuages que dans l'eau des océans. Ces molécules plus lourdes vont également avoir tendance à tomber plus facilement (avec les précipitations), avant d'avoir le temps d'arriver à des latitudes élevées et de participer à la formation de la glace en Arctique et en Antarctique. Le résultat est que cette glace est appauvrie en ^{18}O, et ce d'autant plus que la température globale est basse.

On prélève donc des glaces de différents âges, on y mesure le rapport $^{18}O/^{16}O$, ce qui permet d'établir un indice, le $\delta^{18}O$ (delta O 18). La valeur de ce $\delta^{18}O$ dans chaque échantillon de glace permet ainsi de connaître la température qui régnait au moment où il s'est formé.

Une technique similaire porte sur les isotopes de l'hydrogène : son isotope lourd étant appelé deutérium, l'indice utilisé s'appelle le delta deutérium (δD).

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

informations précieuses sur les variations du climat par le passé, notamment au cours du dernier million d'années.

On sait donc que le réchauffement climatique actuel ne fait pas partie des variations climatiques « habituelles » dues aux modifications cycliques des paramètres astronomiques de la Terre qui font varier l'insolation.

Les modèles numériques permettent d'aboutir au même constat et confirment que notre espèce est responsable de ce réchauffement, notamment à cause de ses émissions de gaz à effet de serre (GES).

Le principal GES produit par les activités humaines est le dioxyde de carbone (CO_2) : il est responsable à lui seul d'environ 60 % de l'effet de serre supplémentaire depuis 1750 (on parle alors de « contribution anthropique » à l'effet de serre). Sa teneur a augmenté d'environ 30 %, passant de 0,028 % à 0,04 %. (Ces données ont été obtenues grâce aux dosages réalisés dans les bulles d'air emprisonnées dans les glaces anciennes du Groenland ou de l'Antarctique).

La principale source humaine de production de CO_2 est, de loin, la combustion des hydrocarbures d'origine fossile (gaz, pétrole, charbon). Les autres activités qui entraînent un dégagement important de CO_2 sont la déforestation (on brûle ou laisse se décomposer du carbone organique, ce qui le transforme en CO_2) et la production de ciment (en cuisant à haute température des argiles et du calcaire, on libère du CO_2 en plus de consommer beaucoup de combustibles fossiles).

Le second GES important d'origine humaine est le méthane (CH_4) : il est responsable d'un peu plus de 30 % de la contribution anthropique à l'effet de serre. Sa teneur dans l'atmosphère est très faible, mais sa capacité à « générer » un effet de serre est 23 fois celle du CO_2. Sa teneur dans l'atmosphère a presque triplé depuis 1750. La principale source humaine de production de CH_4 est constituée par les fuites de gaz naturel (essentiellement du méthane, environ 20 % des émissions totales), suivie par l'élevage des bovins, ovins et caprins (environ 15 % en raison de la rumination) et la fermentation dans les décharges (environ 12 %) ainsi qu'au fond des rizières (environ 5 %).

Enfin, le troisième principal GES produit par l'humanité est le protoxyde d'azote (N_2O), responsable d'environ 5 % de la contribution anthropique à l'effet de serre. Sa teneur dans l'atmosphère est extrêmement faible, mais il est 300 fois plus « puissant » que le CO_2 pour produire un effet de serre. Sa teneur dans l'atmosphère a augmenté de 20 % depuis 1750. Il provient principalement de la dégradation des engrais azotés, très utilisés en agriculture et au cours de processus industriels comme la fabrication de certains plastiques.

Les prévisions des modèles climatiques s'accordent sur une augmentation de la température de 1,5 à 5 °C d'ici à la fin du siècle.

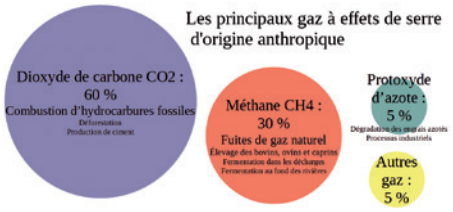


Figure 2. Les principaux gaz à effet de serre d'origine humaine et leurs sources.

Une augmentation de 1,5 °C correspond à un scénario où les émissions humaines de GES seraient immédiatement limitées. Une augmentation de 5 °C correspond à un scénario où l'augmentation des émissions se poursuivrait.

Les conséquences prévisibles du réchauffement climatiques sont nombreuses : une élévation du niveau marin pouvant atteindre un mètre, une augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes (pluies diluviennes, tornades, etc.), une acidification des océans (à cause de l'augmentation de la dissolution de CO_2 dans l'eau des océans) et un impact majeur sur tous les écosystèmes.

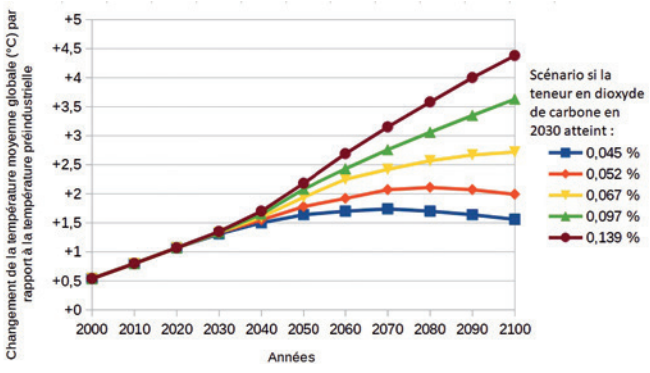


Figure 3. Différents scénarios d'évolution de la température globale d'ici à 2100, en fonction de l'évolution de la teneur atmosphérique en CO_2 (Ce schéma est une illustration mais ne représente pas le résultat de simulations rigoureuses).

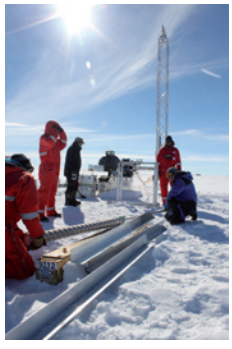


Figure 4. Des glaciologues et leur matériel de prélèvement de glace au Groenland.

LE GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT (GIEC)

Le GIEC est un organisme international créé en 1988 afin « d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordres scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation ». Il est composé de scientifiques et de représentants de nombreux États, et travaille sous l'égide de l'Organisation des Nations Unies (ONU). Le GIEC ne fait pas lui-même de recherches scientifiques sur le climat, mais sa mission est de synthétiser les résultats obtenus dans le monde entier, afin d'informer les décideurs et les citoyens des connaissances actuelles sur le réchauffement climatique et de présenter des scénarios sur les futurs possibles. Il produit pour cela régulièrement des rapports qui portent chacun sur un aspect particulier (en 2019, l'une des publications portait spécialement sur les océans et la cryosphère (les glaces) dans le contexte du réchauffement climatique).

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Énergie, choix de développement et futur climatique

Peut-on encore sauver la planète ?

Une consommation d'énergie inégale selon les pays

La consommation d'énergie diffère de manière très significative selon les régions du monde. Son importance est directement liée au nombre de consommateurs et au PIB par habitant du pays. Et si la croissance mondiale de la consommation d'énergie est un phénomène global – celle-ci a doublé ces 40 dernières années – elle suit la courbe de l'évolution du nombre d'individus et celle de la croissance (richesse) de chaque pays. À titre d'exemple, la consommation totale d'énergie en France est restée globalement stable depuis les années 1990, avec une augmentation de sa population de moins de 10 millions d'habitants et une croissance du PIB par habitant inférieur à 2 % en moyenne annuelle. En Chine, en revanche, où le PIB par habitant a considérablement augmenté (d'un facteur 20 environ) ainsi que sa population – frôlant aujourd'hui 1,4 milliard, soit une augmentation de 300 millions habitants en 30 ans –, la consommation totale d'énergie est passée de 700 millions de tep (tonnes d'équivalent pétrole, utilisée pour exprimer dans une unité commune les différentes sources d'énergie) à plus de 2000 aujourd'hui.

Les sources d'énergie disponibles

L'énergie utilisée par les humains dans le monde provient d'une diversité de ressources disponibles : les énergies primaires. Celles-ci sont disponibles sous la forme de flux (flux radiatif solaire, flux hydraulique, éolien et biomasse) et sous la forme de stocks (uranium et combustibles fossiles). La plupart de l'énergie consommée dans le monde est issue des combustibles fossiles : gaz naturel, tourbe, hydrocarbures et charbon. Ils sont utilisés notamment pour produire de l'électricité mais également pour générer de l'énergie mécanique, indispensable par exemple pour le fonctionnement des voitures à essence. En France, le nucléaire représente environ 77 % de l'électricité produite.

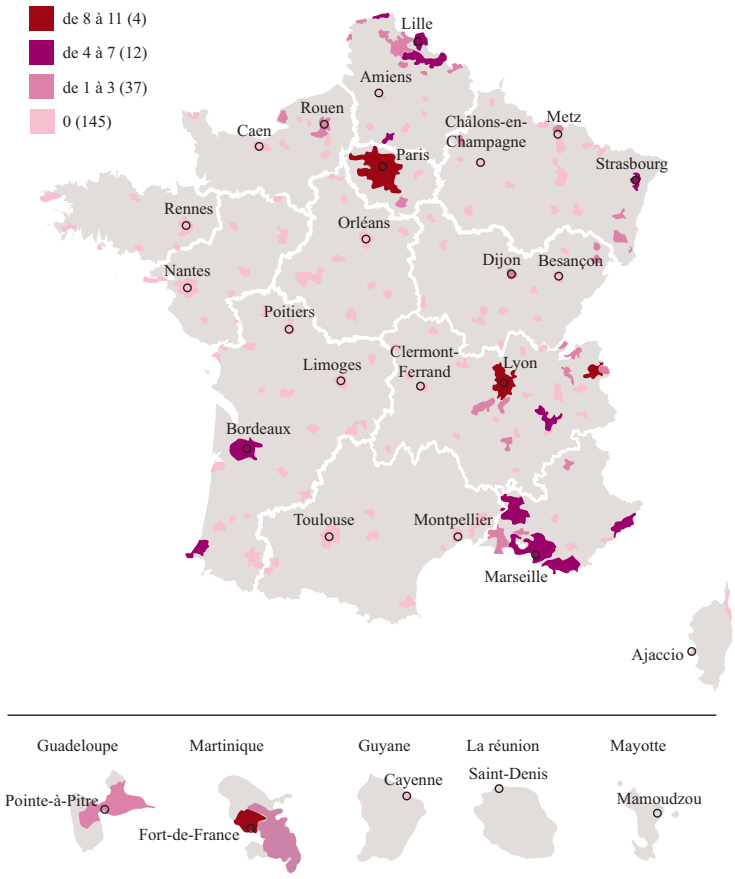


Figure 1. Particules fines en France.

L'utilisation des combustibles fossiles et ses conséquences sur la santé

Aujourd'hui, ces énergies non renouvelables représentent plus de 80 % de l'ensemble des sources d'énergies primaires utilisées dans le monde (mix énergétique mondial). Dans les énergies renouvelables,

MOTS-CLÉS

PIB PAR HABITANT : Le produit intérieur brut (PIB) par habitant reflète principalement le niveau d'activité économique d'un pays.
1 tep ≈ 4,1868.10 10 J

ÉNERGIE PRIMAIRE : Source d'énergie issue directement des ressources du milieu et pouvant être exploitée par l'homme. Ainsi l'énergie mécanique d'une chute d'eau, transformée en énergie électrique, puis transportée peut produire chez l'utilisateur : froid, lumière, énergie mécanique, chauffage par exemple.

COMBUSTIBLES FOSSILES : Combustibles riches en carbone issus de la méthanisation d'êtres vivants morts et enfouis dans le sol depuis plusieurs millions d'années : charbon, pétrole, tourbe et gaz naturel.

PARTICULES FINES : Particules dont le diamètre est inférieur à 2,5 micromètres. Elles sont désignées sous le terme de PM2,5 (PM pour Particulate Matter).

TRANSITION ÉCOLOGIQUE : Ensemble de principes et de pratiques dont l'objectif est de réduire la consommation énergétique qui menace les écosystèmes et les conditions de vie de nombreux individus.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

la biomasse et l'énergie hydraulique occupent 12 % de ce mix, tandis que la part du solaire, de l'éolien et de la géothermie représente, malgré une forte croissance observée ces dernières années, seulement 2 %. Outre du CO_2, la combustion de carburants fossiles libère du N_2O, de l'O_3, des produits soufrés et des particules fines qui affectent la qualité de l'air respiré et les voies respiratoires qui y sont directement exposées.

Les particules fines sont appelées PM2,5, en raison de leur diamètre inférieur à 2,5 micromètres. Une taille infime qui leur permet, en cas d'inhalation, de pénétrer jusqu'au niveau des alvéoles pulmonaires. L'Organisation mondiale de la santé (OMS) estime que 1,3 million de décès serait imputable à la pollution de l'air en zone urbaine.

Certaines émissions de particules fines sont d'origine naturelle. Elles proviennent le plus souvent des éruptions volcaniques et de l'érosion du vent. D'autres sont liées à l'activité humaine. Le chauffage (notamment au bois), la combustion de combustibles fossiles (carburants), les centrales thermiques et de nombreux procédés industriels génèrent de grandes quantités d'aérosols. Sur la planète, les aérosols produits par l'homme représenteraient près de 10 % de la quantité totale d'aérosols. L'augmentation de la pollution automobile, l'utilisation de navires marchands ou de ferrys est également en cause.

On utilise de plus en plus souvent l'expression d'« empreinte carbone » quand on cherche à renseigner sur les émissions de CO_2 ou d'autres GES liées à une activité ou l'utilisation d'un bien de consommation.

Les scénarios de transition écologique sont établis à partir d'hypothèses variables de la quantité de GES qui sera émise dans le futur. Les modèles prédictifs s'accordent tous sur le fait que le réchauffement climatique menace les écosystèmes et les conditions de vie de nombreux êtres humains. Les projections fournies par les modèles permettent de définir les risques et les aléas en fonction des régions, d'alerter les populations et d'orienter les prises de décisions des responsables politiques pour une mise en place efficace de cette transition qui implique, quoi qu'il en soit, une baisse significative de la consommation globale d'énergie et une hausse de la performance énergétique des objets que nous utilisons. Mais également des déplacements de populations lorsque celles-ci sont menacées (déplacement de populations dans les zones inondables et utilisation de plants agricoles mieux adaptés au nouvel environnement climatique).

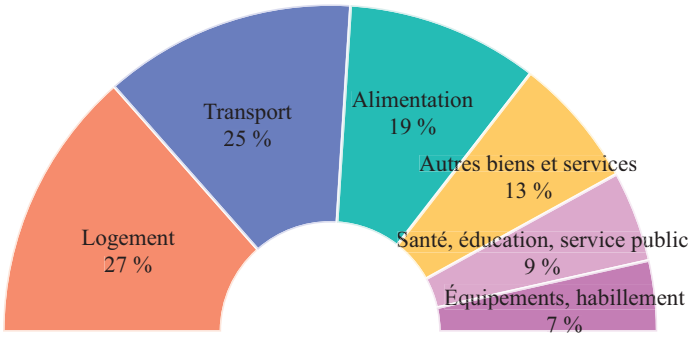


Figure 2. Répartition par poste de consommation de l'empreinte carbone en France.

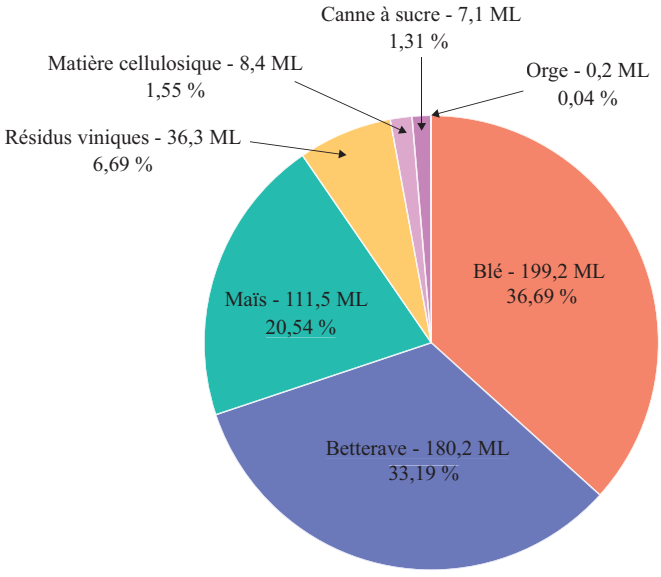


Figure 3. Matières premières de l'éthanol en 2017.

ZOOM SUR…

LES BIOCARBURANTS

« En France, le bioéthanol est utilisé en mélange dans les essences commerciales :

– De manière systématique dans le SP95 (5 %) et le SP95-E10 (10 %)

– À haute teneur dans le carburant superéthanol E85, qui contient entre 65 et 85 % en volume d'éthanol. Ce carburant est disponible en station-service depuis 2007 et est destiné à des véhicules dédiés, appelés véhicules Flex Fuel (ou véhicules à carburant modulable), qui disposent des adaptations nécessaires à l'utilisation du superéthanol E85 (système d'injection, réglages du moteur, compatibilité des matériaux plastiques et des joints, dispositions spécifiques pour assurer le démarrage à froid).

L'usage du supercarburant SP95 contenant 5 % volume d'éthanol ne nécessite aucune adaptation du moteur et du véhicule. Le supercarburant SP95-E10 contenant 10 % en volume d'éthanol peut ne pas être compatible avec certains véhicules anciens du parc roulant en France (mise en circulation avant 2000).

Disponible dans les stations-service depuis le 1er avril 2009, le SP95-E10 est compatible avec près de 90 % des véhicules essence actuellement en circulation et avec tous les véhicules neufs (sauf exception). Pour savoir si votre véhicule est compatible, veuillez consulter la liste de véhicules compatibles avec le supercarburant sans plomb SP95-E10. »

Source : www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biocarburants

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

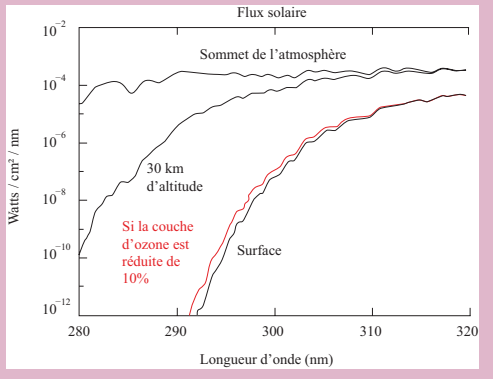
L'atmosphère terrestre et la vie

SUJET

Absorption des rayons UV par l'atmosphère et spectre d'absorption de l'ADN

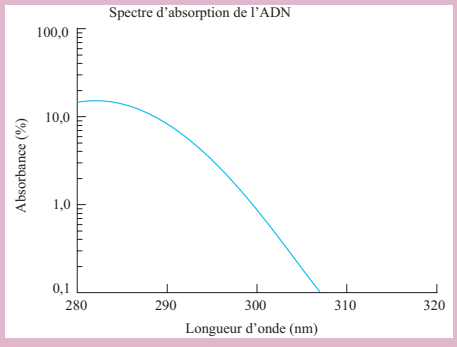
Grâce à de nombreux instruments, appareils de détection au sol, ballons-sondes, satellites, notre atmosphère est scrutée par les scientifiques afin d'en connaître les caractéristiques et l'évolution.

Document 1 - Flux solaire dans le domaine des UV-B (280-320 nm), en haut de l'atmosphère, à 30 km d'altitude et à la surface de la Terre (en noir) et estimation du même flux dans le cas d'une réduction de 10 % de la teneur en ozone stratosphérique (en rouge).



Par ailleurs, en laboratoire, on peut étudier les caractéristiques physiques des molécules et notamment la manière dont elles absorbent ou non certains rayonnements électromagnétiques.

Document 2 - Spectre d'absorption de l'ADN dans le domaine des UV-B.



Questions

À partir de vos connaissances et des informations apportées par les documents, répondre aux questions suivantes :

1. Comparez les trois courbes issues de mesures (en noir) du document 1. Quelles différences observe-t-on en ce qui concerne les rayons UV-B entre le sommet de l'atmosphère et la surface de la Terre ?

2. D'après vos connaissances, que se passe-t-il qui explique ces différences ?

3. Examinez le document 2 et expliquez ce qu'il montre.

4. Grâce à vos réponses aux questions précédentes concernant les documents 1 et 2 ainsi qu'à vos connaissances, justifiez l'estimation (courbe rouge, document 1) faite de la conséquence d'une diminution de la couche d'ozone et expliquez en quoi cette diminution constituerait une menace pour les êtres vivants.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La complexité du système climatique

SUJET

Comparaison de la Terre, la Lune, Vénus et Mars

Le premier satellite artificiel, Spoutnik, a été lancé en 1957. Depuis, de nombreux autres satellites ainsi que des sondes spatiales et des vols habités, ont permis d'en apprendre plus sur notre système solaire. On dispose ainsi de données qui contribuent à une bien meilleure connaissance des corps qui le composent. En voici quelques-unes concernant la Terre, son satellite naturel, la Lune, ainsi que les deux planètes qui lui ressemblent le plus : Vénus et Mars.

Document 1 - Tableau comparatif de quatre corps du système solaire : Terre, Lune, Vénus et Mars.

	Terre	Lune	Vénus	Mars
Distance au Soleil (en UA[1])	1	1	0,7 (a)	1,5 (a)
Surface (en millions de km²)	510	38	460	145
Albédo moyen[2]	0,35	0,15	0,65	0,15
Température d'équilibre[3] (en °C)	-19	-23	-41,3	-62,9
Température moyenne mesurée (en °C)	+15	-23	+462	-63
Atmosphère	Présente : N_2 78 %, O_2 21 %, CO_2 0,03 %	Absente	Présente (9 fois plus dense que sur Terre) : CO_2 96,5 %, N_2 3,5 %	Extrêmement réduite (1 000 fois moins dense que sur Terre) : CO_2 96 %, argon 1,9 %, N_2 1,9 %

(a) Distance rapportée à la distance de la Terre au Soleil

[1] Une unité astronomique (UA) correspond à une fois la distance Soleil-Terre. La quantité de lumière qu'un corps reçoit du Soleil est inversement proportionnellement au carré de la distance entre ce corps et le Soleil.

[2] L'albédo est la capacité d'une surface à réfléchir la lumière. Un albédo de 1 correspond à une capacité à réfléchir la totalité de la lumière incidente (miroir parfait). Un albédo de 0 correspond à une absorption totale de la lumière et donc à une absence complète de lumière réfléchie (corps noir parfait).

[3] La température d'équilibre est la température théorique atteinte en l'absence d'atmosphère.

Questions

1. En prenant la Terre comme point de référence, comparez les températures d'équilibre des 4 corps présentés. Ces températures vous paraissent-elles logiques compte tenu des distances au Soleil, surface et albédo ?

2. Comparez pour chaque corps sa température d'équilibre et sa température mesurée.

3. Proposez, à partir de vos connaissances et des informations apportées par le document, une explication aux différences que vous avez pu, ou non, constater en répondant à la question précédente.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

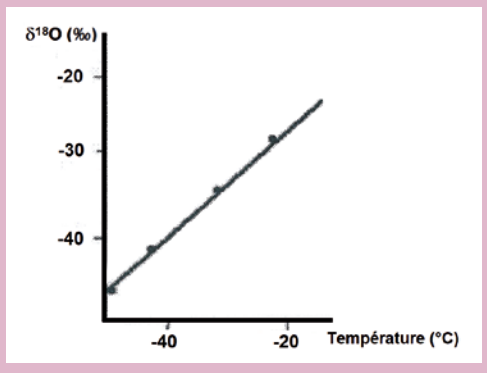
Le climat du futur

$\delta^{18}O$ et reconstitution des variations climatiques passées

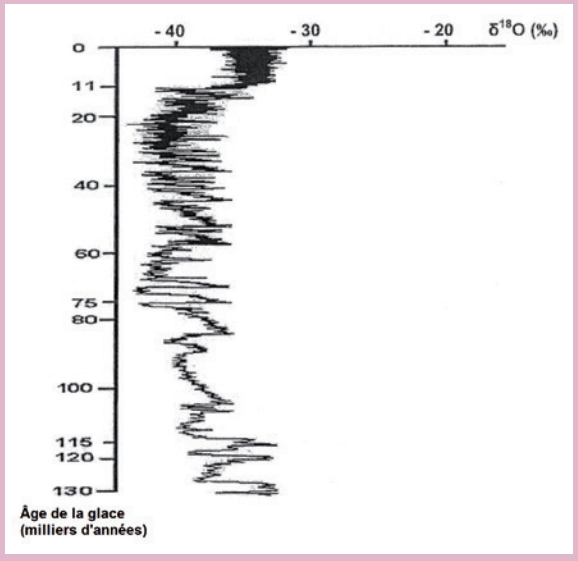
On peut mesurer, dans la glace qui se forme aux pôles, le rapport entre les teneurs en deux isotopes de l'oxygène, l'oxygène 18 et l'oxygène 16, ce qui permet d'établir un indice appelé le $\delta^{18}O$ (delta O 18). Cet indice est intéressant car on peut le mettre en relation avec la température à laquelle la glace s'est formée.

Or, la glace qui forme les inlandsis du Groenland ou de l'Antarctique peut faire plusieurs kilomètres d'épaisseur, et les couches les plus profondes se sont formées il y a des centaines de milliers d'années. En prélevant cette glace ancienne, on peut établir son $\delta^{18}O$ et ainsi reconstituer les variations passées du climat.

Document 1 – $\delta^{18}O$ de précipitations neigeuses actuelles à l'origine de la glace, en fonction de la température, mesuré au Groenland (à latitude constante)



Document 2 – $\delta^{18}O$ dans la glace des 130 000 dernières années, au Groenland



Questions

1. D'après le document 1, comment varie le delta O 18 en fonction de la température dans les précipitations à l'origine de la glace ? Justifiez votre réponse en la chiffrant un minimum.
2. D'après le document 2, quelle est la valeur moyenne approximative du delta O 18 dans la glace du Groenland entre –120 000 et –11 000 ans ? entre –11 000 ans et aujourd'hui ?
3. Mettez en relation vos réponses aux questions 1 et 2 pour donner une estimation de la température qui régnait au Groenland entre –120 000 et –11 000 ans puis de –11 000 ans à aujourd'hui. Indiquez également si chaque période correspond globalement à une période froide (glaciation) ou à une période chaude (interglaciaire).

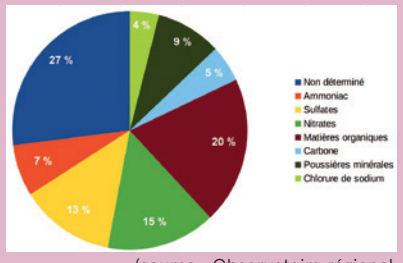
© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Énergie, choix de développement et futur climatique

Document 1 - Extraits de « Tout comprendre à la pollution de l'air aux particules fines », par Audrey Garric, *Le Monde*, le 12/12/2013.

Les particules fines sont présentes naturellement dans l'environnement du fait de l'érosion provoquée par le vent, de tempêtes ou d'éruptions volcaniques. Mais les activités humaines ont considérablement augmenté leur concentration atmosphérique.
Selon le rapport d'avril du Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique (Citepa), les principaux secteurs responsables sont la transformation d'énergie par l'industrie (31 %) ; la combustion de bois pour chauffer les habitations (30 %) ; l'agriculture avec l'utilisation d'engrais (20 %) ; et les transports, du fait notamment de la combustion de diesel (15 %). […] À ces particules considérées comme « primaires » s'ajoutent d'autres, « secondaires ». Dans certaines conditions, des gaz comme l'ammoniac, les oxydes d'azote ou les composés organiques volatils (COV) peuvent se transformer en particules fines dans l'atmosphère.
« La situation climatique est également très importante, prévient Julien Vincent, responsable du département énergie et industrie du Citepa. En cas de grand froid, d'absence de vent ou d'anticyclone, l'air ne se renouvelle pas, augmentant les taux de particules en suspension. »
Les particules fines étant en suspension dans l'air, il y a un risque constant de les inhaler. Deux catégories de particules sont particulièrement encadrées par les normes de qualité de l'air : les PM10 (*particulate matter* en anglais), de diamètre inférieur à 10 micromètres (ou 10 µm, soit 10 millièmes de millimètre) et les PM2,5, qui mesurent 2,5 microns et peuvent donc facilement pénétrer dans l'organisme.
« Elles sont nocives pour l'organisme, car elles progressent jusqu'au bout des voies respiratoires, atteignent les alvéoles et entraînent des maladies pulmonaires, explique Patrice Halimi. Elles pénètrent ensuite dans la circulation sanguine et provoquent aussi des problèmes cardiovasculaires en bouchant les petits vaisseaux. » La liste des maux est longue : bronchite chronique, asthme, cancer du poumon, accident vasculaire cérébral, infarctus du myocarde ou encore problèmes placentaires.
En octobre, la pollution de l'air extérieur a été classée parmi les « cancérogènes certains » pour les humains par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC), une agence de l'Organisation mondiale de la santé. […]
Une étude conduite par le docteur Rob Beelen (université d'Utrecht, aux Pays-Bas), publiée lundi 9 décembre dans la revue médicale *The Lancet*, a conclu qu'une exposition prolongée aux particules fines a un effet néfaste sur la santé, même lorsque les concentrations restent dans la norme de l'Union européenne (de 25 microgrammes par mètre cube d'air). Selon ces travaux, chaque hausse de 5 microgrammes par mètre cube de la concentration en PM2,5 sur l'année augmente le risque de mourir d'une cause naturelle de 7 %.

Document 2 – Composition chimique type des PM10 en milieu urbain (mesures 2008, Île-de-France).



(source : Observatoire régional de la santé d'Île-de-France)

Les poussières minérales et le chlorure de sodium peuvent provenir de la combustion de carburants fossiles ou de bois, mais également d'autres sources comme l'usure des plaquettes de frein des véhicules à moteur, certains procédés industriels ou de travaux publics. Les matières organiques et le carbone ont généralement pour origine la combustion incomplète de divers combustibles. Enfin, ammoniac (NH_3), sulfates (SO_4^{2-}) et nitrates (NO_3^-) entrent surtout dans la composition des particules secondaires qui se forment par cristallisation de divers gaz (azotés et soufrés) émis, eux aussi, lors de la combustion de combustibles fossiles ou de bois, mais également suite à l'épandage d'engrais.

LA BONNE MÉTHODE

Les sujets d'enseignement scientifique sont souvent décomposés en plusieurs petites questions. Cependant, un sujet « de synthèse » peut également être donné.
Pour traiter ce type de sujet, il faut d'abord rappeler la problématique à laquelle on va répondre, puis extraire des documents les informations pertinentes, tout en ajoutant les connaissances qu'on estime nécessaires, et enfin répondre à la problématique.
Attention à deux écueils pour ce sujet !

- D'une part, dans ce sujet précis, il faut éviter d'exploiter les documents les uns après les autres, car chacun d'entre eux comporte des éléments pour répondre à une partie de chaque problématique. Il vaut donc mieux ici progresser en répondant à une partie de la problématique dans un premier temps, puis passer à la deuxième partie seulement ensuite.
- D'autre part, l'un des documents consiste en un texte assez long. Il ne faut pas se contenter de répondre en recopiant des morceaux de phrases tirées telles quelles du texte. Il s'agit de montrer des capacités de synthèse, et il faut donc rédiger ses propres tournures de phrase en limitant les citations directes.

Question

À partir de vos connaissances et des informations issues des documents 1 et 2, présentez dans une synthèse l'origine et les conséquences sur la santé de la pollution aux particules fines. Vous présenterez également ce qui, selon vous, pourrait constituer des pistes pour limiter cette pollution.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le recul de l'Amazonie, moteur du réchauffement

Affaibli par la déforestation, le « poumon de la Terre » a de plus en plus de mal à jouer son rôle de grand régulateur climatique.

Immense, fascinante et inquiétante, la forêt amazonienne est en danger. Depuis des années et pour encore longtemps probablement. Etendue sur 6,5 millions de kilomètres carrés (km²), débordant du Brésil (de l'ordre de 60 % de sa superficie) pour mordre les pays limitrophes (Bolivie, Pérou, Guyane…), le « poumon de la Terre » se désagrège, menacé par l'agriculture intensive et par la construction d'infrastructures pour l'énergie ou les transports.

Au cours des quarante dernières années, 763 000 km² de forêt ont été détruits. Dit autrement, 184 millions de terrains de football ont été rasés depuis les années 1970, soit deux fois la superficie de l'Allemagne. L'équilibre climatique de la planète est en péril. *« Chaque arbre retiré de l'Amazonie se ressent sur le climat »*, expliquait, dans un entretien au *Monde* en novembre 2014, l'agronome Antonio Donato Nobre, chercheur à l'Institut national de recherche spatiale du Brésil (INPE), évoquant le pouvoir équilibrant de cette forêt-continent sur l'écosystème. Selon l'expert, les sécheresses chaque fois plus intenses observées au Brésil seraient directement liées aux dommages causés à la forêt d'émeraude, dans la mesure où les arbres, en dégageant de la vapeur d'eau, maintiennent l'humidité de l'air.

Autre bouleversement : l'efficacité de l'immense puits de carbone que constitue l'Amazonie a chuté de moitié en un peu plus de deux décennies, conduisant les arbres à absorber moins de CO_2. Leur destruction aggrave encore le réchauffement climatique, en entraînant le rejet de gaz à effet de serre.

Monoculture du soja

Ce panorama alarmant doit toutefois être relativisé. Selon les données de l'INPE, le rythme de déforestation a considérablement décéléré. En 2004 disparaissaient dans l'Amazonie brésilienne 27 772 km² de forêt – plus de trois fois la Corse – ; en 2013, le chiffre est 80 % moindre avec 5 012 km² déforestés. Selon Neli Aparecida de Mello-Théry, professeure de gestion de l'environnement à l'université de Sao Paulo, l'arrivée au pouvoir du Parti des travailleurs en 2003, lors de l'élection du président Luiz Inacio Lula da Silva, a contribué à cette légère embellie.

« Le parti voulait être différent des autres », explique-t-elle. La ministre de l'environnement d'alors, Marina Silva – qui a depuis fondé son propre parti écologique –, a fait la chasse aux coupeurs de bois et a contribué à la cohérence des mesures de préservation de l'Amazonie jusqu'alors ponctuelles, avec un plan national de lutte contre la déforestation. L'Acre, Etat dont elle est originaire, montra l'exemple. Tandis que celui du Mato Grosso, où règnent les fazendeiros, ces grands propriétaires terriens, offrait plus de résistance. Diverses initiatives sont aujourd'hui menées pour tenter de fournir aux populations un intérêt économique à éviter la déforestation et à favoriser la reforestation, notamment en soutenant la récolte du caoutchouc et l'agroforesterie, afin d'inciter les populations locales à cultiver la terre de manière plus responsable.

Mais ces démarches restent singulières, et la monoculture extensive du soja, de la canne à sucre et du maïs, moderne et productive (dopée aux pesticides) domine encore. *« Il manque une réelle alternative »*, estime Neli Aparecida de Mello-Théry. Les défenseurs de l'environnement ne digèrent également pas la modification du code forestier brésilien, en 2012, offrant une amnistie à ceux qui déboisent. Un terrible signal qui s'ajoute à l'ombre de Katia Abreu, l'actuelle ministre de l'agriculture brésilienne, proche des gros producteurs, et surnommée « Miss Déforestation » ou « la Tronçonneuse ». ●

Claire Gatinois, dans *Le Monde* daté du 26.11.2015

POURQUOI CET ARTICLE ?

Après la combustion des carburants fossiles, la déforestation est la seconde grande façon dont l'humanité injecte du CO_2 dans l'atmosphère. En effet, la biosphère – et notamment la végétation – constituent aussi un réservoir de carbone même s'il est plus modeste que celui de la lithosphère. Et l'exemple emblématique de la déforestation est bien sûr celui de la forêt amazonienne présenté dans l'article, bien que d'autres forêts équatoriales soient également menacées en Afrique et en Asie.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le permafrost, l'autre menace climatique

Dans l'hémisphère Nord, un quart des terres émergées sont gelées en permanence. Mais le réchauffement climatique entraîne le dégel de ce permafrost, libérant des gaz à effet de serre qui accélèrent le phénomène. Reportage dans l'embouchure de la Léna, en Sibérie.

Naviguer entre les 1 500 îles disséminées dans le delta de la Léna requiert une concentration sans faille, un œil fixé sur le radar du bateau pour éviter les bancs de sable, un autre à l'affût des amers côtiers qui ponctuent cette immensité de terre et d'eau. Avant de se jeter dans la mer des Laptev, au nord de la Sibérie, le fleuve est si large que ses rives dessinent un trait flou sur la ligne d'horizon. L'île de Samoïlov est reconnaissable à la cabane en bois, construite près du rivage, où cohabitent quelques scientifiques et les gardes de la réserve naturelle qui couvre l'embouchure du fleuve et les contreforts des monts Karaoulakh.

Or une lente et irréversible érosion menace de livrer le petit édifice aux flots de la Léna. A terme, c'est l'île elle-même qui pourrait disparaître. Les fortes crues qui suivent la fonte des glaces, au printemps, fragilisent les côtes de Samoïlov. Mais l'îlot de 5 km² pâtit surtout de la dégradation du permafrost sous l'effet du réchauffement climatique. Appelés aussi pergélisol, ces sols dont la couche supérieure dégèle en saison chaude conservent en profondeur une température en dessous de zéro degré pendant au moins deux ans consécutifs.

« L'écosystème de Samoïlov fait face à une potentielle extinction », conclut prudemment un article de la revue *Biogeosciences* consacré à l'étude du site. Pour l'Allemande Julia Boike, qui a coordonné l'étude, et ses collègues de l'Institut Alfred Wegener pour la recherche polaire et marine (AWI), pas question de se résoudre à cette perspective. Chaque année, d'avril à septembre, les chercheurs de l'AWI et leurs partenaires russes de l'Institut de recherche sur l'Arctique et l'Antarctique de Saint-Pétersbourg et de l'Institut Melnikov du permafrost de Iakoutsk se relaient sur Samoïlov afin d'y étudier l'altération des sols sédimentaires, les transformations du paysage et les interactions entre réchauffement du climat et dégel du permafrost.

L'île, équipée d'une station de recherche moderne financée par l'Institut Trofimouk du pétrole, de géologie et de géophysique de Novossibirsk, est un poste d'observation privilégié : le pergélisol occupe 95 % du territoire sibérien et les deux tiers de la superficie russe. À plus large échelle, les sols gelés couvrent le quart de l'hémisphère Nord, principalement en Alaska, au Canada, au Groenland, en Russie et en Chine.

L'Europe occidentale se distingue par un permafrost de type alpin, présent dans plusieurs massifs montagneux. D'une composition et d'une géodynamique différentes de celles de son cousin des hautes latitudes, il est sensible, comme lui, aux variations climatiques. Le 23 août, un glissement de terrain provoqué par le dégel du pergélisol a emporté huit randonneurs près du village suisse de Bondo. *« Le permafrost sibérien est à certains endroits très ancien, pouvant remonter au pléistocène* [– 2,6 millions d'années à – 11 000 ans], avance Julia Boike. *Il est très froid, à une température de – 9 °C environ, et il est très profond. On en a trouvé à près de 1 500 mètres de profondeur dans le nord de la Iakoutie. »*

« À Samoïlov, il a pour autre caractéristique d'être relativement stable et très riche en matières organiques avec la présence de tourbières », ajoute l'enseignante-chercheuse avant d'enfiler d'épaisses bottes en plastique, indispensables pour progresser dans la toundra spongieuse qui domine à la surface de Samoïlov. Les jeunes doctorants qui l'accompagnent, ce matin de septembre, embarquent avec elle pour Kouroungnakh. L'île voisine présente d'imposants complexes de glace et un relief modelé par les thermokarsts, ces affaissements de terrains anciennement gelés.

Les vallées arpentées six heures durant par les chercheurs de l'AWI ruissellent d'eau. *« Nous voulons comprendre si l'eau qui irrigue le terrain provient des précipitations saisonnières ou si elle résulte des blocs de glace qui fondent avec la dégradation des sols »*, explique la géomorphologue Anne Morgenstern, sac à dos rempli d'échantillons d'eau prélevés tout au long du trajet.

Une sorte d'immense congélateur

Le réchauffement du permafrost, en Sibérie comme dans les autres régions où les scientifiques ont déployé leurs instruments de mesures, est avéré. Grâce aux capteurs disposés dans plusieurs puits, forés parfois jusqu'à 100 mètres de profondeur, l'équipe germano-russe de l'expédition Léna a enregistré une augmentation de température de 1,5 à 2 °C depuis 2006. *« On assiste à une réelle tendance au réchauffement dans le sol et à une hausse des températures atmosphériques hivernales,* confirme Julia Boike. *Si le gradient thermique change, c'est toute la balance des flux d'énergie, d'eau, de gaz à effet de serre qui s'en trouve modifiée. »* Un constat préoccupant alors que l'Arctique contribue à la régulation de toute la machine climatique terrestre.

« Le permafrost est un immense congélateur, schématise Torsten Sachs, du Centre de recherche allemand pour les géosciences (GFZ), qui entame sa huitième mission sur l'île. *Si vous laissez la porte du congélateur ouverte, votre pizza dégèle, votre crème glacée fond et les microbes se nourrissent de ces éléments organiques ! »* A défaut de denrées consommables, le pergélisol libère des matières organiques

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

qui, soumises à l'activité microbienne, produisent du CO_2 en présence d'oxygène ou du méthane en milieu anaérobique, à l'instar des tourbières de Samoïlov.

Ces deux gaz à effet de serre (GES) participent à l'élévation de la température qui entretient la destruction du permafrost et le largage de GES. La communauté de la recherche périglaciaire, qui nomme le phénomène « rétroaction liée au carbone du pergélisol », estime que les sols gelés stockeraient 1 500 gigatonnes de carbone, le double de la quantité de carbone dans l'atmosphère.

Dans quelle proportion de dioxyde de carbone et de méthane le carbone relâché par les sols en dégel se fait-il ? Sachant que le méthane crée 25 fois plus d'effet de serre sur un siècle que le CO_2. *« C'est l'un des grands débats à venir »*, confesse Gerhard Krinner, chercheur CNRS à l'Institut des géosciences de l'environnement de Grenoble.

L'inquiétude est d'autant plus forte que les modèles utilisés dans les scénarios du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) n'intégraient pas, jusqu'à présent, ce mécanisme de rétroaction du pergélisol. *« Le réchauffement supplémentaire attribuable au dégel du permafrost est de l'ordre de 10 % »*, avance Gerhard Krinner. Les émissions du permafrost pourraient ainsi faire grimper le thermomètre de 0,3 °C d'ici 2100, en plus du réchauffement projeté par les modèles actuels.

Dans le laboratoire de la station de recherche, maintenue à une température constante grâce à la centrale thermique alimentée par trois gros générateurs au bruit assourdissant, les chercheurs scrutent les courbes de ces gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère. Les pics de méthane se répètent en été, mais l'analyse des données reste un exercice délicat dans ces hautes latitudes. La première période de mesure (2002-2012) s'est faite sans les équipements automatisés dont dispose la base moderne, opérationnelle depuis 2013. Trois ans plus tôt, lors d'une visite à Samoïlov, Vladimir Poutine avait estimé que la coopération germano-russe sur le permafrost méritait des infrastructures plus performantes. Jusque-là, les chercheurs de l'AWI – dont la première mission sur l'île remonte à 1998 – devaient se contenter du strict minimum et se trouvaient contraints de dormir sous des tentes de toile, de se chauffer à partir du bois flotté charrié par la Léna et d'utiliser la cabane des gardes de la réserve comme quartier général.

L'hivernage était alors inenvisageable. *« On ne pouvait tout simplement pas enregistrer de données en hiver,* témoigne Torsten Sachs. *Il aurait fallu alimenter le générateur extérieur de l'époque tous les trois jours, parfois par – 40 °C, en pleine nuit polaire. »* Les autres limites à l'interprétation des données collectées sont plus classiques. Dix ans constitue une période d'étude trop courte pour dégager une tendance de l'évolution des flux gazeux sur le long terme. Il faudrait aussi multiplier les points d'observation, une gageure en Sibérie, dont la superficie équivaut à plus de vingt fois la France.

À bonne distance de la nouvelle station, peinte aux couleurs du drapeau russe, l'équipe de l'AWI achève l'installation d'un « igloo » qui accueillera en 2018 le matériel informatique et électrique de la nouvelle tour météorologique. Le cocon de fibre de verre devrait offrir des conditions d'enregistrement stables, à l'abri des rafales du vent ou des tempêtes de neige qui sévissent pendant l'hiver sibérien. Comme les autres édifices bâtis sur l'île, l'igloo a un socle sur pilotis afin d'absorber les mouvements du terrain. En un an seulement, le terrain s'est affaissé de 10 cm autour des piliers de la première tour météo.

« Qu'il existe une interaction entre réchauffement du climat et dégel du permafrost, cela ne fait plus aucun doute », affirme Peter Schreiber entre deux séances d'assemblage des panneaux de l'igloo. *« La question, désormais, est d'évaluer à quel rythme le permafrost va continuer de se désagréger et comment la nature va réagir à ce processus »*, considère l'ingénieur chargé de la station météo.

La nature reste la grande ordonnatrice face aux bouleversements que subit la Sibérie arctique, estime Fédor Selvakhov. Le chef de la station de recherche veut bien admettre certains changements dans l'environnement qui l'entoure : *« Il y a vingt ans, par exemple, il n'y avait pas un seul arbre dans la région, juste la végétation rase de la toundra. En me déplaçant dans le delta l'année dernière, j'ai vu des arbres de 2 mètres de haut. »* Mais ce Iakoute né au bord de la Viliouï, un affluent de la Léna, ne croit pas aux causes anthropiques du changement climatique. *« C'est le cycle de la nature. Il faisait chaud ici il y a deux cents ans, puis il a fait plus froid, et on assiste aujourd'hui à une nouvelle période chaude »*, soutient-il, à son bureau décoré de fossiles découverts dans les environs.

Défenses de mammouths

Quant au pergélisol, *« il se réchauffe peut-être, mais pas vite »*. *« Lorsque l'on extrait du sol une défense de mammouth, on se rend compte que l'autre extrémité, celle encore prise dans la terre, est toujours gelée. C'est bien le signe que le permafrost demeure très froid »*, argumente le responsable. Conséquence inattendue du dégel des sols du Grand Nord, la chasse aux ossements fossilisés prospère en Sibérie.

Günter Stoof, alias « Molo », comprend la mentalité de ses amis russes. *« C'est la nature qui décide, pas l'homme »*, soutient le technicien de l'AWI qui a séjourné le plus de temps sur Samoïlov. À 65 ans, il jure que cette saison sera la dernière d'une carrière riche de 48 expéditions en Arctique et en Antarctique. Originaire d'Allemagne de l'Est, il a été le plus jeune membre de l'expédition soviétique de près de deux ans (1975-1977) chargée de construire une base en Antarctique. Il a ensuite multiplié les séjours, seul ou en équipe, dans les régions polaires.

Au gré du parcours de Molo, une autre histoire s'esquisse, celle de la coopération entre la RDA et l'URSS pendant la guerre froide. Après la chute du mur de Berlin, un comité scientifique avait été chargé de réfléchir au fonctionnement de la recherche de l'Allemagne réunifiée. Il avait recommandé de maintenir cette expertise polaire et de la structurer autour de l'unité de recherche de l'AWI basée à Postdam. *« On y a retrouvé des spécialistes comme Molo ou Christine Siegert, qui avaient vingt ans d'expérience sur le permafrost par leur travail en commun avec les Russes »*, retrace Anne Morgenstern.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'étude des sols gelés s'est propagée en Russie dès le début du XXe siècle, accompagnant les choix stratégiques de Moscou. La politique d'extension vers les territoires de l'Est et du Nord, riches en hydrocarbures et en ressources minières, ne pouvait se faire sans la construction du Transsibérien. Mais pour mener à bien ce projet titanesque, il fallait d'abord développer une science de l'ingénierie sur le permafrost, omniprésent dans ces régions. Un Institut du permafrost est créé à Moscou à la fin des années 1930, il est déplacé à Iakoutsk en 1960. La grande ville de l'Est sibérien repose intégralement sur des sols gelés. Deux galeries souterraines (à 4 et 12 m de profondeur), creusées sous les fondations de l'institut, offrent un accès « direct » au pergélisol. Les strates sableuses des parois témoignent de l'histoire géologique de la ville, construite sur une terrasse alluviale de la Léna.

De lourdes portes maintiennent la température des galeries sous zéro degré. *« Le dégel du permafrost constitue un danger pour la planète, mais à l'échelle de la Iakoutie, pour le moment, il reste assez stable »*, relativise Mikhaïl Grigoriev, l'un des deux vice-présidents de l'institut, avant d'ajouter : *« Dans d'autres régions, en revanche, les effets du dégel sont plus visibles, notamment à Iamal. »*

Après un été 2016 anormalement chaud, la péninsule de l'ouest de la Sibérie a subi une épidémie d'anthrax – pour la première fois en Russie depuis 1941, selon l'Institut d'épidémiologie de Moscou – provoquée par le dégel du permafrost dans lequel la bactérie était conservée. Le territoire de la Iamalo-Nénétsie a fait également la « une » des médias russes après la découverte de vastes cratères. Ils résulteraient là encore du réchauffement du permafrost. *« La région est riche en gaz. En dégelant, les sols libèrent des bulles gazeuses qui expliquent ces explosions »*, analyse M. Grigoriev.

Aucun phénomène de ce type n'a été, pour l'instant, observé à Samoïlov, ni même en Alaska ou dans le Nord canadien. Un réseau mondial, le Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P), agrège aujourd'hui les informations de plus de 250 sites. Il a pour double objectif de *« mutualiser les connaissances mais aussi valider les nouveaux modèles climatiques »*, résume Hugues Lantuit, chercheur à l'AWI, l'institution référente du réseau.

Un nouveau pan de recherche se développe par ailleurs sur le permafrost alpin. La prochaine Conférence européenne du permafrost, en juin 2018, à Chamonix, devrait permettre un état des lieux de ces travaux, bien avancés en Suisse mais encore embryonnaires en France.

L'érosion côtière et ses impacts économico-sociaux devient un autre sujet de préoccupation, le tiers des côtes du monde entier étant situé dans des zones de pergélisol. En mer des Laptev ou en mer de Beaufort (en Amérique du Nord), l'érosion du littoral atteint à certains endroits plus de huit mètres par an et conduit des communautés villageoises à planifier leur relocalisation. À Samoïlov, la cabane en bois construite près du rivage tient toujours debout. Mais pour combien de temps ?

Simon Roger, dans *Le Monde Science & médecine* daté du 11.10.2017

POURQUOI CET ARTICLE ?

Parmi les effets amplificateurs du réchauffement climatique, on trouve le dégel du permafrost. En effet, comme l'explique cet article, le réchauffement de ces sols normalement gelés en permanence entraîne la libération de deux gaz à effet de serre, le dioxyde de carbone et le méthane. Ce phénomène est donc suivi de près en Sibérie par les scientifiques… et par les « chasseurs » d'os de mammouth.

Climat : le rapport de la dernière chance

Les experts prévoient qu'au rythme de réchauffement actuel le seuil de 1,5 °C sera franchi entre 2030 et 2052.

Y croire encore, envers et contre tout. Et surtout, agir. Même si la bataille est très mal engagée… Un rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), présenté lundi 8 octobre au terme d'une semaine de discussions tendues entre les représentants de 195 Etats, à Incheon (Corée du Sud), entretient l'espoir ténu qu'il reste une chance de limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C par rapport à la période préindustrielle.

Cela, alors même que tous les voyants sont au rouge : une concentration atmosphérique de gaz à effet de serre sans précédent depuis au moins 800 000 ans, des records de température battus année après année, des vagues de chaleur, des pluies diluviennes et des ouragans dévastateurs attestant que le dérèglement climatique est à l'œuvre. Mais cet ultime espoir ne sera préservé, montre le rapport, qu'au prix d'un sursaut international dans la lutte contre le réchauffement.

L'accord de Paris, scellé en décembre 2015 lors de la COP21, prévoit de contenir l'élévation de la température moyenne de la planète *« nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels »*. À la demande des pays les plus vulnérables, comme les nations insulaires menacées de submersion, a été ajoutée la nécessité de poursuivre *« l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C »*. Les Etats ont

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

alors commandé au GIEC un rapport spécial sur *« les impacts d'un réchauffement global de 1,5 °C et les trajectoires d'émissions mondiales de gaz à effet de serre associées »*.

Négociations « rugueuses »

Ce rapport de 400 pages, établi par près d'une centaine d'auteurs de quarante pays sur la base de plus de 6 000 études scientifiques, donne lieu à un « résumé à l'intention des décideurs » d'une vingtaine de pages, destiné à éclairer les gouvernements.

Cette synthèse, qui doit être approuvée ligne à ligne par les représentants des Etats, a été adoptée, à l'unanimité, mais à l'issue de négociations qualifiées par un observateur de *« rugueuses »*, notamment avec la délégation des Etats-Unis et avec celle de l'Arabie saoudite. *« Des reformulations ont été faites, des précisions apportées, mais il y a eu finalement consensus sur les conclusions du rapport »*, indique Valérie Masson-Delmotte, coprésidente du groupe de travail sur les sciences du climat du GIEC.

« Ce rapport [du GIEC] *délivre quatre grands messages,* résume-t-elle. *Le changement climatique affecte déjà les populations, les écosystèmes et les moyens de subsistance. Chaque demi-degré de plus compte et il y a des avantages indéniables à limiter le réchauffement à 1,5 °C plutôt que 2 °C. Ne pas dépasser 1,5 °C n'est pas impossible, mais cela demanderait des transitions sans précédent dans tous les aspects de la société. Enfin, contenir le réchauffement à 1,5 °C peut aller de pair avec la réalisation des objectifs du développement durable, pour améliorer la qualité de vie de tous. »*

Le tableau brossé par le GIEC est sans appel. Depuis l'ère préindustrielle, la température planétaire a déjà augmenté d'environ 1 °C. Il ne reste donc que quelques fractions de degré avant d'atteindre le seuil fatidique de 1,5 °C. Selon les projections des chercheurs, au rythme de réchauffement actuel, ce seuil sera franchi entre 2030 et 2052. Les travaux antérieurs du GIEC indiquaient que, sans inflexion de la courbe des émissions de gaz à effet de serre, la surchauffe pourrait avoisiner 5,5 °C à la fin du siècle.

« Il n'existe pas de trajectoire unique et définitive pour limiter le réchauffement à 1,5 °C », préviennent les experts. Le chemin pour y parvenir est étroit. Deux scénarios principaux sont envisagés. Dans le premier, la hausse de la température est stabilisée à 1,5 °C ou juste en dessous. Dans le second, qui apparaît hasardeux, ce plafond est dépassé vers le milieu du siècle pendant quelques décennies, et redescend à 1,5 °C avant 2100.

Mais il faudrait alors, pour compenser ce dépassement temporaire, recourir ensuite à des *« émissions négatives »*. En clair, extraire du CO_2 de l'atmosphère, par exemple en plantant d'immenses forêts absorbant du carbone, ou en faisant pousser des cultures ensuite brûlées dans des centrales, avec des systèmes de captage et de stockage dans le sous-sol du dioxyde de carbone. Or ces techniques ne sont pas éprouvées à grande échelle et pourraient avoir des conséquences délétères pour les écosystèmes et les ressources naturelles.

Sortie accélérée du charbon

L'un des points forts du rapport est de mettre en évidence la différence d'impacts entre un monde plus chaud de 1,5 °C et de 2 °C, même si ces impacts seront sévères dans l'une et l'autre hypothèses. Ainsi, dans le premier cas, la hausse du niveau des mers à la fin du siècle sera comprise entre 26 cm et 77 cm, soit 10 cm de moins que dans le second cas, ce qui réduira de plus de 10 millions le nombre de personnes exposées à ce risque. Une fonte complète de la banquise arctique en été surviendra une fois par siècle dans le premier cas, une fois par décennie dans le second.

Dans la plupart des régions habitées, l'intensité des vagues de chaleur grimpera de 3 °C dans un cas, de 4 °C dans l'autre. Les précipitations torrentielles seront encore plus importantes avec 2 °C, en particulier dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord, en Amérique du Nord et en Asie.

Deux fois plus d'animaux vertébrés (8 %), trois fois plus d'insectes (18 %) et deux fois plus de plantes (16 %) perdront plus de la moitié de leur aire naturelle de vie dans le second scénario que dans le premier. Entre 70 % et 90 % des récifs coralliens risquent d'avoir disparu à la fin du siècle dans un cas, mais 99 % dans l'autre.

Les pêcheries verront leurs prises annuelles chuter de 1,5 million de tonnes dans le premier cas, de plus de 3 millions de tonnes dans le second. Les grandes cultures céréalières, dont dépend la subsistance de milliards d'individus, seront elles aussi moins affectées par un demi-degré de moins, notamment en Afrique subsaharienne, en Asie du Sud-Est et en Amérique Centrale et du Sud. Et plusieurs centaines de millions de personnes seront moins menacées de sombrer dans la pauvreté.

Pour éviter le pire, calculent les chercheurs, les émissions mondiales de gaz à effet de serre devraient commencer à décroître *« bien avant 2030 »*, en baissant d'ici là de 45 % par rapport au niveau de 2010. Un gigantesque défi, sachant que ces émissions, après deux années de stagnation, sont reparties à la hausse en 2017 et, selon les premières données, atteindront un nouveau record cette année. Une sortie accélérée des énergies fossiles, à commencer par le charbon, est donc indispensable.

« Big bang écologique »

« Nous sommes à la croisée des chemins, souligne Valérie Masson-Delmotte. *Des*

POURQUOI CET ARTICLE ?

Le réchauffement climatique nous amène à élaborer des « scénarios si… ». L'article présente certaines des conséquences que l'on peut anticiper avec deux scénarios :
« si le réchauffement est limité à 1,5 °C » et « si le réchauffement est limité à 2 °C »
d'ici à 2100. On voit qu'une augmentation de « seulement » 0,5 °C de plus serait très loin d'être anodine. Et encore ne s'agit-il là que de deux scénarios relativement optimistes qui supposent une inflexion importante de nos pratiques, à l'échelle de la planète entière.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

mondes à + 1,5 °C ou + 2 °C seront très différents. Contenir le réchauffement exige des actions très ambitieuses dans tous les domaines – énergie, industrie, gestion des terres, bâtiments, transports, urbanisme –, ce qui signifie un changement radical de comportements et de modes de vie. Si nous n'agissons pas d'ici à 2030, la porte se refermera. »

Voilà pourquoi, de son côté, le Fonds mondial pour la nature (WWF) appelle à *« un big bang écologique, pour les décideurs et pour l'humanité tout entière »*. Directrice de Greenpeace international, Jennifer Morgan ajoute : *« Les gouvernements ont demandé ce rapport. Ils doivent agir sur cette base. »*

Ce document viendra nourrir les travaux de la COP 24 qui se tiendra du 3 au 14 décembre en Pologne et qui devra définir le processus de révision des engagements de réduction de leurs émissions pris par les Etats lors de la COP 21 de Paris. Ces engagements – à supposer qu'ils soient tenus – conduisent pour l'instant la planète vers un réchauffement de l'ordre de 3 °C à la fin du siècle. ●

Pierre Le Hir, dans *Le Monde*
daté du 09.10.2018

En Ile-de-France, le retour de la pollution de l'air

La reprise des activités et du trafic automobile entraîne une remontée des polluants.

Sur le front de la pollution de l'air, le monde d'après le Covid-19 risque fort de ressembler au monde d'avant. Un premier bilan post-déconfinement, publié mercredi 10 juin par Airparif, l'organisme chargé de la surveillance de la qualité de l'air en Ile-de-France, montre un retour progressif aux niveaux d'avant la crise sanitaire et laisse augurer que la nette amélioration observée pendant que la France était confinée n'était qu'une respiration éphémère. Des études similaires devraient confirmer ces résultats dans les autres régions dans les prochains jours.

La reprise des activités, et particulièrement du trafic, a conduit à une remontée des quantités de polluants rejetés dans l'atmosphère à des niveaux équivalents à 80 % des émissions observées avant le confinement, analyse Airparif. Et jusqu'à 90 % pour le boulevard périphérique, l'axe le plus emprunté. Ce constat concerne les deux principaux polluants : les oxydes d'azote (NOX), émis principalement par le trafic routier, et les particules – PM10, de diamètre inférieur à 10 micromètres (µm) et PM2.5, inférieures à 2,5 µm. Il est également valable pour les émissions de dioxyde de carbone (CO_2), reparties à la hausse avec une augmentation jusqu'à 80 % des niveaux habituels. À l'échelle de l'agglomération parisienne, la baisse observée des concentrations de dioxyde d'azote (NO_2) est passée de – 25 % pendant le confinement à – 15 % sur les trois premières semaines de déconfinement.

Pour les PM10 et PM2.5, l'impact a été moins marqué : après une diminution de 7 % pendant le confinement, les niveaux observés habituellement à cette période de l'année sont d'ores et déjà atteints. Plusieurs raisons à cela : des conditions météorologiques propices à la formation et au transport des particules et des sources d'émission comme les épandages agricoles qui n'ont pas faibli pendant le confinement, à la différence du trafic automobile.

Limiter la ruée vers la voiture

Concernant la principale source de pollution en Ile-de-France, le trafic routier, les émissions de NOx et de particules ont connu *« une chute brutale et sans précédent »* pendant le confinement, relève Airparif, avec des valeurs *« divisées par 4 »* par rapport aux niveaux préconfinement (date de référence au 9 mars). Au contraire, l'impact du déconfinement est *« bien plus progressif »*, avec une reprise graduelle des activités et donc du trafic qui engendre une *« remontée »* tout aussi progressive de la pollution d'origine automobile, même si un retour à la *« normale »* est déjà constaté certains jours sur le périphérique. Cette progressivité s'explique, selon Airparif, par les mesures toujours en vigueur lors de la première phase de déconfinement, comme l'incitation au télétravail ou l'interdiction (levée le 2 juin) des déplacements au-delà de 100 kilomètres sans motif impérieux. Les aménagements de pistes cyclables temporaires dans certaines villes, et notamment à Paris, ont aussi permis de limiter la ruée vers la voiture, estime l'organisme.

L'association Le Mouvement vient de lancer une plate-forme qui cartographie ces « coronapistes » dans 75 villes. Elle demande aux maires et aux candidats aux élections municipales de

POURQUOI CET ARTICLE ?

La « crise de la Covid-19 » a marqué le début de l'année 2020. Le très fort ralentissement des activités humaines qui s'est produit à la suite des mesures de confinement et en raison du ralentissement voire du gel des transports à l'échelle de la planète, a illustré en creux l'impact de nos pratiques : les émissions de gaz à effet de serre ont décru de 30 % en France pendant cette période. Chercherons-nous à réduire à l'avenir cet impact ou continuerons-nous « comme avant » ?

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

les rendre permanentes. Selon un sondage réalisé par l'ONG européenne Transport & Environment et dont les résultats doivent être publiés jeudi 11 juin, ces aménagements en faveur des mobilités dites douces sont largement plébiscités par les Français.

La partie française de l'enquête a été menée entre le 14 mai et le 21 mai auprès d'un échantillon de 1 000 personnes dans six métropoles : Paris, Marseille, Lyon, Toulouse, Nice et Lille. Une très large majorité de ces urbains (71 %) a ressenti une amélioration de la qualité de l'air pendant le confinement et ne veut pas d'un retour à la situation antérieure. Les opinions varient selon les villes avec 79 % à Marseille, 73 % à Paris, et seulement 58 % à Toulouse. Les sondés souhaitent aussi des mesures capables de mieux les protéger contre la pollution de l'air, responsable chaque année, en France, de 48 000 à 67 000 décès prématurés.

« Transformer nos villes »

Ainsi, 72 % se disent ainsi favorables à l'interdiction des voitures polluantes en centre-ville et notamment à l'introduction de zones zéro émission ; une proportion qui monte à 78 % à Marseille qui, contrairement à Paris, ne s'est pas encore engagée dans cette voie. La plupart des Parisiens (75 %) sont favorables à un nouveau partage de l'espace public, avec une place accrue pour les piétons (73 %), les pistes cyclables (63 %) et les transports en commun (65 %). Les chiffres sont similaires dans les autres villes, avec 78 % en faveur du vélo à Toulouse, 76 % pour les piétons à Nice.

« Pendant le confinement, chacun a pu goûter à un air pur et à des rues silencieuses, commente Olivier Blond, le président de l'association Respire. *La crise a modifié profondément les comportements et créé des conditions uniques pour transformer nos villes. Les élus et futurs élus doivent désormais s'en saisir pour améliorer le quotidien de leurs concitoyens. »* ●

Stéphane Mandard, dans *Le Monde* daté du 11.06.2020

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

LE FUTUR DES ÉNERGIES






© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le futur des énergies : histoire, enjeux et débats

La découverte de l'électromagnétisme a contribué à alimenter l'engouement pour l'énergie électrique. Les choix du XXe siècle quant à l'utilisation de la combustion d'énergie fossile ont favorisé une augmentation des teneurs en gaz à effet de serre jamais atteintes auparavant sur Terre. Il faut donc diminuer la consommation des ressources et l'empreinte carbone. La fusion nucléaire mise en œuvre dans le projet ITER est l'une des pistes pour éviter les émissions de dioxyde de carbone tout en éliminant le problème des déchets nucléaires.

L'électromagnétisme : un long chemin

Le magnétisme est connu depuis l'Antiquité : Thalès de Milet est certainement le premier à expérimenter l'attraction du fer par une pierre : la pierre de Magnésie. Au Moyen Âge, les Chinois créent la boussole qui utilise les propriétés de la magnétite.

De nombreux scientifiques (Dufay, Franklin, Coulomb, etc.) contribuent, au cours des siècles suivants, à la mise en place des bases de l'électrostatique qui repose sur les découvertes des particules chargées et du courant. Mais il faut attendre 1820 pour que Œrsted, à l'Université de Copenhague, montre qu'un courant circulant dans un fil crée un champ magnétique. Une nouvelle science est née : l'électromagnétisme.

S'ensuit un enchaînement de découvertes en tout genre. Ampère réalise de nombreux travaux sur l'électromagnétisme qui vont servir à l'invention de l'électro-aimant par Arago en 1820, et à la construction du premier télégraphe électrique par Wheatstone en 1838. En 1831, Faraday découvre l'induction électromagnétique qui permettra de donner naissance par la suite à l'alternateur, au moteur électrique et à la plaque à induction. L'induction électromagnétique est aussi à l'origine de la dynamo et du moteur à induction, utilisé dans l'électroménager par exemple, mais aussi dans les compresseurs.

En 1888, l'électromagnétisme prend un nouvel essor avec la production d'ondes électromagnétiques qui engendreront la première radio en 1896, puis la télévision, la téléphonie sans fil, le micro-onde, le wifi, etc.

Einstein et les quanta

À la fin du XIXe siècle, les progrès de la science font croire que les grands mystères de la nature sont résolus et que s'annonce un avenir technologique radieux. On imagine même que l'on se chauffera avec des morceaux de radium radioactif en l'an 2000. Mais certains phénomènes physiques, comme l'effet photo-électrique, ne trouvent pas encore d'explication.

En 1905, Einstein publie un article qui lui vaudra le prix Nobel en 1921. Il postule (parce qu'il ne peut le démontrer) que la lumière est discontinue. Il introduit quelques années plus tard la notion de photons, c'est-à-dire de petits grains de lumière dont l'énergie est quantifiée et ne peut prendre que des valeurs bien précises, appelés quanta. Cette nouvelle physique émergente – la physique des particules – est au cœur même du fonctionnement du LASER. Mais ces découvertes sur la fission nucléaire ont contribué à la création de la bombe nucléaire.

La distribution d'énergie électrique au cours du temps

Les découvertes du XIXe siècle sur les machines électriques permettent la présentation de la première distribution d'énergie électrique alimentée par deux dynamos à l'Exposition internationale de Paris de 1881. Dès 1882, les premiers réseaux électriques apparaissent en France. La nécessité toujours croissante des besoins énergétiques conduit à construire des réseaux électriques de plus en plus vastes, et des centrales de production de plus en plus grandes.

ZOOM SUR…

LA PRODUCTION DE DIHYDROGÈNE

Le dihydrogène (H_2) n'est pas une source d'énergie mais un moyen de stocker l'énergie. Il peut soit alimenter les piles à combustible, soit être brûlé pour produire une autre forme d'énergie. Non seulement les batteries H_2 stockent l'énergie sur du long terme, mais elles sont capables de relarguer l'électricité en quelques millisecondes.

Des expérimentations sont menées actuellement en Guyane, où le stockage du dihydrogène se fait sous pression dans de grands conteneurs de 12 mètres de long. Il s'agit notamment de développer des piles à hydrogène qui, combinées à des moteurs électriques, pourront servir aux voitures et aux trains de demain. En outre, la combustion du dihydrogène fournit une puissance suffisante pour faire fonctionner un avion, par exemple. Quel que soit le moyen d'utilisation du dihydrogène, sa conversion en une autre forme d'énergie ne rejettera que du dioxygène et de la vapeur d'eau. C'est à ce titre qu'il doit jouer un rôle-clé dans la transition énergétique mondiale.

Le principal frein à l'utilisation du dihydrogène est son stockage et son transport, car il est extrêmement inflammable. De plus, sa production actuelle se fait avec l'utilisation d'énergies fossiles donc polluantes. Le développement de nouvelles techniques de production, comme un couplage avec des panneaux photovoltaïques, devront permettre d'obtenir du dihydrogène plus « propre ».

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

À la fin du XIXe siècle, Edison, partisan du courant continu pour le transport et la distribution d'électricité, s'oppose à Tesla, promoteur de l'utilisation du courant alternatif. Le courant continu d'Edison est bien adapté aux moteurs et aux lampes à incandescence, qui constituent la grande majorité de la consommation électrique de l'époque. Le système est directement relié à des batteries d'accumulateurs, ce qui permet de stocker l'énergie lorsqu'on ne l'utilise pas. Mais le système d'Edison présente un inconvénient majeur : la chute de tension causée par la résistance des câbles oblige les centrales électriques à n'être distantes que de quelques kilomètres des points d'utilisation. La distribution à courant alternatif prônée par Tesla, couplée à des transformateurs haute tension, permet d'éloigner les centrales électriques du lieu d'utilisation. En outre, il est plus facile de modifier la tension du courant alternatif au moyen d'un transformateur.

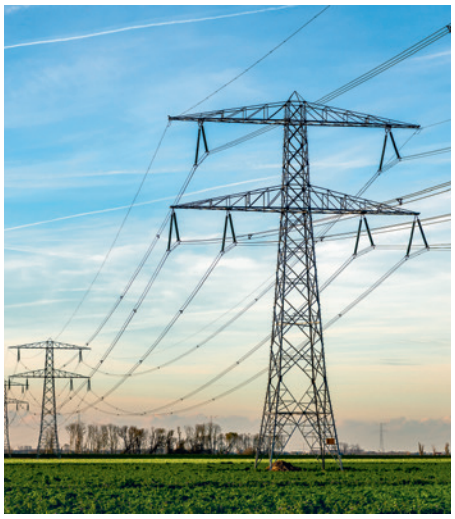
La puissance est donnée par la relation $P = U \times I$.

La puissance dissipée par effet Joule (chaleur) est donnée par $P_j = R \times I^2$.

(U est la tension électrique, R la résistance, et I l'intensité du courant circulant dans le câble.)

À puissance égale, une faible tension implique une forte intensité, et inversement. Or, plus l'intensité I est grande, plus la puissance dissipée par effet Joule est grande ; Donc plus la tension transportée sera grande, et plus la puissance dissipée par effet Joule sera limitée.

Le réseau s'étend rapidement dans les villes, puis de ville en ville, dès le début des années 1930. La consommation croissante d'électricité nécessite la mise au point, dès 1946, d'une norme européenne qui consiste à utiliser une tension de 400 000 V pour le réseau.



Les combustibles alternatifs à empreinte carbone réduite

Tous les combustibles fossiles sont riches en carbone : ce sont des hydrocarbures. Leur combustion entraîne une production importante de dioxyde de carbone (CO_2). Or ce gaz est l'un des facteurs du réchauffement climatique. La teneur actuelle en CO_2 n'a jamais été aussi élevée depuis 420 000 ans.

Afin de limiter les émissions de CO_2, il faut réduire les combustions fossiles : c'est pourquoi l'énergie électrique est préférable. Mais elle présente des inconvénients : le plus grand défi est de parvenir à stocker l'électricité pour la consommer au moment opportun. Plusieurs systèmes sont utilisés actuellement :

- le transfert d'énergie par pompage : l'électricité sert à pomper de l'eau pour la stocker en hauteur, et l'eau la restituera au moment voulu ;
- le stockage à air comprimé, dans des batteries lithium-ion, dans un fluide caloporteur (comme un ballon d'eau chaude) ;
- la conversion en dihydrogène, utilisée dans les piles à combustible.

Les enjeux de l'utilisation de l'énergie nucléaire : de la fission à la fusion contrôlée

Les centrales nucléaires fonctionnent sur le principe de fission nucléaire avec les noyaux d'uranium 235. Leur utilisation n'est pas émettrice de dioxyde de carbone, mais pose le problème des déchets nucléaires.

La maîtrise de la technique de fusion nucléaire fait l'objet du projet ITER. Pour obtenir cette fusion, il faut une température élevée et une densité de plasma suffisante. Les plasmas sont constitués de particules chargées (des noyaux positifs et des électrons négatifs). La fusion libère une énergie 4 millions de fois supérieure à celle des énergies fossiles, et 4 fois supérieure à celle des réactions de fission. Il n'y a aucun déchet, puisqu'elle ne produit que de l'hélium (un gaz inerte et non toxique), et aucun risque de prolifération en cas de problème sur la centrale. La pérennité des réactifs est assurée. Mais l'utilisation de cette technique se heurte actuellement à un problème de maîtrise industrielle.

Les prochaines décennies devront mettre en place un mix énergétique non émetteur de dioxyde de carbone et non producteur de déchets nucléaires.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

- Le Nobel de chimie aux pères des batteries lithium-ion p. 38 (David Larousserie, dans *Le Monde* daté du 11.10.2019)

NOTIONS-CLÉS

ÉLECTRO-AIMANT : appareil qui produit un champ magnétique à partir d'un courant électrique. On peut l'assimiler à un aimant commandé. Il est utilisé dans les moteurs électriques.

ALTERNATEUR : appareil qui génère de l'énergie électrique (sous forme de courant alternatif) à partir d'énergie mécanique. Il est présent dans toutes les centrales électriques.

DYNAMO : appareil qui génère de l'énergie électrique (sous forme de courant continu) à partir d'énergie mécanique. Elle n'est plus utilisée actuellement pour produire de l'électricité de manière industrielle.

QUANTUM (AU PLURIEL, QUANTA) : la plus petite quantité d'énergie indivisible qui existe.

PHOTON : genre de « grain » de lumière ; particule élémentaire de la lumière. Un photon représente un quantum d'énergie.

FISSION NUCLÉAIRE : réaction au cours de laquelle un noyau atomique lourd est scindé en deux ou plusieurs noyaux plus légers.

FUSION NUCLÉAIRE : réaction au cours de laquelle deux noyaux légers s'unissent pour former un noyau plus lourd.

EFFET JOULE : production de chaleur lors du passage du courant électrique dans une résistance.

TRANSFORMATEUR : appareil qui transforme la tension et l'intensité du courant reçu en des tensions et intensités plus grandes ou plus petites selon les besoins.

ACCUMULATEUR : appareil qui stocke de l'énergie électrique sous une forme différente (énergie chimique, chaleur, énergie hydraulique, etc.).

PROJET ITER : projet de centrale électrique fonctionnant sur le principe de la fusion nucléaire. Il est constitué d'un tokamak, un appareil exploitant l'énergie de fusion. Dans le tokamak, l'énergie générée est absorbée sous forme de chaleur par les parois. Cette chaleur sert à produire de la vapeur qui alimente les turbines et les alternateurs.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Deux siècles d'énergie électrique

Depuis le XIXe siècle, les avancées de la recherche, à travers la découverte de l'induction électromagnétique ou les théories de l'électromagnétisme, ont permis la conception d'alternateurs électriques. Ceux-ci sont performants et ont un impact écologique moindre. Le changement de siècle a amené une physique nouvelle : la physique quantique. Les chercheurs ont ainsi mis au point des centrales nucléaires, mais également les cellules photovoltaïques constituées de silicium (un matériau semi-conducteur), qui transforment le rayonnement solaire en énergie électrique.

L'induction électromagnétique de Faraday et Maxwell

En 1820, Œrsted découvre qu'un fil transportant du courant est capable de faire bouger l'aiguille d'une boussole : il montre ainsi qu'il peut y avoir interaction entre l'électricité et le magnétisme. Plusieurs physiciens se demandent alors si, inversement, le magnétisme peut créer des effets électriques. L'année suivante, Faraday réussit à inverser l'expérience d'Œrsted : il fait tourner un câble parcouru par un courant électrique autour d'un aimant. C'est l'invention du moteur électrique. En continuant ses expériences pendant de nombreuses années, Faraday découvre l'induction électromagnétique.

L'induction électromagnétique est le phénomène correspondant à l'apparition d'un courant électrique (appelé *courant induit*) dans une bobine, grâce à un champ magnétique produit par un aimant ou un électro-aimant.

Lorsque le champ magnétique se déplace, les électrons libres du fil vont bouger : ce mouvement d'électrons est, par définition, le courant électrique. Pour obtenir un courant électrique, il y a donc deux possibilités :

- déplacer le champ magnétique au voisinage de la bobine ;
- déplacer la bobine au voisinage du champ magnétique.

Sans déplacement de l'un par rapport à l'autre, il ne peut pas y avoir de courant. Plus la vitesse de déplacement du champ magnétique par rapport à la bobine est grande, plus les électrons du fil métallique sont perturbés, et plus le courant électrique est important. Plus le champ magnétique est intense, plus l'intensité du courant sera importante. De même, plus la bobine comporte de tours, plus l'intensité du courant est importante. Ce phénomène d'induction électromagnétique est à la base du fonctionnement de la plupart des convertisseurs d'énergie électrique, comme l'alternateur.

Maxwell théorise les travaux de Faraday et d'autres scientifiques en proposant un ensemble d'équations qu'il présente à la Royal Society en 1864. Elles décrivent le champ électrique et le champ magnétique ainsi que leurs interactions avec la matière.

Le principe de l'alternateur électrique

Un alternateur est un dispositif qui permet d'obtenir du courant électrique en utilisant le phénomène d'induction électromagnétique. C'est donc un dispositif qui permet de produire de l'énergie électrique à partir d'énergie mécanique.

Plus de 95 % de l'énergie électrique est produite par des alternateurs : ce sont des machines avec un rendement élevé. L'alternateur est constitué de deux parties : le rotor qui est la partie tournante, et le stator qui est la partie fixe. Le rotor, qui sera appelé *inducteur*, est la partie associée au mouvement : c'est souvent l'aimant. Le stator, qui sera appelé *induit*, est constitué d'un enroulement de fil dans lequel apparaît le courant électrique. Le nom d'alternateur vient du fait qu'il fournit un courant électrique alternatif. En effet, les électrons vont dans un sens puis dans l'autre, selon les pôles de l'aimant qu'ils ont devant eux.

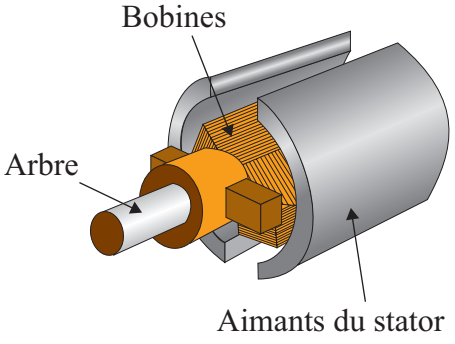


Figure 1. Exemple d'alternateur.

ZOOM SUR…

LES MATÉRIAUX SEMI-CONDUCTEURS

Les matériaux semi-conducteurs comme le carbone, le silicium, le germanium, l'étain ou le plomb ont la particularité d'avoir des propriétés électriques qui sont à la fois celles des isolants et celles des conducteurs. On peut prédire leur comportement électrique en agissant sur les conditions telles que la température, le rayonnement lumineux ou le magnétisme.

Pour faire varier les propriétés électriques des matériaux semi-conducteurs, on pratique le dopage, qui consiste à introduire des atomes différents dans la structure cristalline. Les atomes insérés d'un côté (comme le phosphore) ont un nombre d'électrons plus grand que celui du silicium ; les atomes insérés de l'autre côté (comme le bore) ont un nombre d'électrons plus petit que celui du silicium . On retrouve ainsi la configuration d'une pile : d'un côté, la borne négative avec un surplus d'électrons ; de l'autre, la borne positive avec un déficit d'électrons. Ces deux bornes sont reliées à un récepteur. Dès que la lumière arrive sur les panneaux, les électrons se mettent en mouvement et constituent ainsi le courant électrique. L'avantage de cette technologie est qu'elle est inépuisable : tant qu'il y a de la lumière, les électrons circulent et alimentent le récepteur. Cependant, l'inconvénient des panneaux solaires actuels est leur rendement. Seule une petite partie de la lumière est convertie en courant électrique, le reste est converti en chaleur. Les recherches scientifiques sont donc axées sur l'obtention de meilleures cellules photovoltaïques.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

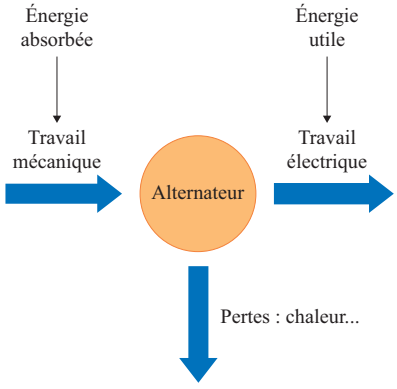


Figure 2. Bilan énergétique d'un alternateur.

Si l'on observe le schéma d'alternateur ci-contre, on constate que le rotor est l'aimant, avec un pôle Nord et un pôle Sud. Grâce au mouvement, chaque pôle passe alternativement devant les bobines constituant le stator. Lorsqu'un pôle est devant une bobine, l'autre pôle ne l'est pas. Le passage de chaque pôle devant une bobine induit un courant électrique. Comme il y a alternance entre pôle Nord et pôle Sud, il y aura un courant électrique alternativement dans un sens, puis dans l'autre : c'est le courant alternatif.

On observe une perte (de chaleur, par exemple) pour tous les appareils traversés par un courant électrique. Par définition, le rendement de l'alternateur est donné par le rapport entre l'énergie utile (ou puissance utile) et l'énergie absorbée (ou puissance absorbée), où les énergies sont exprimées en joules (J), et les puissances en watt (W) :

$$\eta = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance absorbée}}$$

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie absorbée}}$$

Le rendement dépend de la vitesse de rotation et de la charge utilisée, c'est-à-dire du courant débité. Actuellement, le rendement est proche de 1. En effet, la courbe du rendement en fonction de la puissance utile montre des rendements compris entre 96,1 % et 97,2 %.

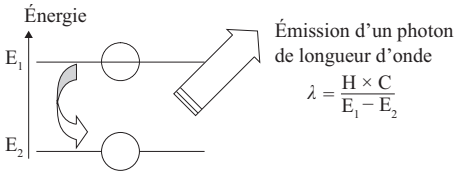


Figure 3. Niveaux d'énergie et émission d'un photon.

La physique de Einstein

À la fin du XIXe siècle, les scientifiques remarquent qu'un métal éclairé avec une lumière ultraviolette peut émettre des électrons. Comme Max Planck postule que l'énergie ne peut s'échanger que par paquets, Einstein en arrive à la conclusion, en 1905, que la lumière est constituée de petits « grains » (ultérieurement baptisés *photons*) porteurs d'un quantum d'énergie.

En 1913, ces théories permettent à Bohr d'imaginer un nouveau modèle de l'atome. L'atome ne peut exister que dans certains états d'énergie, caractérisés par des niveaux d'énergie bien identifiés. Un photon de longueur d'onde λ est émis lorsque l'atome effectue une transition entre deux niveaux d'énergie, de E_2 à E_1. L'atome change de niveau d'énergie par à-coup.

En bref, l'atome se désexcite. Lorsqu'un atome passe d'un niveau d'énergie élevé à un niveau d'énergie plus faible, il perd de l'énergie qu'il émet sous forme de rayonnement. Chaque rayonnement émis ne peut avoir qu'une valeur très précise de longueur d'onde, qui dépend de la différence d'énergie entre les deux niveaux. On a ainsi un spectre de raies, où chaque raie correspond à une transition entre deux niveaux d'énergie. Comme ces niveaux sont différents d'un atome à l'autre, chaque spectre de raies est caractéristique de l'atome considéré.

Application aux cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques exploitent les photons d'Einstein. L'énergie solaire, qui est un flux de photons, peut arracher et déplacer les électrons d'un matériau exposé. Le mouvement des électrons qui en résulte correspond au courant électrique. Cet effet photovoltaïque est découvert en 1839 par Becquerel, mais il faut attendre les années 1960 pour que les cellules trouvent de réelles applications.

Le matériau choisi pour les cellules photovoltaïques est un semi-conducteur comme le silicium. En effet, le spectre d'absorption des semi-conducteurs est proche du spectre solaire. Leurs propriétés sont également à la base de l'électronique et de l'informatique actuelles.

La cellule photovoltaïque ne délivre pas un courant constant en fonction de la tension à ses bornes. Ainsi, on peut voir trois zones (figure 5) : la zone 1, où le courant varie peu quelle que soit la tension ; la zone 2, où le courant diminue lorsque la tension augmente ; la zone 3, où la tension varie peu quelle que soit l'intensité.

On peut aussi tracer la caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque (figure 6). On note ainsi que la puissance maximale se trouve pour une tension et une intensité de la zone 2 de la courbe intensité-tension. Ainsi, on pourra déduire la résistance d'utilisation ($R = \frac{U_m}{I_m}$ en Ω) en rendant la puissance électrique maximale. La puissance est donnée par $P = U \times I$; son unité est le watt (W).

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

- Le solaire sort de l'ombre p. 39 (Jean-Michel Bezat, dans *Le Monde Eco & entreprise* daté du 31.01.2017)

NOTIONS-CLÉS

INDUCTION ÉLECTROMAGNÉTIQUE : phénomène d'apparition d'un courant électrique dans un circuit s'il est soumis à un champ magnétique variable ; ou à l'inverse, phénomène d'apparition d'un champ magnétique autour d'un circuit s'il est soumis à un courant électrique variable.

STATOR : partie fixe dans un moteur électrique ; le plus souvent, la partie circuit électrique.

ROTOR : partie en mouvement dans un moteur électrique ; le plus souvent, la partie aimant.

MATÉRIAU SEMI-CONDUCTEUR : matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais aussi celles d'un conducteur puisqu'il a des électrons libres.

CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE : cellule capable de convertir l'énergie solaire en courant électrique ; elle est constituée de matériaux semi-conducteurs.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les atouts de l'électricité

Depuis le XIXe siècle, le réseau de distribution électrique s'est déployé sur tout le territoire, offrant ainsi de l'énergie électrique à chacun. Les modes de production de l'électricité se diversifient et deviennent de plus en plus écologiques, ce qui permet à l'électricité d'avoir un faible impact sur l'environnement. De plus, les différents convertisseurs de l'énergie électrique en d'autres formes d'énergie avec un bon rendement permettent de la stocker et d'ajuster au mieux sa disponibilité aux demandes des utilisateurs.

La conversion d'énergie mécanique directe

La conversion d'énergie mécanique directe par le barrage d'une centrale hydro-électrique, une dynamo ou une éolienne ne nécessite pas de combustion. Cette conversion se fait directement.

Un barrage hydro-électrique retient l'eau et crée un lac en hauteur. Ce lac constitue une réserve d'énergie électrique sous forme d'énergie potentielle. L'ouverture des vannes du barrage produit un filet d'eau à très grand débit, qui vient frapper, en bout de course, une turbine. La rotation des turbines entraîne des alternateurs qui produisent du courant électrique, injecté dans le réseau électrique sous très haute tension grâce à des transformateurs.

La dynamo est un dispositif qui permet de produire de l'énergie électrique par rotation d'un aimant devant une bobine. C'est le phénomène d'induction qui est à l'origine de la production. Une dynamo produit un courant continu, contrairement aux alternateurs.

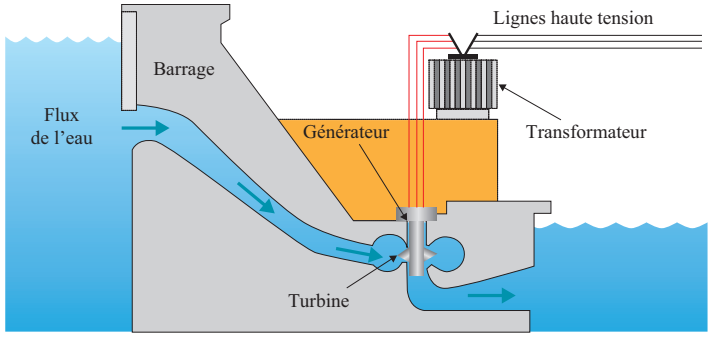


Figure 1. Schéma du barrage d'une centrale hydro-électrique.

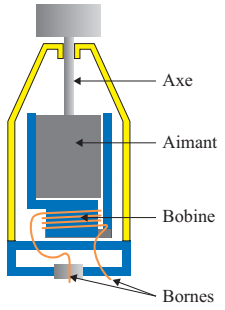


Figure 2. Schéma d'une dynamo.

Les éoliennes utilisent l'énergie cinétique du vent : elles transforment la rotation des pales sous l'action du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique grâce à l'alternateur. En effet, avec le vent, le rotor fixé en haut du mât se met à tourner devant le stator, produisant ainsi l'énergie électrique. C'est encore le phénomène d'induction électromagnétique qui est à l'origine de cette production d'électricité. On obtient du courant alternatif dont la tension est amenée à 20 000 V (grâce aux transformateurs) pour le transport ultérieur.

Les hydroliennes fonctionnent sur le même principe que les éoliennes, mais elles sont constituées par une turbine hydraulique qui utilise l'énergie cinétique des courants marins. La turbine transforme l'énergie cinétique des mouvements de l'eau en énergie mécanique qui sera ensuite convertie en énergie électrique par un alternateur.

La conversion d'énergie mécanique à partir d'énergie thermique

Dans les centrales nucléaires, des noyaux d'uranium sont cassés après avoir été bombardés par des neutrons. Il y a alors libération d'une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur qui est utilisée pour transformer

ZOOM SUR…

L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Le choix technologique doit tenir compte de l'impact sur l'environnement et la gestion de fin de vie, qui peuvent modifier l'investissement global. Il faut tenir compte de l'encombrement de l'installation, des risques de ruptures, et des risques de pollution dans tous les systèmes de stockage électrochimique. La toxicité due au cadmium représente un danger pour l'environnement. La réglementation impose des taux de recyclage pour tous les accumulateurs. Ceux qui ont le plus d'impact sur l'environnement sont les accumulateurs au plomb et au nickel-cadmium.

ASPECT ÉCONOMIQUE ET AXE DE RECHERCHE

Les coûts d'investissement en stockage restent élevés, même si de nouveaux matériaux et procédés sont développés. Le marché mondial du stockage est largement dominé par les STEP (avec les barrages hydro-électriques), par les batteries, les supercapacités et les volants d'inertie.

Le stockage sous forme thermique est un autre axe de la recherche actuelle. Grâce au chauffage d'un corps, la quantité d'énergie stockée est directement proportionnelle à la variation de la température s'il n'y a pas de changement d'état du corps. Sinon l'énergie thermique est restituée par une baisse progressive de la température : le matériau passe alors de l'état liquide à l'état solide.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction diffusion et communication strictement interdites.

l'eau en vapeur dans le circuit primaire. Le circuit secondaire amène la vapeur à la turbine, produisant ainsi l'électricité. Le circuit de refroidissement prélève l'eau froide dans le fleuve et en alimente le condenseur.

Dans une centrale solaire thermique, les rayons du soleil sont concentrés en un point par des miroirs. La température peut s'élever de 400 °C à 1 000 °C. Le générateur de vapeur va transformer l'eau en vapeur d'eau qui va entraîner la turbine alimentant l'alternateur. Celui-ci va produire le courant alternatif envoyé vers le transformateur qui ajustera la tension pour la distribution.

La géothermie tire parti du fait que la température du sol est constante. Dans certains lieux, la chaleur est plus élevée qu'ailleurs. En effet, le magma remonte à la surface et réchauffe les roches qui l'entourent. C'est ce qui se passe dans les sources chaudes, par exemple. L'eau de pluie s'infiltre et constitue ainsi un réservoir dans le sous-sol à haute température. Dans une centrale géothermique, l'eau est ensuite pompée jusqu'à la surface et se transforme en vapeur. Cette vapeur va faire tourner une turbine qui fait fonctionner un alternateur. On obtient un courant électrique alternatif. Un transformateur élève ensuite la tension du courant électrique pour le transport.

La conversion électrochimique

Le stockage de l'énergie est un enjeu majeur pour le futur. En effet, l'accroissement de la consommation en énergie électrique et celui du nombre d'appareils nomades impliquent d'augmenter la capacité de stockage de l'énergie électrique et les rendements.

Les piles et accumulateurs ont été inventés au XIXe siècle. Les piles délivrent de l'énergie électrique par réaction d'oxydoréduction. Les accumulateurs fonctionnent sur le même principe que les piles, à la différence qu'ils peuvent être rechargés. Les piles et les accumulateurs mettent en jeu deux couples oxydant/réducteur. Chaque couple forme une demi-cellule électrochimique. La connexion entre ces deux demi-cellules constitue une pile. Lors de leur décharge, les piles ou les accumulateurs convertissent l'énergie chimique en énergie électrique.

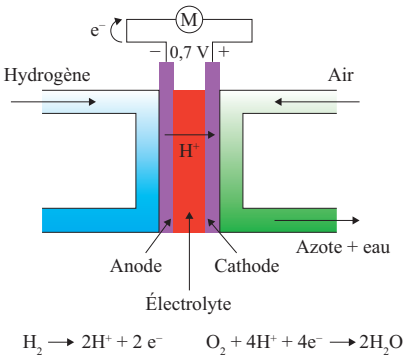


Figure 4. Schéma de fonctionnement d'une pile à hydrogène.

Les piles à hydrogène, aussi appelées piles à combustible, convertissent l'énergie d'un combustible (l'hydrogène) en énergie électrique.

Le rendement d'une pile est par définition :

$R = \frac{E_{utile}}{E_{apportée}} = \frac{U}{E}$, où U est la tension en volt délivrée par la pile, et E est sa force électromotrice (tension à vide) en volt.

Impacts environnementaux

Ces méthodes ont néanmoins un impact sur l'environnement et la biodiversité, et présentent des risques spécifiques. Ainsi, dans une centrale nucléaire se pose la question du traitement des déchets radioactifs. De plus, l'eau prélevée dans le fleuve pour alimenter le condenseur est rejetée à une température légèrement plus élevée, ce qui entraîne des modifications dans l'écosystème.

Autres modes de stockage

Pour faire face à l'intermittence liée à certains modes de production (à partir de l'énergie éolienne ou de l'énergie solaire), l'énergie doit être convertie sous forme stockable :

- en énergie chimique (sous forme d'accumulateurs) : cette filière permet de doper le stockage d'électricité intermittente. Chez les particuliers, elle permet de stocker et d'autoconsommer la production électrique de capteurs solaires photovoltaïques.
- en énergie potentielle (dans les barrages) : une fois utilisée, l'eau du lac de rétention est remontée par pompage. Cette remontée permet de stocker l'énergie sous forme d'énergie potentielle.
- en énergie électromagnétique (dans les supercapacités ou supercondensateurs) : les supercondensateurs sont des dispositifs de stockage de l'énergie fonctionnant comme des superbatteries ultrarapides. Ils se rechargent très rapidement et ont une longue durée de vie grâce à leur capacité à être chargés et déchargés plus d'un million de fois, contre 400 à 2 000 fois pour les batteries traditionnelles.

La sélection d'un système de stockage dépend de plusieurs critères :

- la quantité et la nature de l'énergie disponible ;
- la puissance disponible ;
- la densité de stockage en énergie et en puissance, qui conditionnera le volume et le poids du système ;
- le coût et la maintenance, qui sont liés à la maturité de la technologie ;
- le nombre de cycles de décharge ;
- la sécurité.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

- Énergie : la promesse hydrolienne p. 41 (Anne Eveno avec Gilles van Kote, dans *Le Monde* daté du 26.02.2013)

NOTIONS-CLÉS

CHAÎNE ÉNERGÉTIQUE : schéma qui représente l'ensemble des conversions d'énergie qui ont lieu dans un dispositif.

RESSOURCES FOSSILES : ressources correspondant au pétrole, au gaz naturel et au charbon.

CENTRALE ÉLECTRIQUE : site industriel qui produit de l'électricité.

ÉNERGIE RENOUVELABLE : énergie qui, à l'échelle humaine, est inépuisable et disponible en grande quantité. On peut citer : l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse et la géothermie.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Optimisation du transport de l'énergie

Lors du transport de l'énergie électrique, la préoccupation première est de minimiser les pertes par effet Joule tout en maximisant la quantité d'énergie transportée. Ces problèmes très difficiles à résoudre nécessitent des traitements mathématiques et numériques complexes, notamment à cause du nombre d'inconnues et/ou de données à prendre en compte. La résolution du problème du transport d'énergie passe par l'étude de graphes, de modèles mathématiques qui sont également utilisés pour analyser le transport d'informations dans un réseau informatique, dans les réseaux sociaux ou pour traiter des transactions financières.

Transport de l'énergie électrique

Une partie de l'énergie électrique, dissipée dans l'environnement par effet Joule, ne parvient pas à l'utilisateur : le transport de l'électricité fait chauffer le câble et génère des pertes d'énergie sous forme de chaleur. Elles sont liées à la résistance même du matériau.

Les pertes par effet Joule sont données par la relation $\boldsymbol{P_J = R \times I^2}$.Plus le courant I est grand, plus la perte est importante.

Les câbles électriques sont généralement en cuivre, un métal considéré comme un excellent conducteur pour de courtes distances. La résistance R d'un conducteur, défini par la capacité à s'opposer à la conduction, est donnée par la formule :

$$R = \rho \times \frac{I}{A}$$

où ρ est la résistivité en Ω · m (Ohm·mètre), l la longueur en m, A la section du câble en m² et R la résistance en Ω.

Une résistivité de valeur faible correspond à un bon conducteur électrique ; inversement, une résistivité de valeur élevée correspond à un bon isolant électrique.

Plus la longueur du câble est importante, plus sa résistance est grande. Pour diminuer au maximum la valeur de la résistance en fonction de la longueur, il faut augmenter la section des conducteurs électriques. Mais cela pose d'autres problèmes : le coût de revient est plus important, le poids des câbles augmente. Diminuer la résistance ne peut pas être fait de façon simple. Pour limiter les pertes par effet Joule, il faut agir sur la valeur de l'intensité du courant.

La puissance pour un récepteur est donnée par la relation :

$P = U \times I$

où U est la tension aux bornes du récepteur et I l'intensité du courant qui le parcourt.

Donc en augmentant la tension, on peut diminuer le courant sans toucher à la puissance. Avec $P_J = R \times I^2$ en divisant l'intensité par 2, on divise par 4 la puissance due à l'effet Joule ; alors qu'en divisant la résistance par 2, on divise seulement par 2 l'effet Joule.

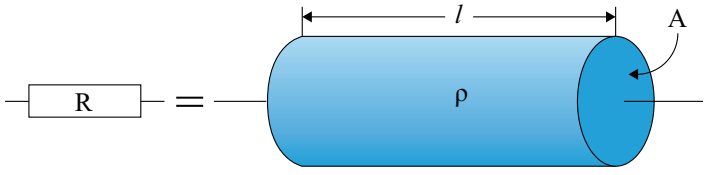
Le transport de l'électricité s'effectue en très haute tension afin de réduire les pertes par effet Joule et réduire la section des câbles, à puissance transportée fixée. La tension de l'électricité domestique est 230 V.

Par exemple, pour l'alimentation d'une ville moyenne avec une puissance P = 10 MW, sous une tension de 230 V, le courant serait de

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10 \times 10^6}{230} = 4{,}4 \times 10^4 \text{ A.}$$

Le transport sur câble de cuivre de 1 cm de diamètre donne une valeur de résistance R = 0,4 Ω par km.

Cela entraîne une perte par effet joule $P_J = 0{,}4 \times (4{,}4 \times 10^4)^2 = 8 \times 10^8$ W soit $P_J = 0{,}8 \times 10^6$ kW par km.



$$R = \rho \times \frac{l}{A}$$

Figure 1. Résistance d'un conducteur cylindrique.

ZOOM SUR…

LES GRAPHES

La notion de réseau est étudiée depuis longtemps. C'est Euler qui, dans les années 1740, en a posé les notions dans son problème des 7 ponts de Königsberg. Il s'agit de trouver un itinéraire de promenade dans la ville de Königsberg qui comporte 7 ponts. En partant d'un pont de la ville, la promenade doit traverser une et une seule fois chacun des ponts avant de revenir au point de départ.

Euler résout ce casse-tête en initiant la théorie des graphes. En modélisant la ville et ses ponts par un graphe, il remarque que si un tel trajet est possible, il partirait de chaque nœud un nombre pair d'arêtes. Or, ce n'est pas le cas : la promenade ne peut donc pas se faire avec ces contraintes. Depuis, on appelle *cycle eulérien* le chemin d'un graphe partant et arrivant au même nœud en passant une et une seule fois par chacune des arêtes.

Ce problème, également connu sous le nom de « problème du voyageur de commerce », est utilisé dans la logistique postale, l'itinéraire des bus scolaires, etc. C'est donc un problème d'optimisation de trajet sur une carte.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Modélisation d'un réseau de transport électrique

Un réseau (qu'il soit routier, informatique, de transports en commun, etc.) est un type de graphe orienté. Un graphe est un ensemble de points appelés sommets (ou nœuds) et de lignes appelées arêtes reliant certains sommets entre eux. Ces lignes représentent des paires de nœuds. Un graphe est dit orienté si chaque arête ne peut être parcourue que dans un seul sens. Les arêtes sont alors représentées par des flèches et sont appelées des arcs. Dans un graphe pondéré, la valeur numérique associée à une arête, appelée poids, peut être la distance entre les deux sommets ou le coût.

Un réseau de transport électrique peut être modélisé mathématiquement par un graphe orienté et pondéré dont les sommets représentent les sources (générateur d'électricité), les cibles (récepteurs) et un certain nombre de nœuds intermédiaires, et dont les arcs représentent les lignes électriques orientées des sources vers les cibles. La pondération peut être associée à l'intensité du courant électrique dans le câble.

Optimisation sous contraintes

On parle d'optimisation sous contraintes lorsque l'on veut optimiser une fonction qui dépend de plusieurs paramètres qui vérifient des inégalités ou des égalités. La répartition des courants dans le réseau doit satisfaire plusieurs contraintes :

- l'intensité sortant d'une source ne peut pas dépasser la capacité de production de celle-ci ;
- l'intensité totale entrant dans chaque nœud doit être égale à l'intensité qui en sort (c'est la loi des nœuds) ;
- l'intensité arrivant à chaque cible est fixée par ses besoins en électricité.

On considère, par exemple, trois centrales qui assurent l'alimentation en électricité de quatre villes. L'énergie électrique produite par chacune des centrales est limitée, et le besoin électrique de chaque ville correspond à une puissance donnée. Le coût de transport d'un GigaWatt·heure depuis une centrale donnée jusqu'à une ville donnée est également indiqué. La situation est résumée par le tableau suivant :

	Ville 1	Ville 2	Ville 3	Ville 4	Énergie maximale fournie par la centrale (GWh)
Centrale 1	8	6	10	9	35
Centrale 2	9	12	13	7	50
Centrale 3	14	9	16	5	40
Demande (GWh)	45	20	30	30	

Chaque nombre correspond aux coûts de transport en euro de la centrale i à la ville j.

Si on note x_{ij} l'énergie (en GWh) produite par la centrale i et destinée à la ville j, les contraintes du problème se traduisent par :

- contraintes de production (offre) :

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} \leqslant 35$$
$$x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} \leqslant 50$$
$$x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} \leqslant 40$$

- contraintes de consommation (demande) :

$$x_{11} + x_{21} + x_{31} \leqslant 45 \qquad x_{31} + x_{23} + x_{33} \leqslant 30$$
$$x_{12} + x_{22} + x_{32} \leqslant 20 \qquad x_{14} + x_{24} + x_{34} \leqslant 30$$

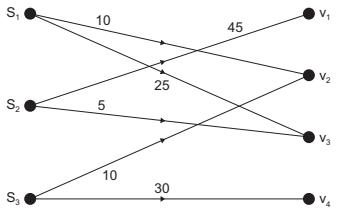
Le problème consiste à minimiser sous ces contraintes le coût total de distribution qui est la somme :

$C = 8x_{11} + 6x_{12} + 10x_{13} + 9x_{14} + 9x_{21} + 12x_{22} + 13x_{23} + 7x_{24} + 14x_{31} + 9x_{32} + 16x_{33} + 5x_{34}$

Il existe un algorithme mathématique qui permet de résoudre ce problème. La solution est :

x_{ij}	Ville 1	Ville 2	Ville 3	Ville 4	Énergie maximale fournie par la centrale (GWh)
Centrale 1	0	10	25	0	35
Centrale 2	45	0	5	0	50
Centrale 3	0	10	0	30	40
Demande (GWh)	45	20	30	30	

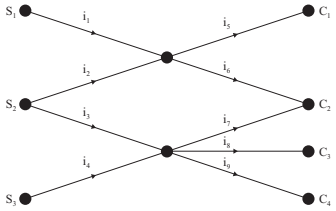
On peut représenter la solution par le graphe orienté pondéré suivant :



Cette répartition optimale donne un coût de distribution de :

$C = 8 \times 0 + 6 \times 10 + 10 \times 25 + 9 \times 45 + 12 \times 0 + 13 \times 5 + 7 \times 0 + 14 \times 0 + 9 \times 10 + 16 \times 0 + 5 \times 30 = 1\,020$ €

On considère maintenant, par exemple, un circuit électrique comprenant trois sources (à gauche), quatre cibles (à droite), et deux nœuds. Il faut traduire les différentes contraintes par des égalités et des inégalités.



- Contraintes de production :

$$i_2 \leqslant s_1 \qquad i_2 + i_3 \leqslant s_2 \qquad i_4 \leqslant s_3$$

- Loi d'additivité des intensités :

$$i_1 + i_2 = i_5 + i_6 \qquad i_3 + i_4 = i_7 + i_8 + i_9$$

- Besoins des cibles :

$$i_5 = c_1$$
$$i_6 + i_7 = c_2$$
$$i_8 = c_3$$
$$i_9 = c_4$$

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

- Record mondial pour un câble électrique supraconducteur p. 42 (Pierre Barthélémy, dans *Le Monde* daté du 25.06.2008)

NOTIONS-CLÉS

RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE : capacité d'un matériau à s'opposer à la conduction du courant électrique.

EFFET JOULE : production de chaleur lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant électrique. Il est proportionnel à la valeur de la résistance. La puissance perdue par effet Joule est $P_J = R \times I^2$.

GRAPHE : ensemble de points appelés sommets et de lignes appelé arêtes.

GRAPHE ORIENTÉ : graphe où chaque arête est orientée par une flèche. Les arêtes sont alors appelées arcs.

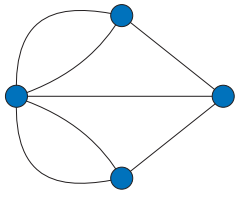


Figure 3. Modélisation des 7 ponts de Königsberg par un graphe.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le futur des énergies : histoire, enjeux et débats

On sait depuis l'Antiquité que l'ambre frotté avec un tissu attire les corps légers, et que certaines pierres attirent les objets en fer.

Doc. 1 – Découverte de Coulomb
Coulomb montre en 1777 que la valeur de la force électrostatique qui s'exerce par une sphère électrisée sur une autre est inversement proportionnelle au carré de la distance séparant les deux sphères.

Doc. 2 – Expérience d'Œrsted
En 1820, Œrsted annonce qu'il a observé qu'un fil parcouru par un courant électrique fait dévier une aiguille aimantée placée à proximité, alors qu'en l'absence de courant, l'aiguille indique le nord magnétique.

Doc. 3 – Notes de M. Ampère sur les lectures qu'il a faites à l'Académie des Sciences.

Séance du 18 septembre 1820 :
« Je décrivis les expériences par lesquelles j'avais constaté l'attraction ou la répulsion de la totalité d'une aiguille aimantée par le fil conjonctif. […] J'entrai ensuite dans quelques détails sur la manière dont je conçois les aimants, comme devant uniquement leurs propriétés à des courants semblables que j'admets dans le globe terrestre ; en sorte que je réduisis tous les phénomènes magnétiques à des effets purement électriques. »

Doc. 4 – Traduction du traité d'électricité et de magnétisme par Maxwell
« On avait essayé sans succès des expériences sur les relations de l'aimant et des corps chargés d'électricité : c'est alors qu'Œrsted entreprit de déterminer l'effet d'un fil échauffé par un courant électrique. Mais il découvrit que le courant lui-même, et non la chaleur du fil, était la cause d'action, et que "le courant électrique agit de manière à faire tourner", c'est-à-dire qu'un aimant placé dans le voisinage d'un fil traversé par un courant tend à se placer perpendiculairement au fil, et, si l'on déplace l'aimant autour du fil, c'est la même extrémité qui reste tournée en avant.
« On voit donc que, dans l'espace qui environne un fil traversé par un courant électrique, un aimant est soumis à des forces qui dépendent de la position du fil et de l'intensité du courant. L'espace dans lequel ces forces agissent peut donc être considéré comme un champ magnétique, et nous pouvons l'étudier de la même manière que nous avons déjà étudié le champ dans le voisinage des aimants ordinaires, en examinant la forme des lignes de force magnétique et en mesurant l'intensité de la force en chaque point. »

Questions

1. Qu'est-ce que le magnétisme ?
2. Décrire les phénomènes d'électrostatique et de magnétisme. Donner les similitudes et les différences entre ces deux phénomènes.
3. Interpréter les observations d'Œrsted.
4. Pourquoi l'expérience d'Œrsted apporte-t-elle des idées nouvelles sur les phénomènes magnétiques ?
5. Après la découverte d'Œrsted, quelles sont les trois sources de champ magnétique connues ?
6. À quoi est dû le magnétisme pour Ampère ?
7. Que décrit Maxwell dans son article ?
8. Que veut vérifier Œrsted lorsqu'il entreprend son expérience ? Quel est le résultat de cette expérience ?
9. Que peut-on conclure sur le comportement d'un fil parcouru par un courant ?

LA BONNE MÉTHODE

1. Décomposer le terme.
2. Expliquer en quoi consiste le phénomène électrostatique et en quoi consiste le phénomène magnétique. Déterminer la nature même de chaque phénomène pour préciser leur(s) similitude(s) et leur(s) différence(s).
3. Revenir à la nature du courant électrique.
4. Que lient les observations d'Œrsted ?
5. Deux des trois sources sont connues depuis l'Antiquité. Œrsted en observe une troisième.
6. La réponse se trouve dans le texte.
7. Faire le lien avec les expériences précédentes.
8. Œrsted fait un lien particulier entre deux notions au cours de son expérience.
9. Interpréter les conclusions de Maxwell.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Deux siècles d'énergie électrique

Document 1

Un conducteur. est un corps qui permet le passage d'un courant électrique lorsque l'on impose une tension entre ses bornes. Ce passage est assuré, dans les solides, par les électrons libres. Un conducteur possède, par cm^3, plus de 1 022 électrons libres permettant la conduction. Sa résistivité ρ (caractérisant la capacité d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique) est donc très faible : $\rho \leqslant 10^{-8}\ \Omega \cdot m$.

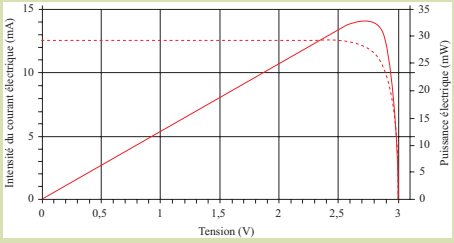
Dans un isolant, les électrons libres sont très peu nombreux et la résistivité est élevée : $\rho > 10^{6}\ \Omega \cdot m$.

Entre les deux se trouvent les semi-conducteurs. Le nombre d'électrons libres, faible à température ambiante, augmente assez vite si l'on chauffe le matériau, ce qui entraîne une rapide variation de la conductivité de 10^{-5} à 10 $\Omega \cdot m$.

Document 3

Une cellule photovoltaïque étudiée de surface $S = 8{,}9 \times 10^{-5}\ m^2$ est une cellule triple jonction de Sharp. Une cellule photovoltaïque est un générateur électrique possédant une caractéristique, c'est-à-dire une courbe $I = f(U)$ particulière.

On peut y relever deux points particuliers : le courant de court-circuit I_{cc} (quand la tension aux bornes de la cellule est nulle) et la tension à vide U_v (quand le courant circulant dans le circuit est nul).



Courbe en pointillé : évolution de l'intensité du courant électrique.
Courbe en trait épais : évolution de la puissance électrique délivrée.
Sujet de spécialité, TS, Nouvelle-Calédonie, 2017.

Document 4

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est par définition : $\eta = \dfrac{P_{utile}}{P_{reçue}}$

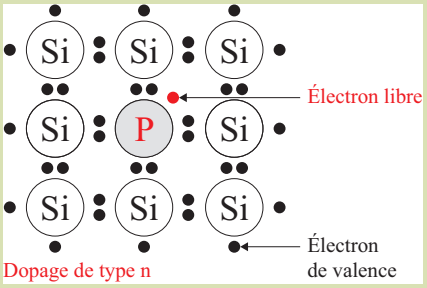
La puissance lumineuse reçue par la cellule est par définition : $P_{reçue} = E \times S$, où l'éclairement E est en $W \cdot m^{-2}$, et la surface S de la cellule est en m^2.

Le maximum de puissance d'un panneau est atteint dans des conditions particulières de courant et de tension, que la caractéristique permet de déterminer.

Document 2

Un réseau monocristallin d'atomes de silicium (Si) est un semi-conducteur. L'atome de silicium ayant 4 électrons de valence, il établit 4 liaisons covalentes avec 4 atomes voisins. Un semi-conducteur au silicium a une conductivité quasi nulle. Afin d'augmenter sa conductivité, on insère dans la structure cristalline des atomes d'autres éléments, appelés dopants.

Pour un semi-conducteur au silicium dopé au phosphore, un atome de phosphore P remplace un atome de silicium dans le réseau. L'atome P ayant 5 électrons de valence, il forme 4 liaisons covalentes avec des atomes de silicium voisins ; il reste 1 électron libre qui peut participer à la conduction électrique. L'atome de phosphore étant donneur d'électron, on parle de dopage de type n (n pour négatif).



D'après P. PEREZ, *Électromagnétisme – Vide et milieux matériels*, Masson, 1991.

Questions

1. Donner une définition de conducteur, isolant et semi-conducteur.
2. Définir la résistivité et la conductivité.
3. Que fait-on lorsque l'on « dope » un matériau ? Quel en est l'intérêt ?
4. Déterminer la valeur du courant de court-circuit I_{cc}.
5. Déterminer la tension à vide U_v.
6. Déterminer la puissance électrique maximale délivrée par la cellule, et la tension maximale.
7. L'ensoleillement, ce jour-là, est de 1 000 $W \cdot m^{-2}$. Calculer la puissance reçue par la cellule.
8. En déduire le rendement de la cellule.
9. Commenter la valeur du rendement moyen de la cellule triple jonction de Sharp.

LA BONNE MÉTHODE

1. S'aider du document 1.
2. La définition de la résistivité est donnée dans le document 1. La conductivité est l'inverse de la résistivité.
3. Le document 2 permet d'expliquer le dopage des matériaux semi-conducteurs.
4. Utiliser la caractéristique intensité-tension de la cellule photovoltaïque pour déterminer la valeur de I_{cc} par lecture graphique.
5. De même, par lecture graphique sur la caractéristique intensité-tension, on peut déterminer la valeur de U_v.
6. La puissance maximale est le maximum de la courbe donnant la puissance électrique délivrée.
7. Utiliser les données de l'énoncé et la relation déterminant la puissance lumineuse reçue.
8. Utiliser la relation donnée pour le calcul du rendement (attention aux unités !).
9. Habituellement, les cellules photovoltaïques ont des rendements autour de 10 à 20 %.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les atouts de l'électricité

Physique, bac ES, Sujet Métropole, 2019.

Avec l'essor des énergies renouvelables, la capacité mondiale de stockage de l'énergie devrait tripler d'ici l'année 2030. Une solution compétitive économiquement est à l'étude. Il s'agit du projet StEnSea (*Stored Energy in the Sea*).

Document 1 : description du projet

D'énormes sphères creuses en béton sont installées sous la mer. C'est avec ce dispositif que des chercheurs allemands de l'institut Fraunhofer IWES veulent créer un nouveau système de stockage de l'énergie, adapté aux éoliennes en mer. Dans les sphères en béton, l'électricité en surplus produite par les éoliennes est utilisée pour pomper l'eau hors de la sphère immergée. Pour récupérer l'énergie, il suffit alors d'ouvrir les vannes pour que l'eau rentre à nouveau dans la sphère en faisant tourner au passage une turbine. La quantité d'énergie produite augmente avec la pression exercée par l'eau sur la turbine. L'impact de ce dispositif sur l'environnement est mineur. L'équipe du projet a évalué les conditions de fonctionnement optimal pour un tel système. Une sphère de 30 mètres de diamètre, placée à une profondeur de 700 mètres, pourrait stocker une énergie d'environ 20 MWh. Le rendement de ce dispositif pourrait avoisiner les 85 %. Une ferme d'éoliennes off-shore pourrait exploiter la capacité de stockage d'un système comprenant 5 à 120 sphères immergées.

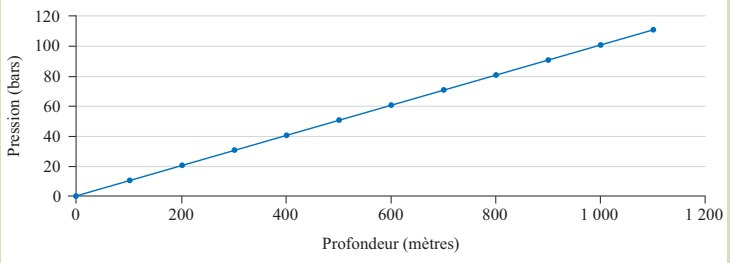
Données caractéristiques du projet	
Puissance fournie par une sphère	5 MW
Temps nécessaire pour remplir une sphère	4 h
Volume d'eau stockée	12 000 m^3

Document 3 : la batterie lithium-ion, une autre solution pour le stockagfa e de l'énergie

Les batteries lithium-ion sont utilisées dans les véhicules électriques ainsi que dans les fermes de batteries. L'américain Elon Musk a construit en Australie la plus grande ferme de batteries du monde. Appelée Powerpack, elle a pour mission de réguler la demande énergétique et de stocker l'énergie provenant d'un parc éolien. La ferme peut stocker une énergie totale de 129 MWh. Elle pourra ainsi alimenter 8 000 foyers pendant 24 heures ou 30 000 maisons pendant une heure, en cas de panne générale.

Source : d'après https://www.sciencealert.com

Document 2 : évolution de la pression exercée par l'eau en fonction de la profondeur

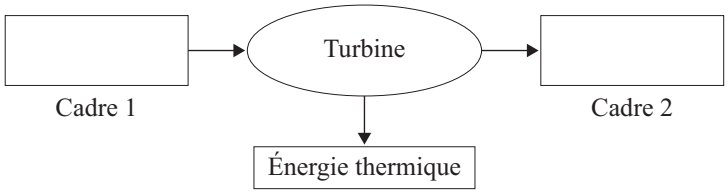


LA BONNE MÉTHODE

1. Les éoliennes produisent de l'énergie renouvelable grâce au vent.
2. Le document 1 et le document 2 donnent la relation entre la pression et la profondeur, ainsi qu'entre la profondeur et l'énergie produite.
3. Compléter la chaîne énergétique de la turbine.
4. **a)** Les données numériques du document 1 permettent de retrouver l'énergie produite par une sphère. **b)** La valeur de l'énergie produite par une sphère est celle de la question précédente. Comparer ensuite l'énergie stockée par les 100 sphères et celle de la ferme Powerpack.

Questions

1. Justifier la nécessité de stocker l'énergie produite par les éoliennes.
2. Expliquer l'intérêt d'immerger le dispositif à une grande profondeur.
3. Lorsque les sphères se remplissent d'eau et que l'énergie stockée est restituée, préciser sur la copie, sans recopier la chaîne énergétique ci-dessous, le numéro du cadre et lui associer une expression choisie parmi les suivantes : *énergie chimique, énergie électrique, énergie lumineuse, énergie mécanique, énergie thermique, énergie nucléaire.*

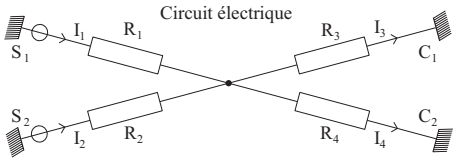


4. L'équipe du projet a évalué qu'une sphère pourrait stocker une énergie d'environ 20 MWh. **a)** Retrouver cette valeur par un calcul à l'aide des données. **b)** Calculer l'énergie stockée par un parc de 100 sphères, et la comparer à la capacité de stockage de la ferme Powerpack implantée en Australie. Commenter brièvement le résultat.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Optimisation du transport de l'énergie

On dispose de deux sources S_1 et S_2qui produisent du courant continu d'intensité I_1 et I_2 Le courant doit être acheminé vers deux cibles C_1 et C_2 qui attendent des intensités fixées valant respectivement I_3 et I_4 Le réseau comporte un unique nœud.



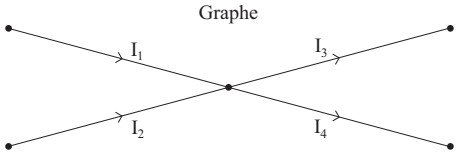
Les contraintes

a) Donner la contrainte au niveau du nœud sur les intensités (aussi appelé loi des nœuds). Comme I_3 et I_4 sont constantes, $I_3 + I_4$ est constant. On pose $K = I_3 + I_4$.
b) En déduire une expression de I_1 et I_2 en fonction de K. Commenter l'expression obtenue.
c) Donner les contraintes sur chacune des intensités I_1 et I_2 par rapport aux valeurs maximales s_1 et s_2.
d) En déduire une inégalité pour I_1 en fonction de K et s_2.
L'expression de la puissance totale dissipée par effet Joule est notée P_{JT} elle doit être calculée pour chacun des cas suivants :

Cas n° 1

$R_1 = R_3 = R_4 = 0{,}1\ \Omega$; $R_2 = 0{,}2\ \Omega$; $I_3 = I_4 = 3$ A ; $s_1 = s_2 = 5$ A.
a) Déterminer l'expression de P_{JT} en fonction de I_1.
b) On obtient une fonction du second degré en I_1. En traçant cette fonction à la calculatrice, déterminer la valeur du minimum de la courbe.

Le modèle mathématique associé est :



Le problème consiste à déterminer les intensités I_1 et I_2 en ampères, de manière à minimiser la puissance dissipée par effet Joule le long du réseau.

c) En déduire la valeur de I_2.

Cas n° 2

$R_1 = R_3 = R_4 = 0{,}2\ \Omega$; $R_2 = 0{,}05\ \Omega$; $I_3 = 4$ A ; $I_4 = 2$ A ; $s_1 = 5$ A ; $s_2 = 4$ A.
a) Déterminer l'expression de P_{JT} en fonction de I_1.
b) On obtient une fonction du second degré en I_1. En traçant cette fonction à la calculatrice, déterminer la valeur du minimum de la courbe.
c) En comparant la valeur de I_1 obtenue avec la contrainte précédente, expliquer pourquoi cette optimisation est impossible.

Cas n° 3

$R_1 = 0{,}05\ \Omega$; $R_2 = R_3 = R_4 = 0{,}25\ \Omega$; $I_3 = 4$ A ; $I_4 = 2$ A ; $s_1 = 4{,}5$ A ; $s_2 = 5$ A
a) Déterminer l'expression de P_{JT} en fonction de I_1.
b) On obtient une fonction du second degré en I_1. En traçant cette fonction à la calculatrice, déterminer la valeur du minimum de la courbe.
c) En comparant la valeur de I_1 obtenue avec la contrainte précédente, expliquer pourquoi cette optimisation est impossible.

LA BONNE MÉTHODE

Les contraintes

a) Faire le bilan des intensités qui arrivent et repartent du nœud.
b) Remplacer par K dans la relation précédente. K est une constante.
c) Les sources S_1 et S_2 ne peuvent délivrer que les intensités maximales respectives S_1 et S_2.
d) Utiliser la relation trouvée en b) pour déterminer une nouvelle relation à partir de celle déterminée en c).

Cas n° 1

a) La puissance dissipée par effet Joule est produite par chacune des résistances. Utiliser les valeurs de l'énoncé et l'expression de la question b) (des contraintes) pour donner une expression numérique de P_{JT} en fonction de I_1.
b) Sur la calculatrice, la variable est x. Il faut donc remplacer I_1 par x.
c) Avec l'expression de la question b) (des contraintes), calculer I_2.

Cas n° 2 et n° 3

a) Il s'agit de la même technique que pour la question précédente, en veillant à utiliser les nouvelles valeurs de l'énoncé.
b) Sur la calculatrice, la variable est x. Il faut donc remplacer I_1 par x.
c) Utiliser les expressions des contraintes sur I_1 pour montrer en quoi l'optimisation est impossible.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le Nobel de chimie aux pères des batteries lithium-ion

Deux Américains et un Japonais sont primés pour les piles qui, depuis les années 1990, ont envahi l'électronique portable et l'automobile.

L'académie suédoise s'est amusée d'avoir battu un record en attribuant, mercredi 9 octobre, son prix Nobel de chimie à l'Américain John Goodenough, né en Allemagne en 1922 : il devient son plus vieux lauréat. Mais le plus important est la contribution récompensée, la batterie lithium-ion, désormais omniprésente : téléphones et ordinateurs portables, appareils photo, baladeurs ou même véhicules électriques… *« C'est l'une des grandes avancées du siècle dernier, avec le transistor ou la fibre optique »*, salue Jean-Marie Tarascon, professeur au Collège de France, pionnier de ce type de batteries.

Le jury a récompensé trois acteurs-clés de cette technologie. Par ordre chronologique d'intervention, l'Anglo-Américain Stanley Whittingham, né en 1941, de l'université Binghamton (Etat de New York), John Goodenough, de l'université du Texas, et le Japonais Akira Yoshino, né en 1948, de l'entreprise Asahi Kasei Corporation et de l'université Meijo, à Nagoya. Ils ont permis de concentrer un maximum d'électrons dans des matériaux de façon réversible, afin de les libérer à la demande. Pour l'essentiel, ces électrons sont arrachés du lithium, un métal très léger, où ils sont concentrés dans un minimum de place.

Potentiel multiplié par trois

Au milieu des années 1970, les batteries contiennent peu d'énergie et sont composées de deux électrodes plongées dans une solution aqueuse, qui se dégrade vite et limite leur performance. Stanley Whittingham réalise qu'un nouveau matériau feuilleté à base de lithium, de titane et de soufre, peut changer la donne en servant d'« éponge » à lithium à une des deux polarités de la pile. Tandis que les électrons foncent dans les fils électriques, le lithium, dénudé d'un de ses électrons, passe d'une électrode à l'autre dans un électrolyte sans eau. Le potentiel de cette première pile est triplé !

Puis, en 1980, John Goodenough améliore cette électrode en utilisant un oxyde de lithium et cobalt. Presque une amélioration du double, qui vient de la modification des niveaux d'énergie des électrons dans le matériau.

Mais, comme un cœur, une batterie a deux ventricules, les fameuses électrodes : celle où arrivent les électrons pendant une décharge et celle d'où ils partent. Si la première, appelée cathode, a été améliorée par les deux premiers lauréats, la seconde, l'anode, l'a été par le troisième, Akira Yoshino. En 1985, il remplace le lithium métallique utilisé jusqu'alors par un matériau à base de carbone en feuillet, un cousin du graphite. L'idée évite l'accumulation de lithium sur l'électrode, qui forme des petites branches, au point de court-circuiter la pile.

L'entreprise du lauréat sera doublée de quelques mois par Sony pour la commercialisation en 1991. En 2014, un autre jury, celui du prix Draper, décerné par l'Académie nationale d'ingénierie américaine, avait d'ailleurs récompensé, en plus d'Akira Yoshino, un de ses compatriotes, Yoshio Nishi, son concurrent chez Sony. Ce palmarès avait omis Whittingham mais avait distingué un Franco-Marocain, Rachid Yazami, à qui le jury attribuait l'invention de la fameuse anode en graphite. Ce dernier, sibyllin, se dit *« surpris »* par le choix du comité Nobel : *« Il a couronné deux cathodes (Goodenough et Whittingham) et celui qui a réalisé le premier prototype qui fonctionne (Yoshino) et a oublié qu'une batterie a besoin d'une anode qui marche »* – sous-entendu la sienne. *« Il y a polémique. L'histoire est compliquée. C'est délicat d'en parler »*, estime un chimiste.

Pour l'anecdote, la première batterie de Sony ne contenait en fait pas de graphite mais un composé carboné, dérivé de pétrole. Et aujourd'hui, les fabricants gardent jalousement leurs recettes à base de graphite, de noir de carbone, de carbone désordonné et de divers additifs, qui ont permis de doubler les concentrations en énergie des batteries lithium-ion.

En outre, souligne Christian Masquelier, professeur à l'université Jules-Verne d'Amiens, *« le lithium métallique n'est pas abandonné. Il sert dans les batteries de véhicules électriques, comme les Bluecar ou Bluebus de l'entreprise Bolloré ». « J'observe depuis deux ans un engouement pour ces systèmes utilisant du lithium métallique,* note Dominique Guyomard, directeur de recherche CNRS à Nantes et qui collabore avec le groupe Bolloré. *Tous les industriels s'y mettent. Il faut dire qu'il y a dix fois plus d'électrons par gramme d'électrode avec les anodes métalliques. »*

Les chimistes n'en ont donc pas fini avec ces batteries. Il faut par exemple encore augmenter leur capacité sans nuire

POURQUOI CET ARTICLE ?

Une batterie lithium-ion est un accumulateur électrochimique, c'est-à-dire qu'elle est capable de fournir de l'énergie électrique à partir d'énergie chimique, mais peut également se recharger avec la conversion d'énergie inverse. Son plus grand avantage est sa durée de vie face à un grand nombre de cycles charge-décharge. Elle constitue donc une solution pertinente pour le stockage de l'énergie électrique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

à la sécurité. En effet, à force de charge et de décharge, l'électrolyte qui sépare les deux électrodes peut se dégrader, conduisant à des dégagements gazeux et donc à des explosions ou des inflammations. Christian Masquelier possède aussi des brevets avec John Goodenough pour des électrodes plus efficaces, contenant du fer et du phosphore.

Le cobalt, rare et cher, pourrait aussi être remplacé par du nickel, plus disponible. Le sodium pourrait même évincer le lithium. Sans compter qu'il faut aussi songer au recyclage de tous ces matériaux et produits.

David Larousserie,
dans *Le Monde* daté du 11.10.2019

Le solaire sort de l'ombre

Chute du prix des panneaux, afflux massif de capitaux et contraintes environnementales poussent les producteurs d'électricité, les industriels et de plus en plus de pays à jouer massivement la carte du soleil. La Chine fait pour l'instant la course en tête

Sans bruit, le monde vient d'entrer dans une nouvelle ère énergétique, celle du solaire. Le photovoltaïque n'est plus une lubie d'écologiste. Face à la pollution du charbon et à l'envolée des coûts du nucléaire, investisseurs et industriels jouent désormais ouvertement et massivement la carte du soleil. En 2015, pour la première fois, les nouvelles capacités de production à partir des énergies renouvelables (hors grands barrages) ont représenté 53,6 % de l'ensemble des nouveaux moyens de production raccordés aux réseaux, indique le 10e rapport annuel du Programme des Nations unies pour l'environnement publié en mars 2016 : 62 gigawatts (GW) d'éolien et 56 GW de solaire. Les capitaux mobilisés ont battu un nouveau record, à 265,8 milliards de dollars (247,5 milliards d'euros). On y investit désormais deux fois plus que dans les énergies fossiles (130 milliards) et le potentiel du solaire y est beaucoup plus important que celui des autres énergies renouvelables.

« L'année 2016 marquera un point de bascule », assure Thierry Lepercq, directeur général adjoint d'Engie chargé de l'innovation et de la recherche. *« Retenez trois chiffres : 70 gigawatts, la capacité solaire additionnelle en 2016* [après 50 GW en 2015]*, plus que l'éolien ; 26 dollars, le prix d'un mégawattheure (MWh) du photovoltaïque sur un projet de 1 milliard de dollars à Abou Dhabi ; et zéro, le prix de l'électricité à certains moments au Chili. »*

Pourquoi les centrales solaires photovoltaïques sont-elles devenues compétitives dans de nombreux pays et se développent sans les subventions massives reçues en Europe au début de leur déploiement ? Le phénomène doit beaucoup à la domination chinoise sur les équipements. Un mal pour un bien. Si elle a tué une partie de l'industrie occidentale, notamment allemande, elle a provoqué une chute des prix spectaculaire. *« Dans les usines, l'automatisation a fortement réduit le taux de casse, explique Antoine Cahuzac,* directeur général d'EDF Energies nouvelles. *De plus, tous les fabricants innovent et produisent des cellules plus efficaces. Ils ont aussi augmenté leur durée de vie, qui peut atteindre trente-cinq ans contre vingt-cinq il y a cinq ans grâce à une plus grande fiabilité des matériaux. »* Les panneaux sont devenus un produit de base fabriqué en grande quantité, comme les écrans plats de téléviseur.

Les renouvelables sont ainsi passées *« du statut de niche au statut de solution préférée »*, assurait récemment Adnan Amin, directeur de l'Agence internationale des énergies renouvelables, basée à Abou Dhabi, en présentant son dernier rapport. *« Les panneaux solaires en sont le meilleur exemple, souligne ce document. Leur coût a baissé de moitié depuis 2010 et devrait baisser encore de 60 % dans les dix prochaines années. »*

Un phénomène plus conjoncturel s'est ajouté à cette tendance : la concurrence des producteurs de panneaux, qui a créé des surcapacités mondiales et tiré les prix vers le bas. M. Cahuzac s'attend, une fois ces stocks écoulés, à une remontée *« marginale »* des prix. Dans ce secteur très cyclique, la consolidation va se poursuivre et les nouvelles capacités installées devraient stagner en 2017 au niveau de 2016, prévoit le patron du chinois Trina Solar, deuxième fabricant mondial de panneaux, dans un entretien à l'agence Bloomberg.

Un signe qui ne trompe pas sur la maturité de cette énergie : les tarifs de rachat pour soutenir la filière sont remplacés, partout dans le monde, par des appels d'offres. Début 2016, 64 pays en avaient lancé dans le solaire (et l'éolien), *« suscitant des offres historiquement basses (prix modiques, volumes élevés) dans les pays émergents »*, note le réseau international REN21.

Les émergents en pointe

« Nous faisons du solaire photovoltaïque à 30 dollars le MWh au Mexique », note M. Lepercq. On en est encore loin en France, mais les prix baissent aussi. Pour

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

POURQUOI CET ARTICLE ?

Une cellule photovoltaïque permet de convertir le rayonnement solaire en électricité. Un des inconvénients majeurs est actuellement son rendement très faible. De ce fait, le prix du kWh à produire par ce dispositif reste cher. Mais le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) vient de mettre au point une cellule photovoltaïque baptisée Tandem Made in France qui permettrait d'atteindre un rendement de 30 %, ce qui serait prometteur pour l'avenir de la production solaire en France.

les centrales au sol, moins coûteuses que sur le bâti, le prix a été divisé par six entre 2007 et 2014, où il était encore situé dans une fourchette de 74 euros à 135 euros par MWh, rapporte l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, l'Ademe, qui escompte une nouvelle baisse de 35 % à l'horizon 2025.

L'Europe n'est pas le continent au potentiel le plus prometteur, même si l'Allemagne est un pays pionnier. Trois pays ont encore fourni en 2015 la majorité des capacités additionnelles : la Chine, le Japon et les Etats-Unis. Mais le boom est planétaire, particulièrement dans les pays émergents qui conjuguent fort ensoleillement, croissance soutenue de la demande d'électricité et cadre réglementaire sécurisé pour les investisseurs. *« Cette révolution sert leur développement. Ils peuvent valoriser leur potentiel, et cela les affranchit de leur dépendance énergétique »*, se félicite Isabelle Kocher, directrice générale d'Engie, qui affiche notamment de grandes ambitions en Afrique.

La Chine reste une locomotive. Le solaire y enregistrera un doublement de ses capacités entre 2015 et 2020 pour atteindre 110 GW, selon l'Agence nationale de l'énergie. Et si elle est désormais électrifiée à 100 %, c'est grâce au solaire domestique (hors réseau). L'Arabie saoudite a défini un vaste plan en faveur des énergies renouvelables et le fonds souverain d'Abou Dhabi y investit depuis la fin des années 2000, dans la production de panneaux, les centrales et la recherche. Au Chili, privé de toute ressource fossile, le solaire pèse déjà 4 % du « mix » énergétique alors qu'il en était absent en 2012. Y compris pour alimenter des utilisateurs d'électricité aussi gourmands que les mines de cuivre.

Les électriciens convertis

Le solaire domestique a séduit le Bangladesh et les miniréseaux se développent en Afrique de l'Est (Kenya, Ouganda…) pour les villages enclavés. L'Inde prévoit un ambitieux plan de 100 GW de solaire d'ici à 2022. A l'initiative de son premier ministre, Narendra Modi, une « alliance internationale » en faveur de cette énergie a été créée fin 2015, en marge de la COP21, à Paris. Les 121 pays qu'elle rassemble s'engagent à assurer des transferts de technologies et à faciliter les financements dans tous les pays à fort potentiel solaire.

Résultat de ce changement d'échelle, toutes les grandes compagnies européennes d'électricité ont pris le virage du solaire, du français Engie à l'italien Enel. Jusqu'au géant EDF, dont l'ADN nucléaire est en train de se modifier. Et toutes les grandes entreprises mondiales se tournent vers l'énergie solaire pour leur propre consommation, des leaders de la grande distribution Walmart, Procter & Gamble ou Ikea à Google pour refroidir ses énormes centres de données…

Certains pétroliers eux-mêmes croient aux vertus du solaire et s'y mettent. Aurait-on imaginé, il y a quelques années, que le patron de Total intervienne dans un cénacle des énergies vertes ? Patrick Pouyanné expliquera, à l'occasion du colloque annuel du Syndicat des énergies renouvelables réuni le 31 janvier, pourquoi et comment il entend se développer dans l'électricité solaire après le rachat du fabricant californien de panneaux SunPower en 2011 et celui des batteries Saft en 2016.

Bien que, aujourd'hui, les panneaux solaires ne représentent que 1,5 % des capacités de production électrique installées, c'est le « mix électrique mondial » qui est en train de se redessiner, même s'il est encore très largement dominé par les énergies fossiles. M^me^ Kocher estime qu'en 2050 la moitié de l'électricité pourra être produite par des énergies renouvelables décentralisées, surtout le solaire, l'autre moitié sortant des grandes centrales traditionnelles. Et quand on dresse le bilan carbone du solaire, il est positif.

Grâce à l'énergie propre et renouvelable que produisent depuis 1975 les panneaux solaires, ils auront compensé d'ici à 2018 les gaz à effet de serre émis pour les produire, indique une étude néerlandaise (université d'Utrecht) publiée fin 2016 dans le journal en ligne *Nature Communications*. Désormais, à chaque doublement de capacités solaires installées, l'énergie nécessaire pour produire les panneaux baisse de 12 % à 13 % et les gaz à effet de serre émis de 17 % à 24 %, ont calculé ses auteurs. En quarante ans, le nombre de panneaux solaires est passé de 10 000 à 1 milliard. Avec une durée de vie moyenne de trente ans, une ferme solaire remboursera « plusieurs fois » l'énergie nécessaire à la fabrication de ses équipements.

Et si le solaire rendait le nucléaire obsolète à un horizon pas si lointain, sachant que le charbon est condamné à plus ou moins longue échéance ? Tout un symbole, quarante entreprises ont déposé une demande auprès des autorités ukrainiennes pour construire 2 GW de panneaux solaires… à l'intérieur de la zone d'exclusion radioactive entourant la centrale de Tchernobyl, où eut lieu en 1986 la pire catastrophe de l'histoire du nucléaire civil. L'envolée des coûts pèse sur le prix du MWh produit : 109 euros pour les EPR anglais d'EDF.

« Jusqu'à présent, le nucléaire était le seul moyen de produire une électricité compétitive à grande échelle ; ce n'est plus le cas, analyse M^me^ Kocher. *Le nouveau nucléaire a un espace de développement plus restreint qu'avant. »* M. Cahuzac voit au contraire un avenir à l'atome, qui *« ne répond pas aux mêmes besoins »*. Un réacteur fournit une énorme quantité d'électricité vingt-quatre heures sur vingt-quatre et l'on peut faire évoluer sa puissance en moins d'une heure, plaide-t-il. Mais les énergies renouvelables s'imposent peu à peu comme une référence pour comparer les prix.

La menace Trump

Patron du nouveau nucléaire chez EDF, Xavier Ursat reconnaît que l'« EPR nouveau modèle » en préparation chez EDF-Areva

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

a un objectif : *« Qu'il coûte moins cher en euros par kilowattheure que la moins chère des énergies renouvelables installée au même endroit à cette époque-là. »* On n'en est pas encore là. Mais pour avoir une véritable estimation de la compétitivité du solaire (et des renouvelables en général), il faudrait supprimer toutes les subventions, qui sont beaucoup plus importantes en faveur des énergies fossiles.

Reste une menace qui plane aux Etats-Unis sur cette feuille de route brillante : l'arrivée à la Maison Blanche de Donald Trump, fervent défenseur du charbon, du pétrole et du gaz. Le 10 janvier, 640 grands groupes (Intel, Johnson & Johnson, Hewlett-Packard, Levi Strauss, Nike, Ikea, Adidas, Danone, Schneider Electric, L'Oréal…) lui ont tout de même adressé une mise en garde : *« Echouer à construire une économie bas carbone mettrait en danger la prospérité américaine »*, lui ont-ils écrit en réitérant leur soutien à l'accord de Paris. Un investisseur aussi avisé que Bill Gates vient d'annoncer la création d'un fonds de 1 milliard de dollars chargé d'investir dans la recherche sur l'énergie et la limitation des émissions de carbone.

En quittant la Maison Blanche, Barack Obama avait souligné, à l'adresse de son successeur, que *« le secteur solaire emploie désormais plus d'Américains que les mines de charbon dans des emplois mieux payés que la moyenne et qui ne peuvent être délocalisés »*. Au niveau mondial, il fait en effet travailler 2,7 millions de personnes.

Soutenu par l'entrée en force du numérique dans le monde de l'énergie, le solaire est au cœur d'une « révolution » et le premier maillon d'une chaîne de valeur (stockage d'électricité, réseaux intelligents, Internet des objets de la maison, mobilité électrique, hydrogène…) qui apportera *« beaucoup plus d'énergie, beaucoup moins chère et pour beaucoup plus d'usages »*.

Jean-Michel Bezat, dans *Le Monde Eco & entreprise* daté du 31.01.2017

Energie : la promesse hydrolienne

Le marché mondial des turbines sous-marines représenterait entre 70 et 100 milliards d'euros à l'horizon 2030. Reste à en confirmer la viabilité.

En se rendant à Cherbourg (Manche), lundi 25 février, Delphine Batho se savait attendue par tous ceux qui misent sur l'émergence d'une filière industrielle consacrée à l'énergie des courants marins en France. La ministre de l'écologie devait annoncer le lancement d'un appel à manifestation d'intérêt afin de stimuler, dans un premier temps, la recherche, et, dans un second, l'installation de « fermes pilotes » d'hydroliennes immergées en pleine mer. Le préfet maritime de Cherbourg sera chargé d'identifier les sites propices à l'installation de ces fermes.

« La France, avec le deuxième potentiel d'Europe en matière d'énergie hydrolienne [après le Royaume-Uni]*, a une place de leader à prendre,* affirme Mme Batho. *Je sais que les industriels attendent un soutien clair des pouvoirs publics aux énergies marines, ainsi que de la visibilité. Je peux leur assurer que le calendrier nécessaire au déploiement de la filière sera tenu. »*

Alliés ou non à des énergéticiens, une dizaine de fabricants de turbines dans le monde – dont trois groupes français – sont impatients d'en découdre pour se faire une place sur ce marché à venir. Au niveau mondial, il représentera entre 70 et 100 milliards d'euros à l'horizon 2030, a calculé le cabinet Indicta. *« Après l'éolien offshore posé, seul procédé actuellement commercialisé dans les énergies marines renouvelables* [EMR]*, l'hydrolien est la technologie la plus mature, devant l'éolien flottant, le houlomoteur* [l'énergie de la houle] *et l'énergie thermique des mers »*, explique Antoine Rabain, responsable du pôle énergies et technologies vertes chez Indicta.

Bien identifié puisqu'il n'est intéressant d'installer des hydroliennes que dans des zones où les courants sont compris entre 2 et 8 mètres par seconde, le marché mondial de l'hydrolien s'appuie sur une puissance installée potentielle estimée à 90 gigawatts (GW). *« A terme, il ne devrait rester que quatre ou cinq leaders mondiaux, et il y aura une prime aux premiers entrants »*, pronostique Antoine Rabain.

Dans cette course contre la montre, les industriels français jouent leur chance. Ainsi, Alstom vient de racheter Tidal Generation Limited à Rolls-Royce et peut se targuer, avec ce concepteur d'hydroliennes, *« d'avoir produit sur le réseau électrique du courant à partir d'une turbine immergée »*, comme le souligne Jérôme Pécresse, président d'Alstom Renewable Power. Pour autant, on est loin de la phase d'industrialisation. *« Nous sommes au stade du développement d'une technologie nouvelle et il faut passer par la case d'une ferme pilote, avec quelques machines, pour tester notamment les effets de sillage et la connexion au réseau »*, précise Jérôme Pécresse.

Les deux « spots » français sont connus : le raz Blanchard, qui passe entre le cap de la Hague (Manche) et l'île anglo-normande d'Aurigny, et le passage du Fromveur, entre l'archipel de Molène et l'île d'Ouessant (Finistère). DCNS, qui vient d'investir 130 millions d'euros pour prendre le contrôle de l'irlandais OpenHydro, s'est associé à EDF et espère installer dans le

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

raz Blanchard une ferme pilote de sept machines.

C'est également une des zones retenues par GDF-Suez. Associé à l'allemand Voith Hydro et au constructeur naval tricolore CMN, l'énergéticien ambitionne d'y installer d'ici à 2016 un parc pilote de trois à six turbines, pour un investissement de 20 à 30 millions d'euros. GDF-Suez développe aussi un projet avec la start-up française Sabella dans le passage du Fromveur.

DCNS, qui espère réaliser 1 milliard d'euros de chiffre d'affaires par an dans l'hydrolien à partir de 2025, et son partenaire EDF ne sont pas découragés par l'avarie dont ils ont souffert en septembre 2012. Pendant des tests en rade de Brest, un treuil chargé de monter et descendre leur hydrolienne expérimentale de 1 000 tonnes, qui devait être testée au large de l'île de Bréhat (Côtes d'Armor), est tombé en panne. Depuis, la turbine gît au fond de la rade. Une opération de récupération pourrait être menée courant mars.

Derrière les projets des uns et des autres, c'est toute une filière EMR qui pourrait se développer. *« Le savoir-faire acquis avec l'hydrolien pourrait ensuite être décliné sur d'autres technologies, en particulier dans les opérations en mer »*, argumente Antoine Rabain. Sans oublier la dimension sociale : les EMR pourraient permettre de créer jusqu'à 82 000 emplois en France à l'horizon 2030, dont 10 000 pour l'hydrolien, selon cet expert. Mais pour que ce scénario se réalise, *« il est nécessaire,* selon Bernard Planchais, directeur général délégué de DCNS, *que les pouvoirs publics lancent un appel d'offres dans les douze mois qui viennent, faute de quoi le centre de gravité de cette industrie risque bien de ne pas être en France »*.

Une vision partagée par Jean-François Cirelli. Pour le vice-président de GDF-Suez, *« les acteurs publics doivent donner un feu vert pour que l'on puisse passer à la phase de précommercialisation de l'hydrolien à travers des parcs pilotes ». « Cette étape est importante pour confirmer la viabilité technologique et économique des projets, poursuit-il. Les pouvoirs publics doivent aussi définir le cadre dans lequel toute la filière pourra travailler en confirmant les zones de tests et en élaborant un mécanisme financier plus incitatif. »*

Delphine Batho s'est engagée à ce que le tarif de rachat de l'électricité qui sera produite par des hydroliennes soit fixé et connu avant le mois de juin.

Anne Eveno avec Gilles van Kote, dans *Le Monde* daté du 26.02.2013

POURQUOI CET ARTICLE ?

Dans une hydrolienne, le rotor tourne avec l'énergie cinétique des courants marins. L'action du rotor entraîne alors un alternateur qui convertira l'énergie mécanique (cinétique) en énergie électrique. Enfin, celle-ci sera acheminée par des fils vers le rivage. L'énergie utilisée pour faire fonctionner une hydrolienne est inépuisable et continue contrairement à d'autres technologies, mais l'impact sur l'environnement et des problèmes techniques (salinité, puissance des courants, etc.) peuvent constituer un frein à son développement.

Record mondial pour un câble électrique supraconducteur

Une ligne de 600 mètres installée à Long Island par un industriel français.

C'est une inauguration d'un genre particulier qui doit avoir lieu, mercredi 25 juin, sur l'île de Long Island (New York). Pas de bâtiment officiel, pas de stade, pas de monument, mais… trois câbles. Trois câbles électriques très spéciaux, parce que supraconducteurs : l'électricité qui les parcourt sur 600 mètres n'y rencontre aucune résistance. Cette propriété curieuse, mise en évidence en 1911, nécessite toutefois une très basse température, de l'ordre de – 200 °C dans le cas présent, condition difficile à obtenir.

Le câble inventé par le français Nexans – numéro un mondial du secteur – pour le compte de l'opérateur américain Long Island Power Authority, est donc un bijou de technologie de 15 cm de diamètre. Au cœur de cette nouveauté, un ruban de seulement 4 mm de largeur, une matrice d'argent sur laquelle sont « brodés » des filaments supraconducteurs à base de bismuth. Autour coule le liquide réfrigérant, de l'azote liquide. L'enveloppe cryogénique, qui empêche l'ensemble de se réchauffer, est réalisée avec un système de deux tubes concentriques séparés par un excellent isolant : le vide.

300 000 foyers alimentés

« Il s'agit du câble supraconducteur de transport électrique le plus long et le plus puissant du monde », résume Jean-Maxime Saugrain, directeur de l'activité supraconducteurs chez Nexans. La liaison doit alimenter en électricité quelque 300 000 foyers avec une tension de seulement 138 000 volts, alors qu'avec un câble traditionnel, il faudrait tripler la

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

POURQUOI CET ARTICLE ?

Aujourd'hui, le transport de l'énergie électrique, même s'il est fait à haute tension, implique des pertes par effet Joule non négligeables. Les scientifiques se sont donc tournés vers la supraconductivité. En refroidissant les câbles constitués de matériaux supraconducteurs à des températures avoisinant – 200 °C, le matériau devient un conducteur électrique quasi parfait et permet de transporter au moins 100 fois plus d'électricité qu'un câble en cuivre.

tension pour transporter une puissance équivalente. Comme le souligne Jean-Maxime Saugrain, *« le but de la manœuvre, c'est de montrer la faisabilité du système, mais aussi d'éviter de tirer une ligne aérienne à haute tension de 345 000 volts »*, avec tous les inconvénients que cela suppose dans un milieu fortement urbanisé. *« Le câble supraconducteur ne génère, par construction, aucun champ magnétique,* poursuit Jean-Maxime Saugrain. *Il n'a donc aucun impact électro-magnétique sur l'environnement. Il n'y a pas non plus d'impact thermique, à la différence d'un câble standard, qui chauffe et dont il faut évacuer la chaleur. »*

Les avantages d'un système supraconducteur sont multiples : placé dans les points stratégiques du réseau, il permet de le désengorger et d'éviter qu'il s'effondre en cas de demande subite ; à la différence des lignes à haute tension, les câbles peuvent être tirés dans des conduites existantes, sur des ponts ou dans des tunnels de service, à condition toutefois d'installer des stations de refroidissement tous les 5 kilomètres ; par son absence de champ magnétique et son absence d'échauffement, il répond aux attentes des protecteurs de l'environnement.

Reste la question du prix. L'installation de Long Island a coûté 50 millions de dollars – *« essentiellement en coût de développement »*, précise M. Saugrain. Nexans, qui compte une longueur d'avance sur ses concurrents, le japonais Sumitomo et l'américano-danois Ultera, travaille déjà sur une version plus commerciale, pour minimiser les coûts. Une quatrième ligne devrait être tirée à Long Island en 2010, avec un supraconducteur à base d'yttrium, moins cher que celui au bismuth.

Pierre Barthélémy,
dans *Le Monde* daté du 25.06.2008

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

UNE HISTOIRE DU VIVANT









© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La biodiversité et son évolution

La biodiversité est actuellement menacée par les activités humaines. Pour le montrer, il faut dans un premier temps être capable de l'estimer. La première partie du cours présente donc certaines des méthodes que l'on emploie pour évaluer la biodiversité à l'échelle des écosystèmes et des espèces. La seconde partie s'attache ensuite à montrer comment les processus évolutifs font varier la composition génétique des populations, qui est une autre échelle de biodiversité. Enfin, la dernière partie présente en quoi notre espèce est une menace pour la biodiversité et en quoi elle peut atténuer ce danger.

Comment évalue-t-on la biodiversité ?

Comme son nom l'indique, la *biodiversité* est la diversité des êtres vivants sur notre planète. La biodiversité exacte d'un milieu est difficile à évaluer et un certain nombre d'indicateurs existent. Un des plus importants est la richesse spécifique, c'est-à-dire la détermination du nombre d'espèces présentes dans un milieu donné.

On peut évaluer cette richesse spécifique de différentes manières. La première est de définir une surface du milieu minimale où l'on estime que sont présentes la majorité des espèces du milieu. On arpente ensuite minutieusement cette surface et on compte toutes les espèces rencontrées. Évidemment, cette technique a ses inconvénients : d'une part, si on a mal choisi la surface de comptage, on peut rater des espèces ; d'autre part, certaines espèces rares peuvent ne pas être présentes dans la surface de comptage ou passer tout simplement inaperçues. On essaie donc d'agrandir ou de multiplier les surfaces de comptage pour limiter le nombre d'espèces non observées.

Une manière complémentaire de faire est d'effectuer des prélèvements de sol ou d'eau et de réaliser des analyses d'ADN afin de déterminer les espèces présentes. Ainsi, on peut trouver la trace d'espèces discrètes ou même non visibles à l'œil nu, comme les champignons ou les microbes.

Dans tous les cas, on utilise des méthodes statistiques pour extrapoler la quantité totale d'espèces présentes à partir des échantillonnages réalisés.

Un autre paramètre que l'on cherche à évaluer est l'abondance, qui est tout simplement le nombre d'individus présents. Il ne s'agit pas au sens strict d'une estimation de la biodiversité, puisque l'on s'intéresse à une quantité et pas à une diversité des individus. Toutefois, il y a un rapport entre ces deux paramètres : par exemple, un déclin du nombre d'individus d'une population est souvent associé à une diminution de la biodiversité. En effet, si tous les individus d'une population disparaissent, l'espèce disparaît dans le milieu considéré. D'ailleurs, certaines espèces, appelées bio-indicatrices, sont considérées comme particulièrement sensibles aux modifications du milieu et le suivi des populations permet d'évaluer l'état du milieu.

Pour évaluer l'abondance, il existe plusieurs méthodes dont celle dite de « capture-marquage-recapture ». Elle consiste dans un premier temps à collecter un certain nombre d'individus, à les marquer, puis à les relâcher. Puis, dans un deuxième temps, on capture à nouveau un certain nombre d'individus. Le nombre d'individus marqués recapturés permet alors une estimation de la population totale, si l'on tient compte d'une certaine marge d'erreur.

L'évolution de la composition génétique des populations

On observe que la composition génétique des populations d'une espèce change de génération en génération. Il s'agit là encore d'une variation de la biodiversité, mais au sein même d'une population donnée.

Pour comprendre ces variations, on part d'un modèle mathématique théorique qui décrit la manière dont les allèles d'un gène devraient se transmettre de façon probabiliste de génération en génération au sein d'une population : le modèle de Hardy-Weinberg. Ce modèle montre que les fréquences alléliques restent stables d'une génération à l'autre : c'est l'équilibre de Hardy-Weinberg. Mais il suppose un nombre important de conditions : la population doit être de taille infinie (ou du moins très grande) ; la reproduction entre individus doit être purement aléatoire ; tous doivent être également fertiles ; il ne doit pas y avoir de mutations ; la population ne doit pas être sujette à des émigrations ou des immigrations.

Bien évidemment, aucune population réelle ne respecte toutes ces conditions. En effet, les mutations, la sélection naturelle, la dérive génétique et d'autre facteurs sont alors forcément à l'œuvre. En conséquence, malgré une certaine tendance à la stabilité – surtout si la population est grande et se rapproche des conditions précédemment décrites – toutes les populations voient leur composition génétique varier de génération en génération.

Conséquences des activités humaines sur la biodiversité

L'espèce humaine exploite les nombreuses ressources des écosystèmes et, trop souvent, les surexploite, ce qui aboutit à une diminution de la biodiversité. L'Homme peut ainsi faire disparaître directement des espèces (comme le dodo de l'île Maurice, qui a disparu, chassé pour sa viande et à cause de l'introduction sur l'île de prédateurs), mais également des écosystèmes entiers, par exemple en asséchant des zones humides pour en faire des champs cultivés.

Toutefois, l'impact des activités humaines n'est généralement pas aussi flagrant, quoiqu'il conduise à une dégradation des écosystèmes et de la biodiversité qu'ils contiennent. Prenons l'exemple de la fragmentation de l'habitat. L'homme érige diverses structures, routes, voies ferrées, voire des villes entières, qui constituent des barrières divisant une grande zone uniforme en un certain nombre d'habitats plus petits. Or, les bordures de ces différents petits habitats sont plus exposées à de nombreux phénomènes qui rendent les conditions de vie plus difficiles pour de nombreuses espèces, ce qui entraîne leur raréfaction ou leur disparition. De plus, le morcellement complique la circulation de certaines

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

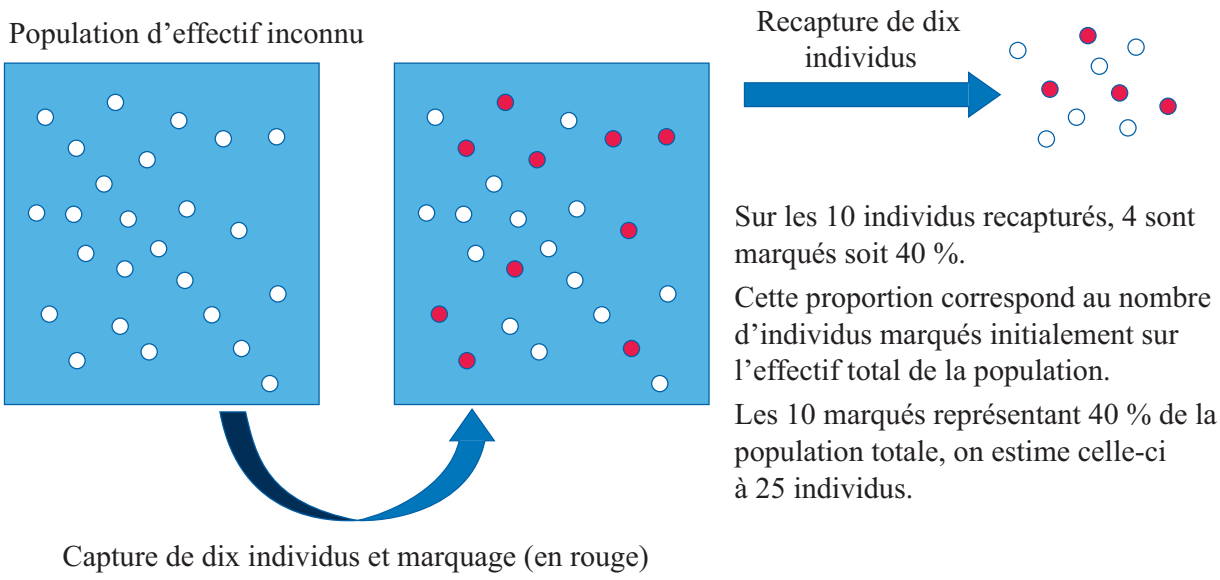


Figure 1. La méthode de capture-marquage-recapture.

espèces, même s'il facilite la circulation de certaines autres.

La fragmentation d'une grande population en plusieurs petites est une menace pour la biodiversité, car les plus petites populations ont une tendance à s'appauvrir génétiquement. La baisse de la diversité génétique est problématique, car si une menace nouvelle apparaît, la capacité d'adaptation de la population est réduite, ce qui augmente ses risques de disparition.

Bien sûr, certaines mesures sont prises pour lutter contre la dégradation généralisée des écosystèmes : conservation d'espèces et réintroduction ; restauration d'écosystèmes dégradés ; tentatives de gestion plus durable des ressources naturelles. Mais l'expansion démographique de notre espèce, ainsi que la consommation toujours plus importante des ressources naturelles, font peser une menace toujours croissante sur la biodiversité.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• Un million d'espèces en danger d'extinction p. 61
(Pierre Le Hir, dans *Le Monde* daté du 07.05.2019)

MOTS-CLÉS

ÉCHANTILLON : En statistiques, ensemble d'individus jugé représentatif d'une population.

ÉCOSYSTÈME : Association d'un biotope et d'une biocénose, c'est-à-dire d'un milieu et de tous les êtres vivants qui l'occupent.

ESPÈCE : Il existe plusieurs définitions de l'espèce, mais la plus courante est qu'il s'agit d'un ensemble d'êtres vivants capables de se reproduire entre eux et d'avoir une descendance elle-même féconde.

MILIEU : Partie du monde avec laquelle un être vivant est en contact, là où il vit et se développe. C'est aussi ce que l'on appelle un biotope.

POPULATION : En écologie, ensemble des individus d'une même espèce qui occupent simultanément le même milieu. Les espèces répandues sont ainsi généralement composées de plusieurs populations qui occupent des endroits différents.

ZOOM SUR…

L'ÉQUILIBRE DE HARDY-WEINBERG

L'exemple qui suit présente l'équilibre des fréquences alléliques d'un gène déterminant la couleur du corps chez une population théorique d'insectes. Le gène existe sous forme de deux allèles : A, dominant, qui donne une couleur verte aux insectes ; a, récessif, qui leur donne une couleur brune.

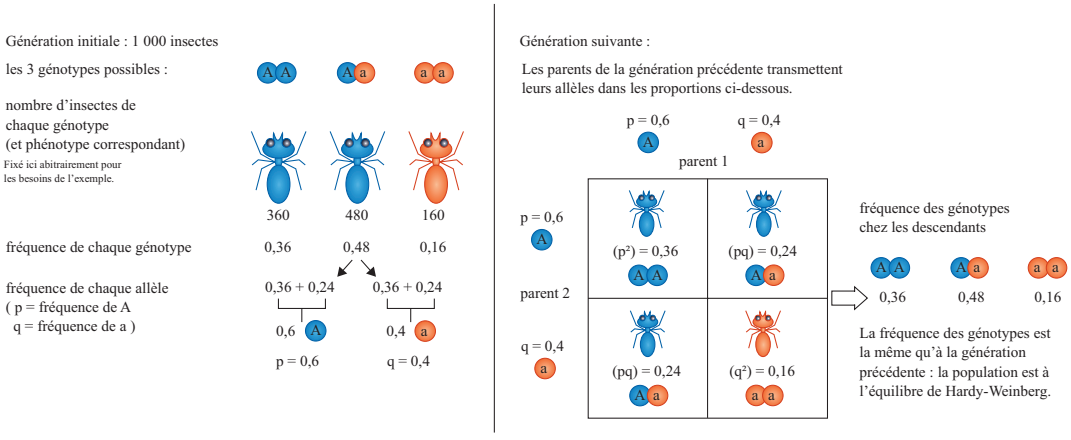


Figure 2. L'équilibre de Hardy-Weinberg.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'évolution comme grille de lecture du monde

Comme l'a dit le biologiste Theodosius Dobzhansky : « Rien en biologie n'a de sens, si ce n'est à la lumière de l'évolution. » La première partie de ce chapitre consiste en une illustration de ce propos : elle présente des structures anatomiques dont l'organisation ou même la simple existence montrent qu'elles sont des produits de l'évolution. La deuxième partie, quant à elle, présente certaines des conséquences concrètes de l'évolution relativement aux pratiques médicales et agricoles.

Les structures anatomiques témoignent de l'évolution des espèces : l'exemple de l'œil

De très nombreux animaux possèdent des yeux, structures anatomiques qui permettent de percevoir la lumière. Cependant, les yeux ont des structures différentes selon les grands groupes auxquels les animaux appartiennent. Si l'on compare l'œil de l'homme, qui est un Vertébré, et celui de la mouche, qui est un Arthropode, on observe que l'œil humain est une structure unique, là où l'œil de la mouche est un assemblage de dizaines de petits yeux assez simples appelés *ommatidies*. Ils diffèrent également dans leur fonctionnement : les yeux de la mouche ne peuvent pas percevoir la lumière rouge comme les nôtres, mais ils lui permettent de voir certains rayons ultraviolets ou la lumière polarisée, qui nous sont invisibles.

Ces différences s'expliquent par l'histoire évolutive qui a favorisé l'émergence de ces structures. En effet, le dernier ancêtre commun à la mouche et à l'être humain vivait il y a plus de 550 millions d'années. Depuis, pour chacune des espèces, des altérations de l'ADN sont apparues dans un temps long sous l'effet du hasard ; des mutations se sont produites et ont abouti à l'apparition de variations. Sous l'effet de la sélection naturelle notamment, certaines de ces variations permettant la plus grande adaptation ont été conservées.

On note cependant certaines ressemblances dues à la convergence évolutive. Par exemple, dans les deux cas, les yeux comportent des sortes de lentilles qui font converger la lumière entrant dans l'œil (ou dans les multiples yeux simples) vers une couche de cellules photosensibles. Cela vient du fait qu'en présence de contraintes semblables, la sélection naturelle aboutit à la formation de structures similaires.

Les structures sous-optimales

Les yeux sont le résultat de la sélection naturelle : posséder ces organes procure un avantage sélectif important en permettant de trouver plus facilement de quoi se nourrir ou d'échapper à des menaces par exemple. Cependant, même un organe complexe

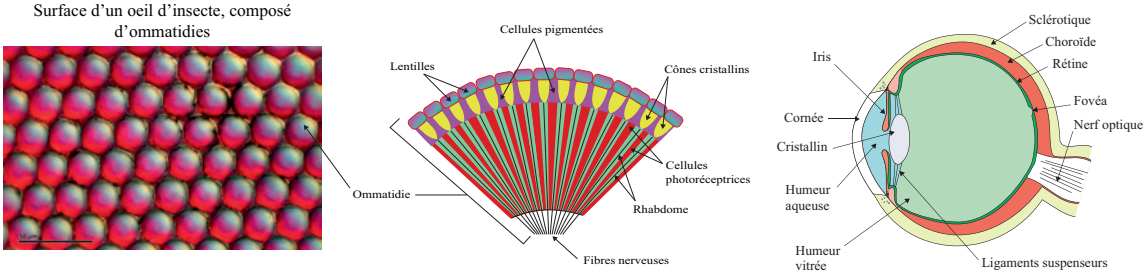


Figure 1. Structure d'un œil humain et d'un œil de mouche.

NOTIONS-CLÉS

MUTATION : Désigne une modification de la séquence de l'ADN. Le terme mutation est souvent utilisé dans un sens restreint pour désigner une modification unique d'une paire de nucléotides, ce que l'on appelle une mutation ponctuelle. Cependant, ce terme est aussi utilisé dans un sens plus large et désigne des modifications affectant toute une partie d'un chromosome, voire un chromosome entier. Les mutations sont à l'origine de la variabilité des caractères des êtres vivants.

ÉVOLUTION DES ESPÈCES : Désigne la transformation des caractères d'une espèce de génération en génération. Elle est observée chez tous les êtres vivants, y compris à une échelle de temps humaine (voir la résistance aux antibiotiques) et est attestée par de nombreuses preuves paléontologiques (les fossiles), morphologiques et anatomiques, mais également moléculaires. Attention : un individu lui-même n'évolue évidemment pas, ce sont les populations qui évoluent, de génération en génération.

SÉLECTION NATURELLE : Un des mécanismes principaux de l'évolution des espèces. Elle est la conséquence de la pression de sélection exercée par l'environnement sur les êtres vivants. Au sein d'une population d'une même espèce, les individus ne possèdent pas tous les mêmes caractères et les contraintes de l'environnement vont favoriser la survie et les capacités de reproduction de certains. Ces derniers se reproduisant mieux que les autres, leurs caractères vont se répandre de génération en génération dans la population qui va ainsi évoluer.

ADAPTATION : Processus évolutif aboutissant au développement (et au maintien) d'un caractère permettant une meilleure survie ou de meilleures capacités reproductives dans un environnement donné. L'œil est une adaptation des animaux à un environnement où existe de la lumière.

CONVERGENCE ÉVOLUTIVE : Désigne un processus qui a permis à des organismes d'origines très différentes d'acquérir, en réponse à des

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

comme l'œil humain possède des caractéristiques peu optimales.

D'une part, notre œil possède une zone appelée *tache aveugle*. Comme son nom l'indique, c'est un endroit de la rétine incapable de percevoir la lumière, car il est dépourvu de cellules photoréceptrices. La tache aveugle correspond en fait à l'endroit où le nerf optique s'insère dans l'œil. D'autre part, les neurones associés aux cellules photoréceptrices sont situés devant la rétine. Ils absorbent ainsi une partie de la lumière reçue, ce qui limite l'acuité visuelle. Le câblage nerveux de notre œil passe donc non seulement au travers mais également devant la zone photosensible, ce qui n'est clairement pas optimal.

Il faut donc supposer que l'œil humain a sans doute évolué à partir d'un œil primitif plus simple qui possédait déjà un certain nombre de caractéristiques qui ont constitué autant de « contraintes de construction » au cours de son histoire évolutive. Or, il existe un groupe d'animaux qui possèdent un œil complexe ressemblant par certains aspects au nôtre mais qui n'a ni tache aveugle, ni positionnement peu optimal des fibres nerveuses : ce sont les Céphalopodes, c'est-à-dire les poulpes et les calmars. L'œil primitif à l'origine de celui des Céphalopodes était différent du nôtre et leur œil a évolué avec des contraintes différentes, ce qui lui permet d'être plus performant que le nôtre sur certains points.

Les structures anatomiques inutiles, voire néfastes

On trouve des structures anatomiques qui ne sont pas seulement peu optimales, mais quasi inutiles voire même néfastes. Considérons par exemple l'existence de mamelons chez les hommes de notre espèce : ils n'ont aucune fonction, contrairement à ceux des femmes qui permettent la sécrétion de lait pour le nourrisson. Les gènes permettant la formation du mamelon existent chez tous les êtres humains et s'expriment chez tous pendant le développement embryonnaire. C'est encore un résultat de l'histoire évolutive propre de notre espèce, qui a hérité ces gènes d'un lointain ancêtre doté de mamelles. Il est d'ailleurs intéressant de noter que les mamelons n'existent pas chez les mâles d'autres espèces de Mammifères. Chez les chevaux ou les rats, par exemple, ce caractère inutile a disparu. Cela illustre bien le rôle du hasard dans l'évolution des espèces.

Considérons maintenant le cas des dents de sagesse. Leur éruption (c'est-à-dire la traversée de la gencive) se fait tardivement, autour de 20 ans environ. Ces quatre molaires situées les plus en arrière de la bouche sont peu ou pas utiles pour mastiquer correctement la nourriture. Chez un quart des êtres humains environ, elles ne sortent d'ailleurs jamais. Or, quand elles sortent, il est assez fréquent qu'elles restent bloquées de façon plus ou moins importante, ou qu'elles le fassent de travers, ce qui peut être à l'origine de complications médicales. Pour cette raison, et si on prévoit ces complications, elles sont assez souvent enlevées par chirurgie avant leur sortie. Ces dents inutiles, voire néfastes, sont elles aussi le reflet de notre histoire évolutive. Les mâchoires de notre espèce sont devenues plus petites au cours de notre évolution et ne sont plus assez grandes pour contenir les 32 dents héritées de nos ancêtres. Leur disparition chez nos lointains descendants est possible mais pas obligatoire : cela dépendra du chemin évolutif que prendra notre espèce à l'avenir.

L'évolution et son impact sur les pratiques médicales et agricoles

L'évolution des espèces a un impact sur de nombreuses pratiques humaines. Ainsi, en médecine, on utilise des antibiotiques, des molécules qui tuent spécifiquement certaines bactéries pathogènes. Or, on observe depuis plusieurs années l'apparition d'un nombre de plus en plus important de bactéries résistantes à ces médicaments, qui sont pourtant une de nos principales armes pour lutter contre les maladies causées par ces microbes. Cette apparition est due à l'évolution de ces bactéries suivant plusieurs étapes :

1. Une population de bactéries dans des conditions ordinaires comprend un variant résistant aux antibiotiques (il possède une mutation qui lui confère cette résistance).

2. La population est soumise à un antibiotique. La plupart des bactéries « normales » meurent.

3. La bactérie résistante est sélectionnée par ce nouveau milieu et se reproduit abondamment. Après plusieurs générations, ces bactéries résistantes deviennent : cette population de bactéries est devenue résistante à l'antibiotique. C'est un cas d'évolution par sélection naturelle en raison des pratiques humaines.

La résistance des bactéries aux antibiotiques est devenue un problème de santé majeur dans le monde. Elle montre que les capacités d'évolution rapide des micro-organismes leur permet de s'adapter à nos moyens de lutte, les rendant moins efficaces, voire inefficaces. Or, l'apparition de résistances s'observe également chez de nombreux insectes, que ce soient les moustiques vecteurs de maladies comme le paludisme, ou d'autres qui s'attaquent aux cultures comme le doryphore, ravageur de la pomme de terre.

UN ARTICLE DU *MONDE* À CONSULTER

• Un million d'espèces en danger d'extinction p. 61
(Pierre Le Hir, dans *Le Monde* daté du 07.05.2019)

ZOOM SUR…

LA VARIÉTÉ DES YEUX CHEZ LES ANIMAUX

De nombreux animaux possèdent des yeux, assez souvent plus simples que les yeux humains ou de mouche. Certains se limitent à une simple couche de cellules photoréceptrices formant une sorte de tache appelée *ocelle*. C'est le cas chez des méduses ou des mollusques comme la patelle. Dans d'autres cas, les yeux sont un peu plus complexes et sont pourvus d'une lentille convergente, comme chez l'escargot ou la coquille Saint-Jacques. Les capacités des yeux les plus simples se limitent généralement à détecter ou non la présence de lumière et son intensité, même si certains sont capables de détecter des mouvements voire de former des images. D'autres sont assez complexes mais fonctionnent sur un mode très particulier, comme dans le cas du nautile, qui a la particularité de fonctionner sur un principe similaire à celui de la chambre noire des peintres de la Renaissance. Tous ces exemples montrent que contraintes de l'environnement similaires, des structures aux caractéristiques similaires. De très nombreux exemples de convergence existent outre celui qui concerne les yeux : on peut citer celui de l'existence d'un corps allongé et de membres mobiles aplatis, les nageoires, chez de nombreux animaux nageurs. chez des animaux très différents les uns des autres, des yeux sont apparus au cours d'histoires évolutives complètement indépendantes.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'évolution humaine

L'histoire de nos origines est elle aussi une histoire évolutive. On la reconstitue à la fois grâce aux fossiles et grâce aux ADN, tant actuels que fossiles, que l'on sait de mieux en mieux étudier. Par ailleurs, ces éléments permettent de placer notre espèce dans l'arbre du vivant et de montrer sa parenté avec les espèces actuelles ou disparues.

Positionnement de notre espèce dans l'arbre du vivant

Les primates sont un groupe de Mammifères possédant des yeux orientés vers l'avant, un pouce opposable et des ongles. Les primates sont ce que l'on appelle couramment les singes. Parmi les primates, notre espèce *Homo sapiens* appartient au groupe des Hominoïdes (ou grands singes) qui sont, pour faire simple, les singes sans queue. Les gibbons (une vingtaine d'espèces), les gorilles (deux espèces), les orangs-outans (deux espèces) et les chimpanzés (deux espèces) font partie de ce même groupe. En plus de partager des caractères morpho-anatomiques communs, notre espèce partage avec les autres grands singes des similitudes génétiques très importantes. Ces différents éléments permettent de construire un arbre phylogénétique (un arbre de parenté).

Les chimpanzés, plus proches cousins de l'Homme

Les plus proches cousins de notre espèce parmi les grands singes sont les chimpanzés (deux espèces : le chimpanzé « commun » *Pan troglodytes*, et le bonobo *Pan paniscus*). L'Homme et les chimpanzés sont génétiquement très proches : si on compare leurs séquences codantes (c'est-à-dire les gènes), celles-ci sont identiques à 98,5 %. Si on

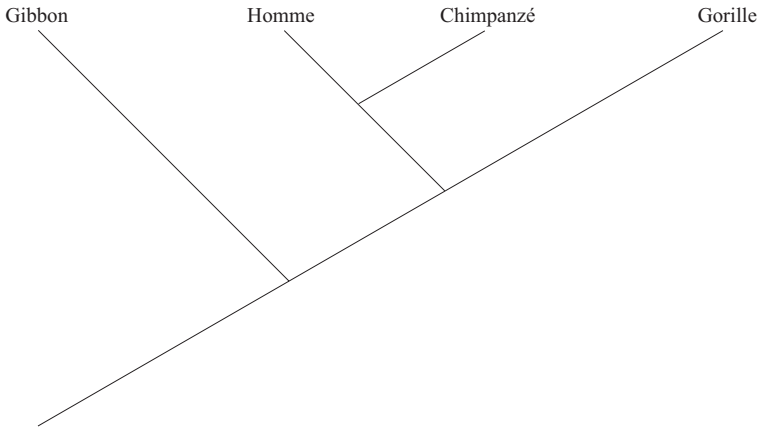


Figure 1. Arbre phylogénétique simplifié des Hominoïdes.

NOTIONS-CLÉS

ACIDE DÉSOXYRIBONUCLÉIQUE (ADN) : Molécule support de l'information génétique chez tous les êtres vivants, ce qui permet de comparer les séquences génétiques d'êtres aussi différents qu'une bactérie, une moule ou un pigeon.

NOMENCLATURE BINOMIALE : Il s'agit de la manière dont on désigne scientifiquement les espèces. Elle comprend un nom de genre, avec une majuscule, qui regroupe des espèces très apparentées, et un nom d'espèce, en minuscules, qui est propre à chaque espèce. Par convention, un nom d'espèce est mis en italique.

CARYOTYPE : Ensemble des chromosomes d'une cellule, classés par paires de chromosomes de même type, dits « homologues », et, généralement, par ordre de taille décroissant. Les deux chromosomes 1 sont les plus grands, les deux chromosomes 2 les seconds plus grands, et ainsi de suite.

ZOOM SUR…

LA PHYLOGÉNIE ET LA CONSTRUCTION D'ARBRES PHYLOGÉNÉTIQUES

La phylogénie est une manière de classer les espèces d'êtres vivants en *phylums* : un groupe comprenant un ancêtre commun et tous ses descendants. On peut représenter cette parenté sous forme d'un arbre phylogénétique.

Pour établir un arbre phylogénétique, il faut examiner les caractères que les espèces ont en commun. Cependant, une ressemblance qui traduit non une parenté évolutive mais un mode de vie semblable ou un hasard évolutif est une analogie et ne doit pas

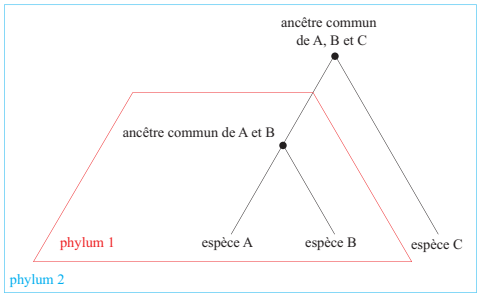


Figure 2. Le *phylum 1* regroupe les espèces parentes A et B ainsi que leur ancêtre commun. Le *phylum 2*, plus grand, regroupe les trois espèces et leur ancêtre commun. On peut ainsi emboîter les groupes comme des poupées russes.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

prend les séquences non codantes, dont les mutations sont les plus conservées au cours de l'évolution parce qu'elles ont moins de chances d'être néfastes à l'individu, la similarité est d'environ 95 %. À titre de comparaison, l'ADN de notre espèce possède 80 % de similarité avec celui de la souris, un autre mammifère, mais avec lequel il partage une parenté beaucoup plus lointaine.

Les différences correspondent à des mutations, généralement limitées à une ou quelques paires de nucléotides pour chaque gène (et donc à un ou deux acides aminés sur les protéines correspondantes), et à des remaniements chromosomiques. Ainsi, notre espèce possède 23 paires de chromosomes, alors que le chimpanzé commun en possède 24 paires. On peut voir que notre chromosome 2, un grand chromosome, correspond à deux de ceux du chimpanzé qui ont fusionné.

Les différences morphologiques entre notre espèce et les chimpanzés viennent du fait que même si les gènes sont semblables, leur chronologie d'expression varie. Par exemple, la phase de multiplication des neurones du cortex pendant le développement embryonnaire dure beaucoup plus longtemps chez l'être humain (8 semaines) que chez les chimpanzés (2 semaines) : le cerveau humain est beaucoup plus volumineux à la naissance que celui des chimpanzés.

L'Homme et les chimpanzés partagent un ancêtre commun récent (datant de 7 à 10 millions d'années). Ce chiffre est attesté par les données génétiques : on peut estimer la vitesse à laquelle les mutations s'accumulent dans le génome, notamment grâce à ce que l'on appelle l'horloge moléculaire. Il est confirmé par l'étude des fossiles.

Lire dans les fossiles l'histoire de nos origines

Les fossiles nous montrent que si l'être humain est la seule espèce du genre *Homo* actuellement présente sur Terre, il a existé autrefois d'autres espèces d'humains. Ainsi, on appelle lignée humaine le regroupement de notre espèce et de toutes les espèces fossiles plus proches de la nôtre que de celles de la lignée des chimpanzés.

Les plus anciens fossiles de la lignée humaine datent d'environ 7 millions d'années et ont été découverts en Afrique. De nombreuses espèces de la lignée sont apparues et ont disparu sur ce continent. L'espèce *Homo sapiens* est la seule du genre Homo existant encore actuellement. Cependant, plusieurs espèces d'Homo ont pu coexister par le passé. Par exemple, *Homo neanderthalensis* a vécu en Europe de –250 000 ans à –30 000 ans et a donc coexisté avec notre espèce, apparue en Afrique il y a environ 200 000 ans et arrivée en Europe il y a 70 000 ans au moins.

Une caractéristique qui distingue les fossiles de la lignée humaine de ceux d'autres grands singes est la bipédie prolongée, c'est-à-dire la capacité à se déplacer sur ses deux jambes durant de longues périodes. Cette capacité à la bipédie est montrée par la présence d'un certain nombre de caractères du squelette. On peut citer, entre autres : un bassin court et large ; des fémurs longs et, globalement, des membres inférieurs plus longs que les supérieurs ; un gros orteil du pied non opposable ; enfin, un trou occipital, qui est le lieu par lequel la colonne vertébrale est reliée au crâne, laissant passer la moelle épinière, situé sous le crâne. Chez un quadrupède ou un bipède occasionnel, ces caractères ne sont pas présents. Le genre Homo possède en outre une mâchoire parabolique, c'est-à-dire aussi large que longue, ainsi qu'une forte capacité crânienne et donc un gros cerveau, ce qui le distingue assez nettement des autres espèces de la lignée humaine.

Une autre caractéristique du genre Homo est la fabrication d'outils complexes et la création de pratiques culturelles variées (parfois documentées dans les archives fossiles). Ces pratiques sont transmises par apprentissage et non génétiquement. On notera cependant que d'autres groupes d'animaux, comme les chimpanzés ou même certains groupes d'oiseaux comme les corvidés, sont capables d'utiliser, voire de fabriquer, des outils simples et qu'ils possèdent des traits culturels, quoique plus réduits que chez l'Homme.

être prise en compte. Les caractères communs à retenir sont ceux qui sont hérités d'un même ancêtre commun et qui montrent une parenté : ce sont des *homologies*. Voyez, ci-contre, un arbre phylogénétique simple établi pour trois espèces de vertébrés : notre espèce, la roussette (une chauve-souris) et le pigeon.

Seules les homologies sont prises en compte. Cependant, ces dernières ne doivent pas toutes être prises en compte. On ne doit pas considérer, en effet, celles présentes chez un ancêtre commun à toutes les espèces étudiées (ce qu'on appelle les caractères ancestraux), car elles n'apportent rien à la classification. Celles à considérer sont celles présentes uniquement chez certaines espèces et leur ancêtre commun (on les appelle des caractères dérivés).

Les caractères avec lesquels on peut établir un arbre phylogénétique sont les suivants :

1. **Caractères morphologiques et anatomiques.** Ce sont les critères les plus évidents : nombre, nature et caractéristiques des organes.
2. **Critères embryologiques.** Ces critères sont visibles pendant les premiers stades de développement des êtres vivants et sont souvent de bons témoins de parenté.
3. **Critères moléculaires.** On compare les millions, voire les milliards de nucléotides de l'ADN. Ils permettent de faire des phylogénies entre des êtres vivants extrêmement différents mais qui possèdent tous un ADN.

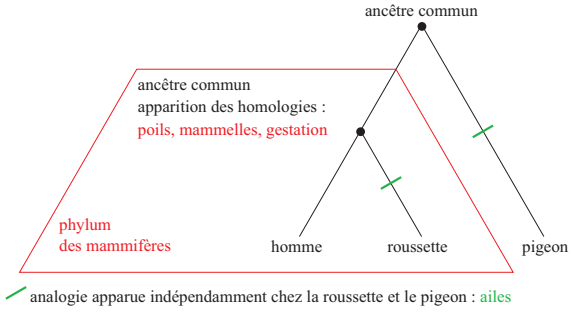


Figure 3.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les modèles démographiques

La population est en évolution constante. Afin d'ajuster les ressources, il est important de prédire la démographie, c'est-à-dire la dynamique des populations, et la manière dont vont évoluer les moyens qui leur seront nécessaires. Pour prédire l'évolution d'un système, les scientifiques utilisent des modèles mathématiques. Thomas Malthus, économiste anglais du XIX^{e} siècle, est connu pour cette approche mathématique dans le cadre de son étude de l'évolution de la population.

Thomas Malthus publie son *Essai sur le principe de population* en 1798. Il y pointe le déséquilibre entre la croissance de la population et celle des subsistances. Selon Malthus, la population augmente toujours plus vite que la production des ressources nécessaires. Pour résoudre ce problème, il propose de réduire la croissance démographique ou d'augmenter la quantité de vivres, afin de faire correspondre la population à la quantité de denrées alimentaires. Sa théorie a déclenché de nombreuses polémiques. Si les prédictions du modèle sont correctes sur un temps court, elles sont irréalistes sur un temps plus long, notamment en raison de l'insuffisance des ressources disponibles.

D'autres modèles voient ensuite le jour, mais tous ont des limites. Actuellement, des modèles plus élaborés prévoient que nous serons environ 10 milliards d'êtres humains en 2050.

Variation absolue, variation relative

Soit une population dont l'effectif évolue par palier, de la valeur u_n à la période n à l'effectif u_{n+1} à la période $n+1$ On appelle :

- variation absolue, la différence $u_{n+1} - u_n$;
- variation relative ou taux d'accroissement (ou de variation) entre les états u_n et u_{n+1}, le rapport $\frac{u_{n+1} - u_n}{u_n}$.

Les suites

Par définition, une suite est une fonction u définie sur l'ensemble $\mathbb{N}$ des entiers naturels. À chaque entier naturel n, on associe son image $u(n)$ que l'on note aussi u_n. L'ensemble des nombres u_n forme une suite.

On dit que u_n est le terme de rang (ou d'indice) n de la suite (u).

La suite arithmétique et le modèle linéaire

Un modèle mathématique simple est le modèle linéaire. Lorsque, pour tout entier naturel n, la variation absolue entre deux états consécutifs est constante, c'est-à-dire $u_{n+1} - u_n$ = cste, on dit que la suite est arithmétique. La constante obtenue est appelée raison de la suite arithmétique et sera notée r. On peut ainsi écrire :

$$u_{n+1} - u_n = r$$

Si u_o est le premier terme de la suite arithmétique, alors :

$$u_n = u_o + n \times r$$

Les points de coordonnées $(n\ ;\ u_n)$ sont situés sur une droite. Dans la réalité, pour une population dont la variation absolue est presque constante d'un palier à l'autre, on peut ajuster le nuage de points qui la représente par une droite. Le modèle linéaire est inadapté pour représenter l'évolution d'une grandeur dont la variation absolue change fortement d'un palier à l'autre. Il ne permet pas non plus de représenter l'évolution d'une population humaine ou animale. En revanche, l'évolution d'une ressource est souvent bien modélisée par le modèle linéaire.

La suite géométrique et le modèle exponentiel

On considère que tous les termes de la suite sont non nuls. Lorsque pour tout entier naturel n, le rapport entre deux états consécutifs est constant, c'est-à-dire $\frac{u_{n+1}}{u_n}$ = cste, on dit que la suite est géométrique. La constante obtenue est appelée raison de la suite géométrique et sera notée q. On peut ainsi écrire :

$$\frac{u_{n+1}}{u_n} = q$$

Si u_o est le premier terme de la suite géométrique, alors :

$$u_n = u_o \times q^n$$

Une grandeur discrète u varie de manière exponentielle en fonction du palier entier n si sa variation absolue $u_{n+1} - u_n$ est proportionnelle à sa valeur courante u_n.

Dans ce cas, sa variation relative (ou taux de variation) est constante, et la suite de terme général u_n est géométrique, c'est-à-dire que $u_{n+1} - u_n = k \times u_n$, où k est une constante réelle.

Dans la réalité, pour une population dont le taux de variation est presque constant d'un palier à l'autre, on peut ajuster le nuage de points par un modèle exponentiel.

Le modèle démographique : application du modèle de Malthus

Chaque modèle démographique doit être mis en œuvre à partir de trois étapes. Il faut :

- identifier le type de modèle le mieux adapté pour traduire la réalité (linéaire, exponentiel…) ;
- déterminer les paramètres du modèle (le premier terme, la raison…) ;
- comparer le modèle et les observations, et donner éventuellement un domaine de validité du modèle. Parfois, le modèle n'est concordant avec les observations que sur un petit domaine, il faut alors le préciser.

Le modèle démographique de Malthus est un modèle exponentiel d'évolution de l'effectif de la population. Il prévoit que l'effectif de la population décroît vers 0 si le taux de mortalité est supérieur au taux de natalité, et croît vers l'infini si le taux de natalité est supérieur au taux de mortalité.

« Selon la table d'Euler, si l'on se base sur une mortalité de 1 sur 36 et si naissances et morts sont dans le rapport de 3 à 1, le chiffre de la population doublera en 12 années et 4/5. Ce n'est point là une simple supposition : c'est une réalité qui s'est produite plusieurs fois, et à de courts intervalles. Cependant, pour ne pas être taxés d'exagération, nous nous baserons sur l'accroissement le moins rapide, qui est garanti par la concordance de tous les témoignages. Nous pouvons être certains que lorsque la population n'est arrêtée par aucun obstacle, elle double tous les vingt-cinq ans, et croît ainsi de période en

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

période selon une progression géométrique. Il est moins facile de mesurer l'accroissement des produits de la Terre. » (Extrait de Malthus, *Essais sur le principe de population*, 1798.)

La première année, en supposant pour simplifier que la population soit de 360 personnes, le nombre de morts est égal à :

$$\frac{1}{36} \times 360 = 10 \text{ morts}$$

Le nombre de naissance est donc :

$$10 \times 3 = 30 \text{ naissances}$$

À la fin de la première année, la population sera donc de :

$$360 - 10 + 30 = 380 \text{ habitants.}$$

Avec le même raisonnement que précédemment, on obtient le tableau de résultats suivants (en arrondissant les résultats à l'unité). (Attention : conserver la valeur exacte du nombre de morts pour effectuer les calculs du nombre de naissances et de la population en fin d'année) :

Année	Population en début d'année	Nombre de morts	Nombre de naissances	Population en fin d'année
1	360	10	30	380
2	380	11	32	401
3	401	11	33	423
4	423	12	35	447
5	447	12	37	472
6	472	13	39	498
7	498	14	42	526
8	526	15	44	555
9	555	15	46	586
10	586	16	49	619
11	619	17	52	653
12	653	18	54	689
13	689	19	57	727

Le doublement de la population se fait donc entre la 12e et la 13e année. La 12e année, il y a 689 habitants. Comme il y a 365 jours par an (les années non bissextiles) et que 365 a pour diviseur 5, faisons le même raisonnement que précédemment, mais par tranche de 1/5.

Pour le premier 1/5 de l'année, le nombre de morts est :

$$\frac{\frac{1}{36} \times 689}{5} = 4 \text{ morts}$$

Le nombre de naissances est toujours trois fois supérieur au nombre de morts. On obtient ainsi le tableau suivant (en arrondissant les résultats à l'unité) :

Tranche	Population en début de mois	Nombre de morts	Nombre de naissances	Population en fin de mois
1re tranche	689	4	11	697
2e tranche	697	4	12	705
3e tranche	705	4	12	713
4e tranche	713	4	12	721

Au bout de la 4e tranche, c'est-à-dire au bout de 12 ans et 4/5, on a un doublement de la population. Le calcul du rapport u_{n+1}/u_n donne :

Année	Population	u_{n+1}/u_n
1	360	
2	380	1,06
3	401	1,06
4	423	1,06
5	447	1,06
6	472	1,06
7	498	1,06
8	526	1,06
9	555	1,06
10	586	1,06
11	619	1,06
12	653	1,06
13	689	1,06

Les rapports sont égaux. La modélisation peut être effectuée par une suite géométrique de premier terme 360 et de raison 1,06.

DES ARTICLES DU *MONDE* À CONSULTER

- La tentation du retour au malthusianisme p. 69
(Frédéric Lemaître, dans *Le Monde* daté du 26.11.2009)
- Thomas Maltus ou l'obsession de la rareté p. 70
(Anne Chemin, dans *Le Monde* daté du 09.12.2017)

ZOOM SUR…

LES LIMITES DU MODÈLE DE MALTHUS

En 1798, l'économiste anglais Thomas Malthus publie *An essay on the principle of population*, dans lequel il émet l'hypothèse que l'accroissement de la population, beaucoup plus rapide que celui des ressources alimentaires, conduira son pays à la famine. Il écrit :

« Nous pouvons donc tenir pour certain que, lorsque la population n'est arrêtée par aucun obstacle, elle va doublant tous les vingt-cinq ans, et croît de période en période selon une progression géométrique. […] Nous sommes donc en état de prononcer, en partant de l'état actuel de la terre habitée, que les moyens de subsistance, dans les circonstances les plus favorables de l'industrie, ne peuvent jamais augmenter plus rapidement que selon une progression arithmétique. »

En 1800, la population de l'Angleterre était estimée à 8 millions d'habitants, et l'agriculture anglaise pouvait nourrir 10 millions de personnes. Le modèle de Malthus admet que la population augmente de 2,8 % chaque année et que les progrès de l'agriculture permettent de nourrir 400 000 personnes de plus chaque année. L'évolution de la population est modélisée par la suite géométrique (u_n), où u_n est le nombre d'habitants (en millions) l'année $1800 + n$. Le premier terme de la suite est $u_0 = 8$, et la raison est $q = 1{,}028$. L'évolution de l'agriculture est modélisée par une suite arithmétique (v_n), où v_n correspond au nombre d'habitants qui peuvent être nourris (en millions) l'année $1800 + n$. Le premier terme de la suite est $v_0 = 10$, et la raison est $r = 0{,}4$. D'où :

$$u_n = 8 \times 1{,}028^n$$
$$v_n = 10 + 0{,}4 \times n$$

MOTS-CLÉS

SUITE NUMÉRIQUE : série de nombres réels.

SUITE ARITHMÉTIQUE : suite pour laquelle chaque terme permet de calculer le suivant en lui ajoutant une constante appelée *raison* de la suite.

SUITE GÉOMÉTRIQUE : suite pour laquelle chaque terme permet de calculer le suivant en le multipliant par une constante appelée *raison* de la suite.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'intelligence artificielle

Dès 1950, Alan Turing publie un article intitulé *Computing Machinery and Intelligence* dans lequel il se demande si les machines peuvent imiter l'homme. Mais la véritable recherche en intelligence artificielle (IA) n'est apparue qu'en 1956, lors d'une université d'été sur le thème des machines pensantes. Aujourd'hui, l'intelligence artificielle permet l'accomplissement de tâches et la résolution de problèmes jusqu'ici réservés aux humains, comme reconnaître et localiser des objets sur une image, conduire une voiture, jouer aux échecs, etc. Mais l'IA pose également certains problèmes éthiques.

Histoire, enjeux et débats

Dès 1725, B. Bouchon invente un système de ruban perforé pour automatiser un métier à tisser : les pièces du métier réagissent différemment selon qu'il y a un trou ou non sur le ruban. C'est l'un des premiers systèmes binaires ayant jamais existé. En 1728, son assistant remplace les rubans par des cartes qui resteront utilisées jusqu'aux années 1960. Ainsi, jusqu'au début du XX^{e} siècle, les machines traitant l'information sont limitées à une ou quelques tâches prédéterminées. Turing a été le premier à proposer le concept de machine universelle en 1936, matérialisée en 1943 par le premier ordinateur : ENIAC.

Alan Turing démontre en 1936 que certains problèmes mathématiques ne peuvent être résolus. Pour cela, il postule qu'il existe une machine programmable capable d'effectuer toutes sortes de calculs. Cette machine portant le nom de « machine de Turing » est la première affirmation qu'un appareil, à condition d'être programmé, peut faire toutes sortes de calculs et donc de tâches. Elle montre aussi qu'elle peut, en simulant l'activité mentale, devenir aussi « intelligente » que l'homme. Turing propose aussi l'idée d'universalité, puisque sa machine pourrait accomplir les tâches de n'importe quelle autre machine. Il est aussi connu pour avoir réussi à décrypter le code des machines Enigma, utilisées par les nazis au cours de la Seconde Guerre mondiale.

Dans les années 1950, les progrès de l'électronique ont permis de développer la première génération d'ordinateurs constitués de mémoire vive et d'un processeur. Puis, l'essor de la miniaturisation des composants a amené des processeurs de plus en plus puissants, qui permettent de produire des ordinateurs plus puissants, lesquels peuvent aider à concevoir des processeurs plus puissants, et ainsi de suite.

Aujourd'hui, les ordinateurs utilisent des fichiers de différentes natures : image, vidéo, texte, etc. Mais, comme cela a déjà été vu en SNT en Seconde, un ordinateur fonctionne uniquement avec le langage binaire (constitué de 0 et 1, chacun d'eux représentant 1 bit). Ainsi, chaque caractère est codé sur un octet (8 bits).

Un fichier .txt (écrit avec le bloc-note, par exemple) occupe autant d'octets qu'il contient de caractères. Mais un fichier .doc ou .docx contient, en plus, un en-tête descriptif avec la date, l'auteur, le logiciel utilisé, etc., et occupera donc une taille bien plus grande que le même texte écrit avec un bloc-note.

De même, un fichier image comportera aussi un en-tête dans lequel on pourra trouver la résolution, la taille, mais aussi, selon le format, l'appareil photographique utilisé et même la position GPS de l'image. Chaque pixel de l'image est codé sur un ou plusieurs octets selon la qualité. La taille des fichiers image peut donc atteindre plusieurs Go (Giga-octets) selon la définition (nombre de pixels de l'image). Un fichier vidéo constitué d'un nombre très important d'images peut atteindre plusieurs centaines de Go.

Les fichiers son ont également une taille variant selon leur qualité (la compression utilisée), comprise généralement entre 1 et 10 Mo (Méga-octets).

Il existe aussi des fichiers écrits dans des langages spécifiques (Python, Scratch, C, Sharp, etc.). Ces programmes permettent de faire le lien entre le programmeur et les instructions comprises par le(s) processeur(s). Certains langages de plus bas niveau, comme le langage assembleur, permettent au programmeur d'indiquer directement les instructions à chaque partie (mémoire, registre) du processeur.

ZOOM SUR…

L'ÉTHIQUE ET L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les intelligences artificielles (IA) se font de plus en plus présentes dans les voitures autonomes, les algorithmes de recommandation, les drones, etc. En effet, en s'appuyant sur de très grandes quantités de données, les algorithmes sont capables d'effectuer un nombre important de tâches : reconnaître et analyser des voix ou des images, accepter ou refuser des offres bancaires de prêt, conduire un véhicule, etc. Les questions éthiques posées par l'intelligence artificielle sont nombreuses et continueront à croître avec le développement de nouveaux algorithmes : peut-elle être utilisée à des fins critiquables comme la surveillance civile, le marketing ciblé ? En cas de défaillance de ma voiture autonome, celle-ci devra-t-elle choisir entre tuer deux enfants ou bien trois personnes âgées, si ceux-ci venaient à croiser simultanément sa trajectoire ? L'IA doit-elle uniformiser ou non les contenus mis en avant sur les réseaux sociaux ?

L'intelligence artificielle qui s'appuie sur les réseaux de neurones artificiels (*deep learning*) est particulièrement critiquée : on lui reproche d'être opaque, de ne pas laisser voir le raisonnement qui permet aux algorithmes d'arriver au résultat final. Il est alors difficile d'avoir confiance en des décisions qui ne sont pas mesurables.

Des limitations existent déjà : au niveau européen, le règlement général sur la protection des données (RGPD) tente de restreindre la collecte de données personnelles par des entités

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Qu'est-ce que l'intelligence artificielle (IA) ?

La signification même d'*intelligence artificielle* est variable selon l'époque et les interlocuteurs. Yann Le Cun (prix Turing 2018) en énonce une définition : « l'IA est un ensemble de techniques permettant à des machines d'accomplir des tâches et de résoudre des problèmes normalement réservés aux humains et à certains animaux ». Le terme *intelligence artificielle* recouvre donc un ensemble de théories et de techniques qui traitent de problèmes dont la résolution fait appel à l'intelligence humaine.

La recherche en intelligence artificielle a permis de réaliser des progrès fulgurants en matière de robotique, de véhicules autonomes, de traitement de la parole, en compréhension du langage naturel. Quelques exemples remarquables : la description automatique du contenu d'une image par Google, les systèmes de reconnaissance faciale, le niveau de compétence des robots au Robotic Challenge de Darpa, la compréhension de la parole avec Siri d'Apple, Cortana de Microsoft ou OK Google.

Parmi ces nombreuses réalisations, beaucoup sont le fruit des progrès accomplis dans le domaine de l'apprentissage machine (apprentissage automatique).

Qu'est-ce que l'apprentissage machine (*machine learning*) ?

L'arrivée des centres de données (*data center*), lieux où sont stockés de multiples données, a permis une explosion de l'apprentissage machine. Il correspond à une branche commune de l'intelligence artificielle et des statistiques. Il consiste en des programmes capables de modifier leur comportement lorsqu'ils sont confrontés à des données.

En fournissant à une machine un très grand nombre de données, on permet à celle-ci de s'entraîner (phase d'apprentissage ou d'entraînement) pour définir son comportement ultérieur (phase d'inférence). La machine exploite des méthodes mathématiques qui, à partir du repérage de tendances (corrélations, similarités) sur de très grandes quantités de données (*Big data*), permettent de faire des prédictions ou de prendre des décisions.

Il y a trois catégories d'apprentissage machine :

- l'apprentissage avec supervision : les opérateurs donnent à l'ordinateur des exemples d'entrées et les sorties souhaitées, et l'ordinateur recherche les solutions par modélisation prédictive. Il existe de nombreux algorithmes qui entrent dans cette catégorie : méthode du *k* plus proche voisin, régression linéaire, arbres décisionnels, etc. Ceux-ci sont par exemple utilisés pour effectuer les prévisions météorologiques. Le *deep learning* (apprentissage profond) est l'une des méthodes d'apprentissage supervisé : les sorties de chaque module servent d'entrée aux suivants. On parle alors de « réseaux de neurones artificiels ».
- l'apprentissage sans supervision : l'algorithme est laissé à lui-même, alors qu'on lui fournit un grand nombre de données non étiquetées. La machine y repère des corrélations pour construire elle-même son algorithme de classification. L'algorithme de reconnaissance faciale de Facebook qui identifie les personnes sur les photos est un exemple d'apprentissage machine sans supervision.
- l'apprentissage par renforcement : un programme informatique interagit avec un environnement dynamique dans lequel il doit atteindre un but. Le programme-apprenti reçoit des récompenses ou des punitions pendant qu'il navigue dans l'espace du problème et qu'il apprend à identifier le comportement le plus efficace. Le programmeur fixe les règles qui déterminent si l'intelligence artificielle sera punie ou récompensée : à chaque décision prise par le système, les règles préétablies permettent de modifier les décisions suivantes selon qu'il s'agit d'une bonne décision (récompense) ou d'une mauvaise décision (punition). Le système évolue ainsi en maximisant les performances, donc les bonnes décisions. C'est ce type d'apprentissage qui a permis au programme Alpha Zero de Google de battre le champion de jeu de Go, Lee Sedol, en 2016.

La courbe d'ajustement

La méthode de la courbe d'ajustement repose sur un traitement statistique des données : lors de la phase d'apprentissage, on fournit un nuage de points à la machine, et celle-ci sort une courbe de type droite, parabole ou exponentielle.

Le choix du type de courbe est déterminé avec les données, lors de la phase d'entraînement. La connaissance de cette courbe permet alors de prédire les valeurs : c'est la phase d'inférence.

Exemple : Espérance de vie à la naissance en France

Année de naissance	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Espérance de vie (en années)	74,1	75,3	76,6	77,8	79,1	80,2	81,7	82,7

La forme allongée du nuage de points permet un ajustement par une droite : on parle alors de régression linéaire. La détermination de cette droite constitue la phase d'apprentissage, et peut être réalisée par une méthode mathématique (la méthode des moindres carrés). L'algorithme d'apprentissage consiste à déterminer la droite qui passe au plus près des valeurs des points mesurés, minimisant ainsi l'erreur d'approximation : c'est l'optimisation.

Avec l'équation de la droite, on peut ensuite prévoir l'espérance de vie pour d'autres années. Par exemple, pour l'année 2040, on peut estimer une espérance de vie de $y = 0{,}2385 \times 2040 - 397{,}83 = 88{,}7$ ans.

MOTS-CLÉS

juridiques, pourtant nécessaires lors de l'entraînement de programmes d'IA. Un comité chargé d'« aborder de manière globale les enjeux éthiques du numérique et de l'intelligence artificielle » a vu le jour fin 2019. En France, c'est la CNIL qui s'occupe de la protection des données, mais l'une des difficultés est que, en grande majorité, les sites sont hébergés hors de France…

DEEP LEARNING (OU APPRENTISSAGE PROFOND) : programme qui permet de faire apprendre à un ordinateur une tâche précise en observant un grand nombre d'exemples.

MACHINE LEARNING (OU APPRENTISSAGE MACHINE, APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE) : technologie de l'intelligence artificielle permettant aux ordinateurs d'apprendre par eux-mêmes. Elle est basée sur leur analyse d'un grand nombre de données sur lesquels ils s'entraînent.

RÉSEAU NEURONAL : graphe d'objets élémentaires, correspondant à un réseau qui s'inspire du fonctionnement du cerveau humain pour apprendre. Ce réseau est séparé en trois tiers : chacun d'eux reçoit les sorties d'informations du tiers précédent, ce qui simule le comportement des neurones qui reçoivent des signaux en provenance d'autres neurones. Le dernier tiers produit les résultats du système.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Diversité génétique chez le diable de Tasmanie et vulnérabilité aux maladies

Le diable de Tasmanie est un mammifère marsupial dont le nom d'espèce est *Sarcophilus harrisii*. Il ne vit plus à l'heure actuelle que sur la grande île de Tasmanie, au sud de l'Australie.

Le diable de Tasmanie est une espèce menacée car bien qu'elle soit protégée depuis 1941, elle ne vit qu'en Tasmanie et a été décimée par une maladie appelée DFTD (Devil Facial Tumour Disease, ou tumeur faciale transmissible) : plus de 80 % des membres de l'espèce sont morts en 20 ans. La DFTD est un des très rares exemples de cancer transmissible. En effet, les diables, surtout les mâles, se battent assez férocement et se transmettent par morsure des cellules cancéreuses. Les individus infectés meurent ensuite quasiment tous en environ un an à un an et demi.

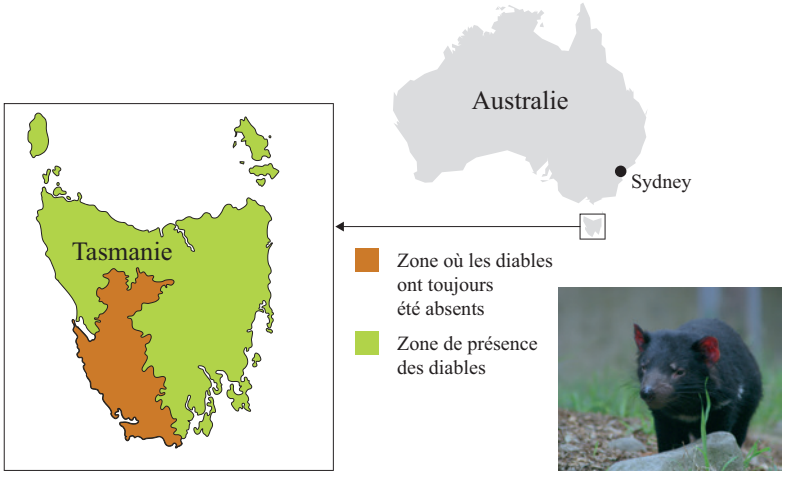
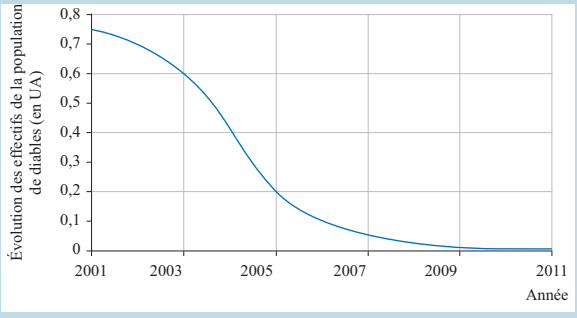


Figure 1. Le diable de Tasmanie, aspect et carte de répartition.

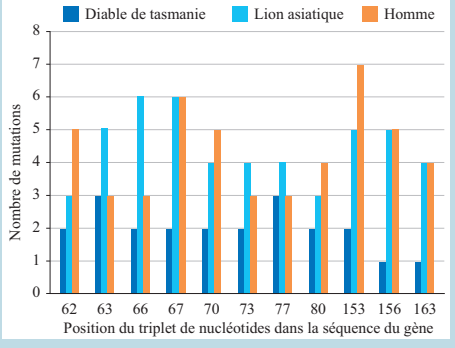
À partir des connaissances que vous avez acquises et des informations issues des documents, rédigez un paragraphe argumenté pour expliquer comment on a pu suivre l'évolution des populations de diables de Tasmanie et comment les données sur la diversité génétique au sein de l'espèce expliquent en partie son très fort déclin.

Document 1 – Variation des effectifs du diable de Tasmanie, entre 2001 et 2011.



Document 2 – Diversité génétique de la séquence PBR d'un gène impliqué dans la défense immunitaire de l'organisme chez l'espèce humaine, le lion asiatique et le diable de Tasmanie.

La séquence PBR étudiée possède une grande variabilité chez la plupart des espèces. Le document présente le nombre de mutations existant pour différentes zones du gène successives (les triplets de nucléotides). Un grand nombre de mutations pour une zone du gène correspond à une variabilité génétique élevée. La capacité des globules blancs à reconnaître des cellules cancéreuses est directement dépendante de cette variabilité.



Analyse du sujet

Les sujets d'enseignement scientifique sont souvent décomposés en plusieurs petites questions. Cependant, un sujet « de synthèse » peut également être donné, comme c'est le cas ici.

Pour traiter ce type de sujet, il faut d'abord rappeler la (ou les) problématique à laquelle on va répondre, puis extraire des documents les informations pertinentes tout en faisant appel aux connaissances qu'on estime nécessaires et enfin répondre à la problématique.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les résistances aux insecticides des insectes

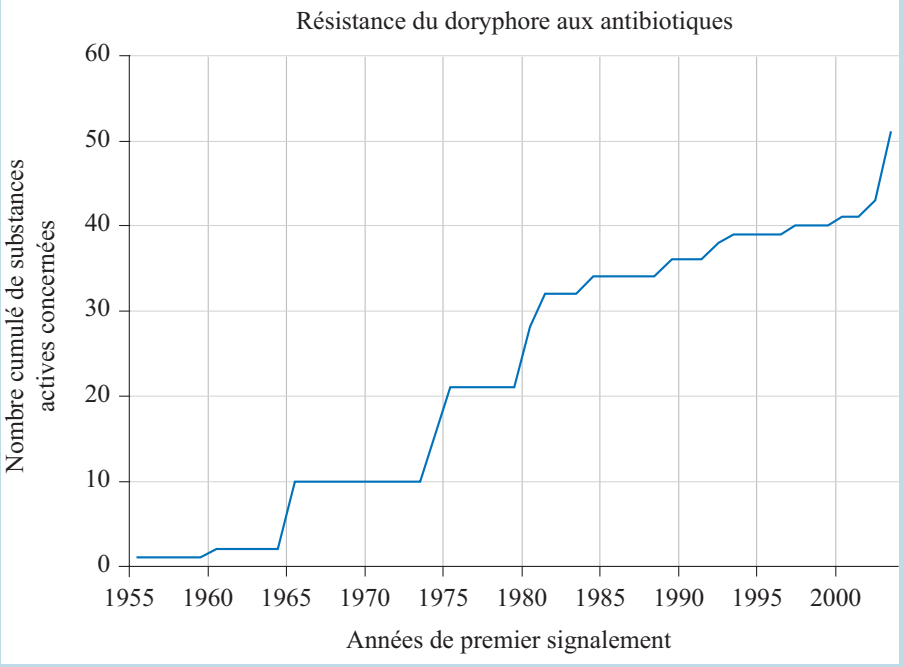
L'utilisation des insecticides a énormément augmenté après la Seconde Guerre mondiale et ces produits restent très utilisés aujourd'hui. Ils ont permis, en association avec d'autres facteurs, d'augmenter considérablement les rendements agricoles. On peut citer l'exemple de la pomme de terre, chez laquelle une infestation sévère par le doryphore – un coléoptère dont la larve dévore les feuilles de la plante – peut aboutir à une baisse de la production pouvant atteindre les deux tiers de la récolte attendue.

Ces produits ont également permis de lutter indirectement contre certaines maladies dont les vecteurs sont des insectes. C'est par exemple le cas du paludisme, causé par un microbe parasite du genre Plasmodium et propagé par la piqûre de certains moustiques.

Cependant, on a constaté très tôt l'apparition de résistances des insectes aux premiers insecticides produits et cela a amené les industriels à produire de nouvelles familles d'insecticides : par exemple, les organochlorés comme le fameux DDT, très utilisés des années 1940 à 1970, ne le sont aujourd'hui presque plus et sont remplacés par d'autres familles comme les organophosphorés.

Document 1 – La multi-résistance du doryphore aux insecticides

Certains insectes sont multi-résistants aux insecticides : ils résistent à plusieurs insecticides différents à la fois.



Document 2 – Quelques aspects des mécanismes de résistance aux insecticides chez les moustiques

Dans les années 1970, on a voulu réduire les populations de moustiques dans le sud de la France par épandages d'insecticides de la famille des organophosphorés. En quelques années, on a observé l'apparition de résistances dans les populations de moustiques. Certains moustiques sont ainsi capables de survivre à des doses d'insecticides plus de 10 fois plus importantes que celles nécessaires pour tuer 98 % des larves d'un moustique non résistant.

Les insecticides organophosphorés agissent en perturbant la transmission de l'influx nerveux aux muscles chez les insectes. En effet, ils empêchent la dégradation du neurotransmetteur acétylcholine par une enzyme, ce qui entraîne la paralysie et donc la mort des insectes. Chez certains moustiques résistants, une mutation génétique permet la production d'une enzyme appelé estérase qui dégrade les molécules d'insecticide et le rend alors beaucoup moins efficace.

On observe cependant que les insectes résistants sont de petite taille, survivent et se reproduisent moins bien que les insectes non résistants dans un milieu sans insecticide. Cela est dû au fait que produire en grande quantité des estérases a un coût énergétique important et détourne les cellules de la production d'autres protéines importantes pour la survie et la reproduction. C'est ce que l'on appelle « le coût de la résistance ».

Questions

À partir de vos connaissances et des informations apportées par les documents, répondez aux questions suivantes :

1. Expliquez l'évolution de la résistance aux insecticides du doryphore telle qu'elle est présentée dans le document 1.
2. D'après vos connaissances, quel est le mécanisme évolutif à l'œuvre expliquant la multi-résistance du doryphore ?
3. Présentez un mécanisme de résistance aux insecticides.
4. Qu'est-ce que le « coût de la résistance » et en quoi la connaissance de ce phénomène permet-elle d'envisager un moyen de lutter contre l'apparition des résistances ?

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Construction d'un arbre phylogénétique

Document

On cherche à présenter les relations de parenté entre 4 espèces : le thon jaune, le lion, l'aigle royal et la souris de Sumatra, sous la forme d'un arbre phylogénétique.

On dispose de ce tableau de caractères :

	Thon jaune	Lion	Aigle royal	Souris de Sumatra
Amnios*	–	+	+	+
Squelette osseux	+	+	+	+
Régime alimentaire carnivore	+	+	+	–
Ailes	–	–	+	–
Production de lait	–	+	–	+
Dents	+	+	–	+
Phanères**	–	+	+	+

* L'amnios est une enveloppe qui entoure l'embryon pendant son développement.
** Les phanères sont des structures majoritairement faites d'une protéine résistante, la kératine, et produites par la peau, comme les poils, griffes ou plumes.
+ indique la présence du caractère
– indique son absence

Questions

À partir de vos connaissances et des informations apportées par le document, répondez aux questions suivantes :

1. Rappelez ce qu'est une analogie et ce qu'est une homologie puis indiquez quel(s) critère(s) ci-dessus ne doivent pas être pris en compte pour mettre au point un arbre phylogénétique.

2. Rappelez ensuite ce qu'est un caractère ancestral et ce qu'est un caractère dérivé et indiquez quel(s) critère(s) ci-dessus ne doivent également pas être pris en compte.

3. Proposez ensuite un arbre phylogénétique des espèces présentées en plaçant sur l'arbre les caractères qui vous paraissent nécessaires.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les modèles démographiques

Document

Les tableaux ci-dessous donnent l'effectif de la population du Japon (exprimée en millions), par paliers de 5 ans, de 1900 à 2010 :

n nombre d'années écoulées depuis 1900	0	5	10	15	20	25	30	35
Effectif de la population année 1900 + *n*	44,8	47	50,7	53,4	55,9	59,7	64,5	69,3

n nombre d'années écoulées depuis 1900	40	45	50	55	60	65	70	75
Effectif de la population année 1900 + *n*	73,1	72,4	83,6	87,9	92,5	98,8	104,7	111,9

n nombre d'années écoulées depuis 1900	80	85	90	95	100	105	110
Effectif de la population année 1900 + *n*	116,8	120,8	123,5	125,6	126,9	127,4	128,6

Questions

1. Représenter le nuage de points associé à ce tableau à l'aide de la calculatrice.
2. Comment peut-on expliquer la baisse de la population de 1940 à 1945 ?
3. Soit N le nombre d'années écoulées depuis 1950. On décide de modéliser la population entre 1950 et 1980 par les 31 premiers termes d'une suite géométrique (v_N) vérifiant $v_0 = 83{,}6$ et $v_{30} = 116{,}8$.
a. Exprimer v_N en fonction de N.
b. Calculer la raison de cette suite. Arrondir aux dix-millièmes (4e rang après la virgule).
c. Utiliser ce modèle pour estimer la population du Japon en 1973.
d. La modélisation par la suite géométrique commence en 1950. On a donc $n = 50 + N$. On note w_n la population du Japon l'année 1900 + n Exprimer w_n en fonction de n.
e. Tracer la représentation graphique de cette suite (w_n) sur le même graphique que le nuage de points.
4. Ce modèle semble-t-il pertinent pour estimer la population du Japon de 1980 à 2010 ?
5. En déduire le domaine de validité du modèle.
6. Selon Pierre-François Verhulst, mathématicien belge, une population donnée a tendance à se stabiliser. Autrement dit, elle a tendance à atteindre un seuil maximal qui ne peut être dépassé du fait des ressources limitées qui empêchent la population de croître davantage. Expliquer en quoi la population actuelle du Japon donne raison à Pierre-François Verhulst.
7. Justifier que l'on peut parler d'une « croissance qui décélère » de 1980 à 2010.

LA BONNE MÉTHODE

1. Un nuage de points se représente dans le mode statistique de la calculatrice.
2. Il s'agit d'une question historique.
3. **a.** Donner la relation générale des suites géométriques en ayant pris le soin de remplacer les valeurs littérales par les données numériques connues.
b. Il faut utiliser la valeur de v_{30} et faire l'analogie pour résoudre l'équation avec ce qui a été vu en première sur la gamme tempérée.
c. Utiliser les deux questions précédentes pour faire l'application numérique.
d. Simple changement de variable.
e. Sur la calculatrice, superposer le nuage de points avec l'expression obtenue à la question précédente.
4. Vérifier la validité du modèle entre $n = 80$ et $n = 110$.
5. Vérifier la validité du modèle sur d'autres périodes et en déduire l'intervalle sur lequel cette modélisation est correcte.
6. Une valeur seuil est une valeur vers laquelle va aller la tendance. Déterminer cette valeur seuil et conclure.
7. Compte tenu des réponses aux questions précédentes, conclure sur la croissance de la population entre $n = 80$ et $n = 110$

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'intelligence artificielle

L'inférence bayésienne, qui fait le lien entre statistiques et intelligence artificielle, est souvent utilisée dans le cadre de diagnostics médicaux. En effet, elle permet d'établir la probabilité d'être porteur d'une maladie sachant qu'un certain nombre d'anomalies ont été détectées.

Parmi les femmes de 40 ans ayant effectué une mammographie, 1 % ont un cancer du sein. À la suite de mammographies sur échantillon, on a établi que :

- pour 82 % des femmes ayant un cancer du sein, la mammographie détecte une anomalie ;
- pour 9 % des femmes n'ayant pas de cancer du sein, la mammographie détecte une anomalie.

Lors des tests, plusieurs cas peuvent se présenter :

- les vrais positifs sont les sujets qui sont malades et à qui on détecte une anomalie ;
- les faux positifs sont les sujets qui ne sont pas malades et à qui on détecte une anomalie ;
- les vrais négatifs sont les sujets qui ne sont pas malades et à qui on ne détecte pas d'anomalie ;
- les faux négatifs sont les sujets qui sont malades et à qui on ne détecte pas d'anomalie.

La sensibilité d'un test est la probabilité que l'on détecte une anomalie à une personne malade.

La spécificité du test est la probabilité que l'on ne détecte aucune anomalie à une personne non malade.

On suppose que 10 000 femmes de 40 ans ont effectué une mammographie.

1. Préciser les caractéristiques (sensibilité, spécificité) d'une mammographie.
2. **a.** Calculer le nombre de femmes atteintes d'un cancer du sein dans cet échantillon.
b. Calculer le nombre de femmes à qui l'on détecte une anomalie, sachant qu'elles sont atteintes d'un cancer du sein.
c. Calculer le nombre de femmes à qui l'on détecte une anomalie, sachant qu'elles n'ont pas de cancer du sein.
d. Compléter le tableau ci-dessous :

	Anomalie détectée	Pas d'anomalie détectée	Total
Malades			
Non malades			
Total			10 000

3. Une femme de 40 ans a subi une mammographie qui a détecté une anomalie. Quelle est la probabilité qu'elle soit atteinte d'un cancer du sein ?
4. La valeur prédictive positive du test dans une population donnée, notée VPP, est la probabilité qu'un individu, à qui l'on détecte une anomalie, soit effectivement malade. De même, la valeur prédictive négative du test dans une population donnée, notée VPN, est la probabilité qu'un individu, à qui l'on ne détecte pas d'anomalie, soit sain. Calculer les valeurs prédictives positive et négative d'une mammographie chez les femmes de 40 ans.
5. La CNIL, dans son document *Comment permettre à l'Homme de garder la main ?* évoque l'utilisation de l'intelligence artificielle dans le diagnostic médical :

« On annonce [...] que l'intelligence artificielle serait supérieure à l'homme pour le diagnostic de certains cancers ou pour l'analyse de radiographies. Dans le cas où ces annonces s'avéreraient exactes, il pourrait donc devenir hasardeux pour un médecin d'établir un diagnostic ou de faire un choix thérapeutique autre que celui recommandé par la machine, laquelle deviendrait dès lors le décideur effectif. »

Quelles pourraient être les dérives de cette utilisation dans le domaine médical ?

LA BONNE MÉTHODE

1. L'énoncé donne le pourcentage de femmes à qui l'on détecte une anomalie, sachant qu'elles ne sont pas malades.
2. **a.** L'échantillon de l'étude est de 10 000 personnes. L'énoncé précise le pourcentage de malades.
b. Parmi les femmes atteintes d'un cancer du sein, il faut déterminer celles à qui l'on détecte une anomalie.
c. Déterminer le nombre de femmes qui n'ont pas de cancer du sein. Puis, parmi ces femmes-là, il faut déterminer celles à qui l'on a détecté une anomalie.
d. Synthétiser les valeurs trouvées précédemment dans le tableau, puis déduire par addition ou soustraction les valeurs manquantes.
3. Il faut calculer la probabilité que la femme soit atteinte d'un cancer sachant qu'on lui a détecté une anomalie.
4. La VPP (ou VPN respectivement) correspond à la probabilité que la personne soit malade (ou saine) sachant qu'on lui a détecté (ou non) une anomalie. On peut également déduire la VPP de la question précédente.
5. Penser à ce qui peut se passer concrètement si le médecin ne traite pas une personne qui a été classée parmi les « non malades » par l'intelligence artificielle, alors qu'elle est effectivement malade.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Un million d'espèces en danger d'extinction

Le rapport mondial de l'IPBES alerte sur la disparition accélérée de la vie sauvage, qui menace l'humanité.

C'est un chiffre-choc, propre à frapper les esprits, les consciences et peut-être les cœurs : un million d'espèces animales et végétales – soit une sur huit – risquent de disparaître à brève échéance de la surface de la Terre ou du fond des océans. Telle est l'alerte, lancée lundi 6 mai, à Paris, à l'adresse des gouvernants et des peuples, par la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES). Pour engager à l'action plutôt qu'à la résignation, celle-ci veut pourtant garder espoir : éviter le pire est encore possible, à condition de mettre fin à la surexploitation de la nature.

Réunis depuis une semaine à la Maison de l'Unesco, les représentants de 110 pays, sur les 132 que compte cette organisation onusienne, souvent appelée le « GIEC de la biodiversité », ont négocié, terme à terme, avant de l'approuver à l'unanimité selon la règle, un « résumé pour les décideurs », d'une quarantaine de pages. Celui-ci s'appuie sur un rapport exhaustif de plus de 1 700 pages, fruit de trois ans de recensement et d'analyse de données par plusieurs centaines d'experts, sur l'état de la biodiversité mondiale. Le document final traduit donc un consensus, à la fois scientifique et politique, qui lui donne tout son poids.

« La santé des écosystèmes dont nous dépendons, comme toutes les autres espèces, se dégrade plus vite que jamais, résume le président de l'IPBES, le Britannique Robert Watson. *Nous sommes en train d'éroder les fondements mêmes de nos économies, nos moyens de subsistance, la sécurité alimentaire, la santé et la qualité de vie dans le monde entier. »* Mais, ajoute-t-il, *« il n'est pas trop tard pour agir, mais seulement si nous commençons à le faire maintenant à tous les niveaux, du local au mondial ».*

Une disparition accélérée des espèces

« Les activités humaines menacent d'extinction davantage d'espèces au niveau mondial que jamais auparavant », avertit solennellement l'IPBES, qui fait état d'un taux actuel d'extinction *« au moins des dizaines ou des centaines de fois supérieur à ce qu'il a été en moyenne durant les dernières 10 millions d'années ».*

Ce sont ainsi *« environ un million d'espèces* [qui] *sont déjà menacées d'extinction, pour beaucoup dans les prochaines décennies ».* Cela, sur un total de 8,1 millions d'espèces animales et végétales, dont 5,9 millions terrestres et 2,2 millions marines, sachant que ces chiffres sont des estimations, puisque seulement 15 % environ du vivant est connu et répertorié. Autrement dit, une espèce sur huit est en danger de mort.

Il faut noter qu'à eux seuls les insectes représentent plus des deux tiers de l'ensemble des espèces (5,5 millions) et que 10 % d'entre elles sont jugées menacées. Le taux est donc plus élevé pour le reste de la faune et de la flore sauvage. Sur les 97 000 espèces évaluées avec précision par l'Union internationale pour la conservation de la nature, un quart sont en réalité en « liste rouge », c'est-à-dire en danger de disparition. Chez les vertébrés, c'est le cas de 25 % des mammifères (et 39 % des mammifères marins), 41 % des amphibiens, 19 % des reptiles, 13 % des oiseaux, 7 % des poissons, 31 % des raies et requins. Parmi les invertébrés, 33 % des récifs coralliens, 27 % des crustacés, 7 % des gastéropodes, 15 % des libellules sont dans la même situation. Dans le règne végétal, les taux s'échelonnent entre 16 % et 63 % selon les groupes taxonomiques avec, par exemple, un risque de 34 % pour les conifères.

Et la machine à broyer le vivant s'emballe : si rien n'est fait pour l'arrêter, les experts annoncent *« une nouvelle accélération du rythme mondial d'extinction ».*

Des écosystèmes sous pression

Dans une formule saisissante qui n'a pas été reprise dans le résumé pour les décideurs, le rapport scientifique précise que, d'ores et déjà, plus d'un demi-million d'espèces terrestres peuvent être considérées comme des *« espèces mortes ambulantes »* si leurs habitats ne sont pas restaurés. Car telle est la principale cause de cet effondrement : 75 % des milieux terrestres sont *« altérés de façon significative »*, 66 % des milieux marins subissent *« de plus en plus d'impacts cumulatifs »*, et plus de 85 % des zones humides *« ont été perdues ».*

L'un des intérêts du rapport est de hiérarchiser les facteurs de la perte de biodiversité, tous imputables aux activités humaines. En tête (30 % des impacts) arrive le changement d'usage des milieux naturels. En clair, la destruction et la fragmentation des habitats, dues en très grande partie à la déforestation au profit des cultures agricoles, des plantations de palmiers à huile ou de l'élevage du bétail – le couvert forestier mondial a reculé d'un tiers par rapport à la période préindustrielle –, mais aussi à l'extraction minière, aux grands barrages hydrauliques, aux routes ou à l'étalement urbain.

S'y ajoute (pour 23 %) l'exploitation des ressources naturelles – chasse, pêche, coupes de bois… – ou plutôt leur surexploitation, souvent par des pratiques illégales. Arrivent ensuite, à égalité (14 %), le changement climatique et les pollutions de toutes sortes, des sols, des eaux et de l'air, en particulier par les pesticides, par les déchets industriels (entre 300 et 400 millions de tonnes de métaux lourds, solvants, boues toxiques sont déversées chaque année dans les milieux aquatiques) et par

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

le plastique, dont le volume a été multiplié par dix dans les océans depuis 1980.

Les espèces invasives, dont la dissémination est favorisée par le commerce mondial, constituent la dernière des grandes menaces (11 %), d'autres perturbations comme le tourisme jouant pour l'instant un moindre rôle.

Alors que le réchauffement n'était jusqu'alors considéré que comme un facteur aggravant, il est donc aujourd'hui reconnu comme un déterminant majeur. Et les chercheurs estiment qu'il constitue un *« risque croissant »*.

Des « contributions aux peuples » irremplaçables

En même temps que le tissu du vivant, ce sont aussi *« les contributions de la nature aux populations, vitales pour l'existence humaine et la bonne qualité de vie »*, qui s'amenuisent dramatiquement, mettent en garde les experts. *« Ces contributions forment le plus important "filet de sécurité" pour la survie de l'humanité,* selon l'Argentine Sandra Diaz, qui a coprésidé l'évaluation de l'IPBES. *Mais ce filet a été étiré jusqu'à son point de rupture. »*

Plus de deux milliards de personnes dépendent aujourd'hui du bois pour leurs besoins énergétiques, et plus de quatre milliards se soignent par des médecines naturelles. Plus de 75 % des cultures alimentaires, notamment de fruits et légumes, reposent sur la pollinisation. Et les milieux naturels, océans, sols et forêts, absorbent 60 % des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Les écosystèmes sont également indispensables à la qualité de l'air, de l'eau et des terres.

À ces contributions matérielles s'en adjoignent d'autres, plus difficiles à quantifier, d'ordre culturel. La nature est une source *« d'inspiration et d'apprentissage, d'expériences physiques et psychologiques »* et, plus largement, *« d'identité »*.

À cet égard, le rapport accorde une large place aux peuples autochtones et aux communautés locales. Ils sont aujourd'hui les gardiens d'au moins un quart des terres de la planète – qu'ils en aient la propriété foncière ou qu'ils les gèrent –, et de plus d'un tiers des territoires encore peu dénaturés par les activités humaines. Mais ce patrimoine est également le plus menacé par la prédation croissante de ressources naturelles.

De ce fait, les parties du monde qui subiront le plus des *« effets négatifs importants »* abritent *« de grandes concentrations de peuples autochtones et beaucoup des communautés les plus pauvres »*. Les régions tropicales sont ainsi les plus exposées au déclin de leur biodiversité, sous l'effet conjugué du changement climatique, de l'exploitation agricole des terres et du prélèvement de ressources halieutiques.

Les objectifs de développement durable compromis

D'ores et déjà, il est clair que la plupart des objectifs que la communauté internationale s'était fixés en 2010, lors de la conférence de la Convention sur la diversité biologique d'Aichi, au Japon, ne seront pas atteints. Il s'agissait notamment de faire en sorte que, d'ici à 2020, *« le rythme d'appauvrissement de tous les habitats naturels* [soit] *réduit de moitié au moins et si possible ramené à près de zéro »*, et que *« l'état de conservation des espèces menacées* [soit] *amélioré »*. À l'exception du développement d'aires marines et terrestres protégées, pour lesquelles les avancées sont réelles, la situation n'a fait en réalité que se dégrader.

Mais le rapport souligne que si elle se poursuit, la tendance actuelle va également *« saper les progrès »* nécessaires aux « objectifs de développement durable » des Nations unies pour 2030. Cela, qu'il s'agisse de la lutte contre la pauvreté et la faim dans le monde, ou de l'accès à de l'eau propre et à la santé.

Dans une approche très « altermondialiste », l'IPBES met ainsi en cause un modèle de consommation insoutenable. Au cours du demi-siècle écoulé, la production agricole mondiale a triplé et celle de bois brut a augmenté de 45 %, tandis que le commerce international a été multiplié par dix. Cette pression accrue s'explique en grande partie par la hausse de la population mondiale. Mais, depuis 1980, la consommation moyenne par habitant de ressources naturelles (produits animaux et végétaux, combustibles fossiles, minerais, matériaux de construction) a progressé de 15 % avec, bien sûr, de très fortes disparités entre pays riches et pauvres.

La raréfaction des biens tirés de la nature et leur inégale répartition *« alimentent l'instabilité sociale et les conflits »*, préviennent les auteurs qui avancent le chiffre de « plus de 2 500 conflits en cours » pour l'accès aux ressources fossiles, à l'eau, à la nourriture ou aux terres.

POURQUOI CET ARTICLE ?

La biodiversité est en déclin. Cette formule que l'on entend souvent n'est pas un délire de militants mais bien un constat, fait à partir de données compilées jour après jour par les scientifiques. Et notre espèce en est la responsable. Certaines de nos actions, comme la surexploitation des ressources naturelles ou la pollution ont un impact évident. Mais, ce ne sont pas les seules à faire des dégâts et la destruction ou l'altération des milieux est en fait la première cause de la baisse de la biodiversité. L'avenir montrera si nous aurons la capacité ou le désir d'agir à ce sujet, au-delà du constat.

« Changer en profondeur » l'usage de la nature

La perte du *« patrimoine commun »* que constitue la biodiversité est-elle alors inéluctable ? Elle peut encore être enrayée, assurent les chercheurs. Ceux-ci ont exploré différents scénarios à l'horizon 2050, en combinant des paramètres socio-économiques et climatiques. Dans la plupart des projections, la détérioration se poursuit ou s'aggrave, sauf dans les cas d'un *« changement en profondeur »* de l'usage que l'humanité fait de la nature. Ce qui suppose une moindre pression sur les terres pour les besoins énergétiques et alimentaires – en particulier en protéines animales –, une croissance démographique *« faible ou modérée »*, ainsi qu'une *« atténuation »* du changement climatique.

« Nos scénarios montrent qu'il est possible de changer de trajectoire, si nous agissons très rapidement sur notre modèle de consommation, à l'échelle aussi bien individuelle

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

que planétaire », explique Yunne-Jai Shin, chercheuse en écologie marine à l'Institut de recherche pour le développement, qui a coordonné ce chapitre.

L'IPBES met en avant la nécessité de *« réformes fondamentales des systèmes financier et économique mondiaux »*, au profit d'une *« économie durable »*. Et souligne notamment la nocivité des subventions accordées aux entreprises de pêche, à l'agriculture intensive, à l'élevage du bétail, à l'exploitation forestière ou à l'extraction de minerais et de combustibles fossiles.

C'est dans la partie consacrée aux solutions concrètes que le rapport est le moins précis, en s'abstenant de préconisations chiffrées que les États auraient pu juger trop prescriptives. Il liste des *« leviers »* d'action, comme des *« incitations à la responsabilité environnementale et l'élimination des incitations nocives »*, des *« mesures préventives dans les institutions et les entreprises pour éviter la détérioration de la nature, la limiter ou y remédier »*, assorties d'un *« suivi des résultats »*, ou le *« renforcement »* des lois et politiques environnementales. Il appelle aussi à une *« coopération internationale accrue »*.

Il préconise de *« reconnaître le savoir, les innovations et pratiques, les institutions et les valeurs des peuples autochtones »* – la mention de leurs *« droits »*, présente dans une version antérieure du résumé, a disparu de cette phrase – et de *« s'attaquer à la pauvreté et aux inégalités »* pour assurer un développement *« soutenable »*. Il prône encore la promotion d'une agriculture, d'une pêche, plus vertueuses.

Mais l'IPBES ne définit pas d'objectif aussi clair et mesurable que celui qui, dans le domaine du climat, vise à ne pas dépasser 2 °C – et si possible 1,5 °C – de réchauffement. Telle sera la tâche des États qui se retrouveront, fin 2020, à Kunming, en Chine, pour la 15e conférence des parties de la Convention sur la diversité biologique.

« Nous arrivons à un point de bascule. Une prise de conscience des enjeux de la biodiversité est en train de se faire jour, comme cela a été le cas auparavant pour le climat, confiait, dimanche, la secrétaire exécutive de l'IPBES, Anne Larigauderie, qui venait de présenter les conclusions du rapport au G7 de l'environnement, réuni à Metz. *Elle doit maintenant se diffuser à tous les niveaux, chez les responsables politiques comme dans les entreprises et chez les citoyens, dans tous les secteurs d'activité. »* Tel est précisément le sens de l'alerte rouge des scientifiques.

Pierre Le Hir,
dans *Le Monde* daté du 07.05.2019

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les champignons, menace silencieuse

Les attaques fongiques réduisent les rendements agricoles de plus de 20 %. Les pesticides épandus en masse pour protéger les récoltes ont engendré des résistances, y compris chez des souches qui infectent l'homme et font 1,6 million de morts par an. Enquête.

Faites le test : demandez autour de vous quel champignon présente le plus de danger pour l'humain. Neuf personnes sur dix choisiront l'amanite phalloïde. Erreur on ne peut plus funeste. Avec ses quelques dizaines de décès en Europe les pires années, le « calice de la mort » devrait faire figure d'amateur dans la planète mycète. De même que le moustique surpasse de loin tous les animaux réputés féroces, les vrais tueurs, chez les champignons, sont microscopiques, méconnus et autrement plus meurtriers que notre vénéneuse des forêts. *Cryptococcus*, *pneumocystis*, *aspergillus* et *candida* : chaque année, chacune de ces grandes familles tue plusieurs centaines de milliers de personnes. Selon les dernières estimations du Gaffi (le Fonds global d'action contre les infections fongiques), les pathologies associées feraient au moins 1,6 million de victimes annuelles, soit presque autant que la tuberculose (1,7 million), la maladie infectieuse la plus meurtrière au monde. *« Des estimations basses »*, précise le professeur David Denning, directeur exécutif du Gaffi et chercheur à l'université de Manchester.

D'autant qu'elles ne prennent nullement en compte le poids des attaques fongiques dans les désordres alimentaires planétaires. Les deux principales pathologies du blé, la septoriose et la rouille noire, toutes deux provoquées par un champignon, feraient baisser la production mondiale de 20 %. La production ainsi perdue suffirait à nourrir 60 millions de personnes. Etendues à l'ensemble des cultures agricoles, c'est 8,5 % de la population mondiale, soit environ 600 millions de personnes, selon des chiffres publiés en 2012, qui pourraient garnir leurs assiettes si les lointains cousins de la truffe épargnaient les récoltes.

Il faut dire que les champignons sont partout. Sur nos poignées de porte et au bord de nos baignoires, à la surface des aliments que nous ingérons comme dans l'air que nous respirons. Essentiels au cycle du vivant, ils digèrent les déchets et les recyclent en énergie disponible. Sans eux, pas de compost ni d'engrais naturels, pas de roquefort ni de vins doux. Encore moins de pénicilline, ce premier antibiotique né de l'appétit des moisissures *penicillium* pour les bactéries. Précieux pour l'ordre végétal, donc, et pour la plupart sans danger pour les humains. *« Sur les quelque 1,5 million d'espèces estimées, quelques centaines ont la capacité de survivre dans notre organisme,* souligne le professeur Stéphane Bretagne, chef du laboratoire de mycologie de l'hôpital Saint-Louis, à Paris, et directeur adjoint du Centre national de référence (CNR) des mycoses invasives de l'Institut Pasteur. *En plaçant notre corps à 37 degrés, l'évolution nous a mis à l'abri de la plupart des champignons. Les autres, quand tout va bien, sont éliminés par notre système immunitaire. »*

En avril 2012, pourtant, un inquiétant « Fear of fungi » (« La peur des champignons ») barrait la « une » de la prestigieuse revue *Nature*. Sept scientifiques britanniques et américains y décrivaient l'explosion d'infections virulentes parmi les plantes et les animaux.

On croyait, depuis la grande famine irlandaise (1845-1852) et les épidémies d'oïdium (1855) puis de mildiou (1885) qui détruisirent l'essentiel de la vigne française, que les grands périls agricoles étaient derrière nous. Eh bien non, répondaient-ils : la pression fongique sur les cinq principales cultures vivrières ne cesse de s'intensifier. Le blé, donc, mais aussi le riz, assailli dans 85 pays par la pyriculariose, avec des pertes de 10 % à 35 % des récoltes. Idem pour le soja, le maïs et la pomme de terre. *« Si ces cinq céréales subissaient une épidémie simultanée, c'est 39 % de la population mondiale qui verrait sa sécurité alimentaire menacée »*, explique Sarah Gurr, du département sécurité alimentaire de l'université d'Exeter, une des signataires de l'article.

Les champignons ne s'en prennent pas qu'à l'agriculture, rappelaient les chercheurs. Reprenant la littérature, ils constataient que 64 % des extinctions locales de plantes et 72 % des disparitions animales avaient été provoquées par des maladies fongiques. Un phénomène amplifié depuis le milieu du XX^e^ siècle : le commerce mondial et le tourisme ont déplacé les pathogènes vers des territoires où leurs hôtes n'ont pas eu le temps d'ériger des défenses. Les États-Unis ont ainsi perdu leurs châtaigniers, l'Europe a vu ses ormes décimés. Les frênes sont désormais touchés : arrivée d'Asie il y a quinze ans, la chalarose a ainsi frappé la Pologne, puis toute l'Europe centrale. Elle occupe désormais un tiers du territoire français. Seule chance : *Chalara fraxinea* ne supporte pas la canicule. La maladie a donc arrêté sa progression et commencerait même à reculer.

Grenouilles et crapauds décimés

Les animaux sont encore plus durement atteints. Selon l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), 40 % des espèces d'amphibiens sont aujourd'hui menacées, des dizaines auraient disparu. Premier responsable : *Batrachochytrium dendrobatidis*, alias Bd. Depuis vingt ans, le champignon venu de Corée a décimé

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

grenouilles et crapauds en Australie et sur l'ensemble du continent américain. Son cousin Bsal, lui aussi arrivé d'Asie, cible salamandres et tritons européens avec une mortalité proche de 100 %.

Aux États-Unis, un autre champignon, le bien nommé *Geomyces destructans*, poursuit son carnage auprès des chauves-souris. La maladie du museau blanc touche près de la moitié du pays et aurait tué plusieurs millions de chiroptères. Coraux et tortues dans les mers, abeilles, oies et perroquets dans les airs… la liste est longue. *« Il ne fait guère de doute que ces pathologies sont de plus en plus nombreuses,* affirme, statistiques à l'appui, Matthew Fisher, du département des maladies infectieuses de l'Imperial College de Londres, premier signataire de la publication de 2012. *Depuis notre article, il y a eu une prise de conscience, mais la situation s'est détériorée. »*

Aussi en mai, Matthew Fisher et Sarah Gurr ont récidivé, cette fois dans *Science*, en s'adjoignant les services du Suisse Dominique Sanglard. Biologiste à l'université de Lausanne, il traque *« l'émergence mondiale de résistance aux antifongiques »* en incluant dans le tableau les pathologies humaines. Des maladies *« longtemps négligées, souligne-t-il. D'abord, elles étaient moins fréquentes que les pathologies bactériennes ou virales. Ensuite, elles frappent des patients immunodéprimés – dont les défenses ne sont plus capables de contenir les champignons –, pas des sujets sains. Enfin, un champignon, c'est beaucoup plus complexe qu'une bactérie, beaucoup plus proche de nous aussi, donc plus difficile à combattre sans attaquer nos propres cellules »*.

L'épidémie de sida, dans les années 1980, a commencé à modifier la donne. *« Les patients immunodéprimés se sont mis à mourir massivement de pneumocystoses ou de cryptococcoses »*, se souvient Olivier Lortholary, chef du service des maladies infectieuses et tropicales à l'hôpital Necker et directeur adjoint du CNR mycoses invasives à l'Institut Pasteur. Si l'accès aux trithérapies a permis de limiter l'hécatombe dans les pays occidentaux, il n'en va pas de même ailleurs dans le monde. Selon les dernières statistiques du Gaffi, plus de 535 000 malades du sida meurent encore chaque année, victimes d'une infection fongique associée. *« C'est sans doute plus,* insiste David Denning. *Certaines pathologies fongiques pulmonaires sont prises pour des tuberculoses. »*

Mycologue au CHR de Cayenne, Antoine Adenis en sait quelque chose. La forte présence de la leishmaniose dans le département avait conduit le service de dermatologie à analyser toutes les plaies des patients séropositifs. *« Nous avons découvert la présence de l'histoplasmose un peu par hasard »*, raconte-t-il. Les médecins ont alors systématiquement recherché le champignon *histoplasma* et découvert qu'il constituait la première cause de décès des malades du sida en Guyane. Au Suriname voisin, réputé vierge de champignons, il a découvert que *« 25 % des hospitalisés VIH étaient touchés »*. Le médecin a ensuite étendu son étude à toute l'Amérique latine. Le résultat a stupéfié la communauté : selon un article publié en août, dans *The Lancet*, le champignon y tuerait quelque 6 800 personnes par an, plus que la tuberculose, réputée première cause de mortalité associée au sida.

Les champignons et leurs spores ne se contentent pas d'attaquer les porteurs du VIH. *« Ils compliquent toutes les pathologies respiratoires quand ils ne les provoquent pas »*, explique David Denning. Asthme sévère, aspergilloses broncho-pulmonaires allergiques ou chroniques… *« Cela représente plus de 14 millions de personnes dans le monde et au moins 700 000 décès par an »*, assure le médecin britannique.

Enfin, il y a les pathologies dites « hospitalières ». *« Chimiothérapies, greffes de moelle, transplantations d'organes, biothérapies… La médecine moderne, comme l'augmentation de la durée de la vie, multiplie la quantité de malades immunodéprimés dans les hôpitaux,* analyse Tom Chiller, chef de la branche mycoses du Centre de contrôle des maladies américain (CDC). *Beaucoup ont déjà en eux des champignons qui trouvent là l'occasion de prospérer, ou ils les rencontrent à l'hôpital. Tous représentent des cibles idéales. »* Une fois les pathogènes dans le sang, le pronostic devient effrayant. À l'échelle mondiale, le taux de mortalité parmi le million de malades traités avoisinerait les 50 %. *« En France, depuis quinze ans, le taux reste entre 30 % et 40 % pour les candidoses, entre 40 % et 50 % pour les aspergilloses,* indique Stéphane Bretagne. *Désespérément stable. » « Et l'incidence des candidoses systémiques augmente de 7 % chaque année,* renchérit son collègue Olivier Lortholary. *Même si c'est en partie dû à l'augmentation de la survie des patients de réanimation aux attaques bactériennes, c'est une vraie préoccupation, ma principale inquiétude avec les champignons émergents souvent multirésistants. »*

Résistances et émergences : l'hôpital de Nimègue, aux Pays-Bas, et son équipe de recherche en mycologie, en sont devenus les références mondiales. En 1999, le centre y a enregistré le premier cas de résistance d'une souche d'*Aspergillus fumigatus* aux azoles, la principale classe d'antifongiques. Puis les cas se sont multipliés. *« Et ça ne cesse de croître,* souligne Jacques Meis, chercheur au centre néerlandais. *Dans tous les hôpitaux des Pays-Bas, la résistance dépasse les 10 %, et atteint jusqu'à 23 %. »* Avec, pour 85 % des patients infectés, la mort dans les trois mois.

Les horticulteurs dans le viseur

Les scientifiques n'ont pas mis longtemps à désigner un suspect : les horticulteurs. Aux Pays-Bas, champions de l'agriculture intensive, le traitement standard des tulipes consiste à en plonger les bulbes dans un bain d'azoles. Longtemps, les organisations agricoles ont plaidé non coupables. Mais à travers le monde, les preuves se sont multipliées. À Besançon, où ont été mis en évidence les deux premiers cas français d'aspergilloses résistantes chez un agriculteur et un employé de la filière bois, les mêmes souches mutantes ont été trouvées dans les champs du malade et dans plusieurs scieries de la région. *« Les agriculteurs ne visent pas les mêmes champignons, mais les fongicides qu'ils emploient ne font pas la différence, ils rendent résistants les pathogènes humains »*, explique Laurence Millon, chef du service de parasitologie-mycologie du centre hospitalier de Besançon. *« L'histoire se répète,*

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

soupire Matthew Fisher. *L'usage massif des antibiotiques par les éleveurs a développé les résistances des bactéries humaines. L'emploi à outrance des fongicides par les cultivateurs fait de même avec les champignons.»*

Le monde agricole se trouve pris entre deux menaces. D'un côté, la résistance toujours plus importante de champignons dopés par le changement climatique conduit à multiplier les traitements phytosanitaires. *«Cette année, dans les vignes du sud de la France, la pression fongique était telle qu'au lieu des onze traitements annuels moyens – ce qui est déjà beaucoup –, les vignerons en ont délivré entre quinze et dix-sept»*, constate Christian Huyghe, directeur scientifique agriculture de l'Institut national de la recherche en agronomie (INRA). La faute à un printemps exceptionnellement pluvieux et à un été particulièrement sec. Mais aussi à l'adaptation des champignons à tout ce que le génie humain invente de produits phytosanitaires. Depuis les années 1960, l'industrie s'en est pris successivement à la membrane des cellules du champignon, à leur paroi, à leur ARN ou à leur respiration… Cinq classes d'antifongiques ont été mises au point. *«Trois étaient efficaces,* résume Sabine Fillinger, généticienne à l'INRA. *Les strobilurines rencontrent des résistances généralisées. De plus en plus de produits azolés connaissent le même sort. Il reste les SDHI* [inhibiteur de la succinate déshydrogénase]*, mais ils commencent eux aussi à y être confrontés et ça va s'aggraver.»*

De plus en plus impuissants face aux pathogènes, les fongicides agricoles se voient aussi accusés de menacer la santé humaine. Des chercheurs de l'INRA et de l'Inserm ont ainsi lancé un appel dans *Libération*, le 16 avril, afin de suspendre l'usage des SDHI. Le dernier-né des traitements n'entraverait pas seulement la respiration des cellules de champignons ; par la même action sur les cellules animales et humaines, il provoquerait des *«encéphalopathies sévères»* et des *«tumeurs du système nerveux»*. L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses) a décidé d'examiner l'alerte. Elle s'est d'autre part autosaisie afin de vérifier l'éventuelle toxicité humaine de l'époxiconazole. *«Cet azole est l'une des dernières substances actives sur le marché, nous en utilisons 200 tonnes par an en France, mais c'est également un reprotoxique de catégorie 1* [affecte la fertilité]*, la plus préoccupante, et un cancérigène de catégorie 2»*, indique Françoise Weber, directrice générale déléguée au pôle produits réglementés de l'Anses. Un avis négatif de la France pourrait peser en vue de la réévaluation du produit au niveau européen, prévue en avril 2019.

À l'INRA comme à l'Anses, on jure avoir comme nouvel horizon une agriculture sans pesticide. Développement de nouvelles variétés, diversification des cultures, morcellement des paysages et *«anticipation des pathologies nouvelles que le changement climatique fait remonter vers le nord et que le commerce mondial apporte d'Asie»*, insiste Christian Huyghe. Du blé tendre aux laitues ou aux bananes, nombre de cultures font face à des pathogènes émergents. Des champignons nouveaux frappent également les humains. Dans les services hospitaliers, le dernier diable s'habille en or. Découvert au Japon en 2009 et intrinsèquement résistant à tous les traitements, *Candida auris* flambe particulièrement dans les hôpitaux indiens, pakistanais, kényans et sud-africains. La France semble jusqu'ici épargnée. Mais cinq autres champignons à « résistance primaire » y ont fait leur nid, totalisant 7 % des infections invasives à Paris, là encore chez les immunodéprimés.

Plus inquiétant peut-être, de nouvelles infections invasives touchent des patients dits immunocompétents. Aux États-Unis, la « fièvre de la vallée » ne cesse de progresser. Pour la seule Californie, les coccidioïdes cachés dans la terre, relâchés à la faveur de travaux d'aménagement ou agricoles, ont contaminé 7 466 personnes en 2017. Au CDC d'Atlanta, on ne dispose d'aucune statistique nationale mais on parle de *«centaines»* de morts.

Moins meurtrière mais terriblement handicapante, une nouvelle forme de sporotrichose touche des dizaines de milliers de Brésiliens. Partie de Rio, elle a conquis le sud du pays et gagne le nord, essentiellement transmise par les chats. *«L'épidémie est hors de contrôle»*, assure Jacques Meis. Et que dire de ces ouvriers de Saint-Domingue qui nettoyaient une conduite d'usine remplie de guano de chauves-souris ? *«Ils étaient 35, jeunes, aucun n'était immunodéprimé,* raconte Tom Chiller, qui a publié le cas en 2017 dans *Clinical Infectious Diseases. Trente sont tombés malades, 28 ont été hospitalisés.»* Le diagnostic d'histoplasmose n'a pas tardé. Neuf ont été admis en soins intensifs. Trois sont morts.

Cette hécatombe mondiale n'a rien d'une fatalité, assurent les scientifiques. *«La médecine moderne augmente les populations à risque,* admet David Denning. *Mais en améliorant le diagnostic et l'accès aux traitements, en développant la recherche, en réservant à la santé humaine les nouvelles molécules qui finiront par apparaître, on doit pouvoir réduire considérablement la mortalité des infections.»* Doux rêve, répond Antoine Adenis. *«La mycologie reste le parent pauvre de la microbiologie»*, regrette-t-il. Ainsi, pour la première fois cette année, Laurence Millon n'aura pas d'interne dans son service de Besançon. Et David Denning, qui gère son Gaffi avec des bouts de ficelle, de soupirer : *«Quand un malade leucémique meurt d'une infection fongique, tout le monde parle du cancer à l'enterrement, personne des champignons. Et à qui pensez-vous que l'on fait les dons ?»*

Nathaniel Herzberg, dans *Le Monde Science & médecine* daté du 19.09.2018

POURQUOI CET ARTICLE ?

Les résistances aux pesticides ne concernent pas que les bactéries ou les insectes. Elles existent également chez les plus proches cousins des animaux sur l'arbre du vivant : les champignons. En effet, ceux-ci forment une grande famille méconnue du grand public et certains d'entre eux sont redoutables pour les cultures ou même pour notre propre organisme !

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Neandertal est en chacun de nous

Génétique – Les métissages entre l'homme de Neandertal et « Homo sapiens » ont laissé des traces dans le génome de l'ensemble de la population humaine actuelle, et pas seulement chez les non-Africains, comme on le supposait, affirme une nouvelle étude.

En 2010, l'ébauche de la séquence du génome de l'homme de Neandertal avait créé la surprise : l'analyse de l'ADN ancien de trois individus révélait que ce cousin disparu avait croisé *Homo sapiens* et que cette rencontre avait été féconde, puisqu'une partie du génome néandertalien se retrouvait dans celui des populations actuelles non africaines : de 1 % à 4 % de leur ADN était un héritage néandertalien. Cette estimation, qui s'est depuis affinée pour parvenir à une moyenne de 2 % d'ADN néandertalien, était en partie fondée sur l'hypothèse qu'aucun métissage n'avait pu intervenir avec des populations anciennes africaines, et que le génome de celles-ci pouvait servir de base de comparaison « neutre ».

C'était compter sans la bougeotte consubstantielle à *Homo sapiens* : cette hypothèse était erronée, et il y a bien aussi une part de Neandertal chez les Africains d'aujourd'hui, comme *« dans chaque population humaine moderne étudiée à ce jour »*, conclut une étude qui sera publiée le 20 février dans la revue *Cell*. Joshua Akey (université de Princeton) et ses collègues ont développé une méthode probabiliste d'analyse génétique pour parvenir à cette conclusion et éclairer cette *« histoire partagée »* avec Neandertal. Elle leur a précisément permis de s'affranchir d'une des limites des comparaisons utilisées précédemment, dépendantes d'un génome africain « de référence » dans lequel l'héritage néandertalien était supposé négligeable.

« Identique par descendance »

Au lieu d'utiliser un tel étalon moderne, l'approche baptisée IBDmix (pour « identique par descendance ») calcule la probabilité que le génome d'un individu soit pour partie partagé avec un génome de référence archaïque – en l'occurrence, celui d'une Néandertalienne qui vivait dans l'Altaï (Sibérie) il y a plus de 50 000 ans. L'équipe de Princeton a appliqué ce protocole à 2 504 individus actuels ayant donné leur ADN au « 1000 Genomes Project », aux origines géographiques et ethniques les plus diverses. L'idée était d'y retrouver des séquences identiques spécifiques du génome néandertalien – dont la similitude ne soit pas liée au fait que nous partageons un ancêtre commun avec Neandertal vieux d'environ 500 000 ans, mais bien à des croisements intervenus plus récemment.

L'analyse a révélé que la contribution néandertalienne dans l'échantillon d'individus africains était en moyenne de 17 mégabases (Mb, millions de paires de bases, les « lettres » formant la séquence d'ADN). Soit approximativement 0,3 % de leur génome. C'est bien moins que les 51 Mb des Européens, et les 55 Mb des Asiatiques de l'Est et du Sud, mais bien plus que les quelques centaines de milliers de paires de bases trouvées dans les études précédentes chez les Africains.

Comment l'expliquer ? Pas par un croisement direct qui serait intervenu entre des Néandertaliens et des populations africaines, estiment les chercheurs, mais plutôt par le retour en Afrique d'*Homo sapiens* européens, qui étaient, eux, porteurs d'ADN néandertalien du fait de croisements intervenus antérieurement. Autre enseignement précieux : une première sortie d'Afrique d'*Homo sapiens*, il y a environ 200 000 ans, aurait donné lieu à des croisements avec des Néandertaliens. Mais pas à une descendance *sapiens* durable en Europe. C'est lors d'une sortie d'Afrique plus récente que notre espèce se serait vraiment répandue en Eurasie et à nouveau métissée avec Neandertal. Par le jeu de migrations ultérieures, cet ADN « néandertalien » serait parvenu en Afrique.

Ces nouvelles données complexifient donc le flux et reflux de populations anciennes et les mélanges qui se sont ensuivis – la génétique avait déjà montré ces dernières années que des va-et-vient de populations avaient injecté de l'ADN européen dans le patrimoine génétique africain.

« C'est une belle étude », commente Svante Pääbo (Institut Max Planck d'anthropologie évolutionnaire, Leipzig), pionnier de l'étude des génomes anciens, qui a dirigé les premiers séquençages de Néandertaliens. *« Jusqu'ici, les estimations de l'héritage néandertalien chez les Européens et les Asiatiques supposaient que les Africains ne portaient pas d'ADN néandertalien,* convient-il, *bien que nous sachions que ce n'était pas strictement vrai. »* Concernant les sorties d'Afrique d'*Homo sapiens*, sans lendemain ou non, et les métissages qui les ont accompagnées, la nouvelle étude apporte *« de nouvelles preuves »*, par rapport à l'étude directe de génomes néandertaliens effectuée par son équipe, note-t-il.

David Reich (Harvard), autre « poids lourd » de l'ADN ancien, juge l'étude *« fascinante et importante »*, notamment parce qu'elle renforce l'idée d'un premier flux de gènes sapiens chez Neandertal il y a plus de 100 000 ans et qu'elle rééquilibre l'apport de Neandertal entre les Européens et les Asiatiques. Il est moins convaincu du poids de l'apport néandertalien dans l'ensemble des populations subsahariennes, au-delà

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

de ce qui avait été suggéré par une étude de 2019 montrant un flux de gènes européens il y a plus de 5 000 ans. La forte présence notamment de représentants du Kenya et de Gambie dans l'échantillon lui semble avoir pu peser dans la balance.

Deux événements historiques

« David a raison : ces populations étaient connues pour avoir une part d'héritage ouest-eurasien, et par voie de conséquence une portion d'héritage néandertalien, répond Joshua Akey. *Mais notre nouvelle méthode a trouvé 30 fois plus de séquences génétiques de cette origine. »* Ce *« signal »* serait dû à deux événements historiques, précise-t-il : *« L'un est l'apport de véritables séquences génétiques d'origine néandertalienne lors de retours de populations* sapiens *en Afrique. »* L'autre est lié à la première sortie d'Afrique au cours de laquelle des métissages ont eu lieu, et qui ont fait qu'une partie du génome des Néandertaliens était de provenance *sapiens*. *« En ce sens, certaines des séquences que notre méthode qualifie de néandertaliennes proviennent en réalité à l'origine d'*Homo sapiens. » Toute la puissance de révélation de la génomique est ici à l'œuvre, capable de mettre en lumière une forme de « retour au bercail » moléculaire…

La méthode IBDmix de Princeton est-elle appelée à faire référence ? *« Je pense qu'elle doit désormais être utilisée,* lâche Svante Pääbo. *Mais pour le moment, en parallèle avec les précédentes. »*

Autre enseignement tiré de cette analyse : certains des gènes néandertaliens retrouvés chez les Africains actuels sont impliqués dans la réponse immunitaire et la sensibilité aux rayons ultraviolets. Joshua Akey et ses collègues espèrent à l'avenir préciser le rôle de ces séquences dans l'adaptation face aux maladies et élargir leur analyse à d'autres populations africaines pour aboutir à des conclusions plus robustes encore.

Hervé Morin, dans *Le Monde Science & médecine* daté du 05.02.2020

POURQUOI CET ARTICLE ?

Les scientifiques parviennent aujourd'hui à séquencer, c'est à dire à retrouver l'ordre des nucléotides, d'ADN extrêmement anciens. En effet, dans certains fossiles – particulièrement les dents –, de l'ADN peut être conservé même après plusieurs dizaines voire centaines de milliers d'années. On peut donc effectuer des comparaisons entre notre espèce et d'autres espèces humaines disparues, avec parfois quelques surprises.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La tentation du retour au malthusianisme

Sommes-nous trop nombreux ? Longtemps taboue, la question revient dans les débats, portée par un double phénomène : l'insécurité alimentaire et le réchauffement climatique. Entre ceux qui doutent des capacités de la planète à nourrir 9 milliards d'individus en 2050 – après, le chiffre devrait diminuer – et ceux qui sont convaincus que la lutte contre le réchauffement climatique impose une moindre pression démographique, les thèses malthusiennes font à nouveau des adeptes.

Rappelons qu'à la fin du XVIIIe siècle l'économiste (et pasteur) britannique Thomas Malthus a expliqué, dans son *Essai sur le principe de population*, que la progression géométrique (2, 4, 8, 16…) de celle-ci causerait sa perte puisque les ressources alimentaires suivaient, elles, une progression arithmétique (2, 4, 6, 8…).

La révolution industrielle et l'explosion des rendements agricoles allaient lui donner tort. Mais, aujourd'hui, plusieurs facteurs se conjuguent pour la rendre à nouveau séduisante. L'économiste Daniel Cohen a résumé la situation aux Journées de l'économie de Lyon. Au moment même où, grâce à la mondialisation, une partie importante de l'humanité sort de la loi de Malthus et s'apprête à rejoindre le niveau de vie des Occidentaux, la contrainte écologique nous rappelle que le monde que l'on croyait infini ne l'est pas. En 2007, le groupe d'experts sur le changement climatique (GIEC) confirmait que *« le PIB par habitant et la croissance démographique ont été les principaux facteurs de l'augmentation des émissions mondiales de gaz à effet de serre durant les trois dernières décennies du XXe siècle »*.

Bien qu'elle s'en défende, une agence de l'ONU a estimé nécessaire, à trois semaines du sommet de Copenhague, de revenir sur le sujet, constatant que *« la crainte de paraître favorable à une régulation de la démographie a jusqu'à une date récente fait éviter toute mention de la "population" dans le débat sur le climat »*. Pourtant, note l'ONU, *« chaque naissance entraîne non seulement les émissions imputables à ce nouvel être durant tout le cours de sa vie mais aussi les émissions produites par tous ses descendants »*. Bien sûr, les modes de vie ont aussi une influence sur le climat – certains spécialistes jugent par exemple qu'en réduisant le nombre d'habitants par foyer, un divorce a plus d'impact sur le réchauffement qu'une naissance –, néanmoins la question démographique est centrale. L'ONU semble faire sien ce constat énoncé dès 1992 par l'Académie des sciences aux États-Unis : *« De solides programmes de planification familiale sont conformes à l'intérêt de tous les pays sur le plan des émissions de gaz à effet de serre aussi bien que sur celui du bien-être social. »*

On ne saurait être plus explicite. Les dirigeants chinois ne se privent pas de rappeler aux Occidentaux que l'état de la planète serait pire s'ils n'avaient pas limité les naissances à un enfant par famille. En France, le député (Verts) Yves Cochet propose de cesser de verser des allocations familiales au-delà du deuxième enfant. Les partisans de la décroissance ont beau expliquer qu'à leurs yeux il n'y a pas trop d'êtres humains mais trop d'automobilistes, la réponse est un peu courte. Certains en conviennent. Elle l'est d'autant plus que, comme le rappelle Daniel Cohen dans *La Prospérité du vice* (Albin Michel, 2009), quel que soit le niveau de vie atteint, ce n'est pas la richesse qui fait le bonheur mais l'enrichissement. Le toujours plus.

Comment résoudre la contradiction ? Les économistes classiques miseront sur le progrès technologique. Après tout, Malthus a énoncé sa théorie au moment même où, pas très loin de là, l'Ecossais James Watt inventait la machine à vapeur qui allait permettre la révolution industrielle et rendre obsolètes les craintes malthusiennes. La croissance verte et durable n'en est qu'à ses balbutiements. De plus, certaines solutions sont à portée de main.

Sachant qu'un kilo de bœuf nécessite jusqu'à 15 000 litres d'eau et que le bétail consomme près de la moitié des céréales produites sur Terre, une diminution de notre consommation de viande résout une partie du problème. Selon l'usage qui est fait des céréales, la Terre pouvait nourrir au début du XXIe siècle entre 3,7 et 10 milliards de personnes.

Changer nos comportements alimentaires sera d'autant plus impérieux qu'il est vain de vouloir réguler la population. Dans un petit essai très pédagogique, *Vie et mort de la population mondiale* (Editions Le Pommier/Cité des sciences et de l'industrie, 2009), le démographe Hervé Le Bras note que *« l'invocation de la population mondiale donne l'illusion qu'on peut la modifier mais il n'existe aucune institution capable d'imposer une législation destinée à limiter la croissance démographique (ou à l'encourager) »*.

L'aspiration des femmes à plus d'égalité et les espoirs d'ascension sociale de leurs enfants par l'éducation sont, selon lui, les deux moteurs de la baisse de la fécondité. La parité et l'égalité des chances constitueraient-elles deux piliers du développement durable ? Ce serait en tout cas la meilleure réponse à apporter à Malthus qui, lui, n'envisageait pas que les pauvres puissent bénéficier de la moindre ascension sociale. ●

Frédéric Lemaître,
dans *Le Monde* daté du 26.11.2009

POURQUOI CET ARTICLE ?

Malthus, dans son essai, prévoit que la population mondiale croit selon une suite géométrique alors que les ressources alimentaires progressent selon une suite arithmétique.
Les deux courbes se croiseront un jour, condamnant ainsi la population mondiale à ne plus pouvoir se nourrir.
Mais les thèses de Malthus ont jusqu'à ce jour été démenties par les faits.
Récemment, la loi démographique de Malthus a été reprise pour modéliser la pandémie de Covid-19.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Thomas Malthus ou l'obsession de la rareté

Lorsque Thomas Malthus publie en 1798, à Londres, son *Essai sur le principe de population en tant qu'il influe sur le progrès futur de la société avec des remarques sur les théories de M. Godwin, de M. Condorcet et d'autres auteurs*, il a à peine plus de 20 ans. Imitant les philosophes du XVIIIe siècle que son père, exécuteur testamentaire de Jean-Jacques Rousseau, admire, le jeune homme ouvre son essai par deux *« postulats »* : *« Premièrement, la nourriture est nécessaire à l'existence de l'homme. Deuxièmement, la passion réciproque entre les sexes est une nécessité et demeurera à peu près ce qu'elle est à présent. »*

Thomas Malthus, qui étudie la relation entre la croissance de la production agricole et celle de la population, affirme que si l'humanité avait de la *« nourriture à profusion et de la place en abondance »*, elle remplirait *« des millions de mondes en quelques milliers d'années »*. La finitude de la nature et la sagesse des hommes imposent cependant des freins à cette croissance démographique : un frein *« destructif »* – s'ils deviennent trop nombreux, les hommes se condamnent à mourir ou à vivre dans la misère – et un frein *« préventif »* – les plus éclairés pratiquent l'abstinence, ne faisant d'enfants que s'ils peuvent les nourrir.

Les sombres prophéties de Malthus ont été démenties : la croissance et le développement des XIXe et XXe siècles ont montré que la fécondité et la productivité agricole n'étaient pas des données immuables et constantes. Ses mises en garde ont cependant longtemps hanté les débats sur la démographie et la croissance. *« Son pessimisme quant à la capacité des hommes à produire des ressources alimentaires à un rythme égal à celui auquel ils se reproduisaient a été largement partagé au cours des deux derniers siècles »*, écrit Timothy Brook, historien de la Chine à l'université de la Colombie-Britannique (Vancouver), dans *La Vie des idées*.

Une forme de pessimisme

Les analyses de cet économiste, qui était aussi un pasteur de l'Eglise anglicane britannique, ont donné naissance à un courant, le malthusianisme, qui prône un strict contrôle des naissances. Cette politique peut se faire de manière démocratique, par la diffusion de la contraception ou de l'avortement, mais aussi de manière autoritaire : la législation de la Bavière interdisait ainsi, au XIXe siècle, le mariage à ceux qui ne disposaient pas d'une fortune minimale, et la Chine a imposé, en 1972, un âge minimum au mariage avant de mettre en place la politique de l'enfant unique.

POURQUOI CET ARTICLE ?

Les théories démographiques de Thomas Malthus sont de nature pessimiste. Cet article rappelle que, quoiqu'elles aient été démenties par la réalité de la croissance et du développement au cours des deux derniers siècles, ses thèses ont inspiré plusieurs politiques démographiques, en Bavière au XIXe siècle ; en Chine à partir de 1972.

Plus largement, le malthusianisme a souvent caractérisé une forme de pessimisme et de conservatisme obsédée par la question de la rareté. Le démographe et économiste Alfred Sauvy (1898-1990) qualifiait ainsi de *« malthusiennes »* les politiques qui cherchent à freiner la croissance démographique, mais aussi le développement économique. Lors de la publication du rapport du Club de Rome sur les *« limites de la croissance »*, en 1972, il avait critiqué les convictions *« malthusiennes »* des partisans de la *« croissance zéro »* : il estimait que la pression de la nécessité conduit les hommes à découvrir des solutions nouvelles.

Anne Chemin,
dans *Le Monde* daté du 09.12.2017

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Alan Turing
Un centenaire bien vivant

Célébration – Le mathématicien anglais, qui s'est suicidé à 42 ans, aurait eu 100 ans le 23 juin. Son héritage est immense : logique, informatique, cryptologie, intelligence artificielle et biologie du développement portent encore son empreinte.

Quel rapport entre une pomme, une brique de Lego, un sous-marin allemand de la seconde guerre mondiale, un ordinateur jouant aux échecs et les taches d'un guépard ? Tous ces éléments résument, en raccourci, la vie et l'œuvre de l'un des plus grands scientifiques du XXe siècle, Alan Turing, qui aurait eu 100 ans ce 23 juin. Ce mathématicien britannique est cependant mort bien avant d'avoir atteint cet âge : il s'est suicidé à 42 ans, le 7 juin 1954.

Sa brève carrière a pourtant suffi à en faire un pionnier et un visionnaire dans plusieurs domaines scientifiques : l'informatique, l'intelligence artificielle et la biologie. L'ordinateur, les robots et le concept si florissant d'application (comme pour les téléphones portables) lui doivent donc beaucoup. Alors qu'à son époque n'existaient ni transistors électroniques, ni mémoires magnétiques, ni écrans tactiles…

Mais revenons à notre inventaire hétéroclite. La pomme est celle qu'il croqua pour se suicider après l'avoir enduite de cyanure, alors qu'il avait été condamné pour homosexualité par la même loi qui envoya Oscar Wilde aux travaux forcés au siècle précédent.

La brique de Lego est l'élément qui a permis à un groupe d'étudiants de l'ENS Lyon de rendre hommage à leur aîné en construisant une machine de Turing, sorte d'ordinateur entièrement mécanique. L'œuvre, unique au monde, sera exposée lors du colloque français organisé en hommage à Alan Turing du 2 au 4 juillet à Lyon, dont la première journée sera grand public.

Le sous-marin allemand représente la contribution d'Alan Turing à la lutte contre les ennemis de la Grande-Bretagne quand, au sein des services secrets anglais, il participa au décodage des messages chiffrés de la Wehrmacht.

L'ordinateur joueur symbolise tous ces avatars de l'intelligence artificielle qui tentent d'imiter le cerveau humain, voire de le surpasser, comme Turing l'avait imaginé.

Enfin, les taches de la peau du guépard sont l'une des dernières énigmes qu'Alan Turing tenta de résoudre : le secret de l'apparition des formes et figures dans la nature.

Voilà donc, en résumé, moins de vingt ans d'une carrière scientifique marquée par au moins trois articles scientifiques majeurs. Retour en détail sur ce parcours d'exception, plus cohérent qu'il n'y paraît…

D'une machine à ruban à un prix de 1 million de dollars

Le 28 mai 1936, Alan Turing, alors à Cambridge, n'a pas encore son doctorat de mathématiques lorsqu'il envoie à la Société mathématique anglaise un article qui paraîtra l'année suivante et qui résout l'un des problèmes majeurs de l'époque : existe-t-il une méthode effective pour déterminer si une formule est vraie ou non ? La réponse de Turing est… non ! L'arsenal mathématique, malgré sa puissance théorique, ne permet pas de tout calculer. En particulier, il n'est pas possible d'écrire un algorithme capable de décider si une fonction mathématique est calculable ou pas, ou bien si une proposition est vraie ou fausse.

Cette question on ne peut plus fondamentale est posée justement à une époque où plusieurs mathématiciens, dont des spécialistes de la logique, veulent tester les bases mêmes de leur discipline. Ces dernières sont en plein vacillement depuis que Kurt Gödel a peu ou prou montré qu'il n'est pas possible de prouver certains énoncés en restant dans le cadre théorique défini. *« Alan Turing se situe au croisement de deux traditions. L'une que l'on peut qualifier de "déterministe", incarnée par Laplace par exemple, pour qui, avec les bons axiomes et les bonnes équations, tout serait calculable. Et l'autre qui émerge avec Poincaré, avec son travail sur le chaos, et Gödel. Le premier écorne le paradigme déterministe en montrant que l'évolution de certains systèmes devient imprévisible. Le second en démontrant son théorème d'incomplétude »*, résume Jean Lassègue, directeur de recherche au CNRS et philosophe au Centre de recherche en épistémologie appliquée de l'Ecole polytechnique. *« En montrant la non-décidabilité de certains problèmes, Turing est "non déterministe", mais sa démonstration est, en un sens, "déterministe" »*, poursuit le chercheur, par ailleurs auteur d'une biographie de Turing.

En effet, pour résoudre ce problème de calculabilité, Turing construit par la pensée une machine, véritable modèle de calcul, dont il parvient à faire ressortir les limites. Son concept décrit un système composé d'un ruban sur lequel sont inscrites des données d'entrée, voire des instructions (qui font office de « programme » selon le vocabulaire d'aujourd'hui). Une tête peut lire et écrire sur ce ruban et décider de le faire avancer. Une mémoire ou un processeur agit en fonction des entrées et des fonctions qui lui ont été assignées. C'est exactement sur ce principe qu'une poignée d'étudiants en informatique de l'ENS Lyon ont réalisé une machine de Turing avec près de 20 000 pièces de Lego

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

actionnées par de l'air comprimé. Cet « ordinateur » parvient à inverser les trois lettres d'un mot en quinze minutes.

« La machine de Turing n'est pas utilisée en tant que telle dans les laboratoires d'informatique. Elle est cependant omniprésente, comme peut l'être un modèle atomique pour un chimiste », explique François Morain, du Laboratoire d'informatique de l'Ecole polytechnique (LIX). La machine de Turing peut, en fait, simuler n'importe quel calcul et n'importe quel ordinateur actuel ou futur. *« La physique classique et la physique quantique sont simulables par une machine de Turing »*, précise Pascal Koiran, informaticien de l'ENS Lyon.

Mais si cette machine permet de définir si une fonction est calculable ou non, elle ne dit rien sur l'efficacité du calcul, c'est-à-dire sur les ressources nécessaires pour effectuer ce calcul (combien de temps, de mémoire…). Cette branche s'appelle la « complexité » et fait l'objet d'intenses travaux dans les laboratoires d'informatique. Un prix de 1 million de dollars a même été proposé en 2000 par la fondation américaine Clay pour qui résoudra l'épineux problème suivant : existe-t-il des problèmes mathématiques qui ne peuvent être résolus en un temps « raisonnable » (la formulation exacte étant bien sûr moins triviale) ?

Par exemple, savoir si un nombre entier est un nombre premier (divisible seulement par un et par lui-même) est calculable en un temps « raisonnable ». En revanche, trouver le trajet le plus court pour un voyageur de commerce passant par un grand nombre de villes (plusieurs milliers) n'entre pas dans cette catégorie. La question est de savoir si quelqu'un établira un meilleur algorithme ou si cette question, comme d'autres problèmes, restera vraiment hors catégorie. On le voit, ce problème est tout à fait dans l'esprit d'un Turing cherchant à déterminer la frontière entre le calculable et le non-calculable.

Imitation et limitation

Après avoir jeté les bases de ce qui ne s'appelle pas encore l'informatique, Alan Turing ouvre un nouveau champ en 1950 dans la revue de philosophie *Mind*. Son texte commence sobrement par : *« Je propose de considérer la question : les machines peuvent-elles penser ? »* Sa réponse est, cette fois, plutôt oui. Il propose une manière opérationnelle de s'attaquer à cette question, sous forme d'un jeu resté célèbre, le jeu de l'imitation ou « test de Turing ». Dans une version simplifiée, un interrogateur pose des questions à deux interlocuteurs sans savoir s'ils sont des hommes ou des machines. Les réponses étant manuscrites, il doit trouver qui est qui. Soixante ans après ce défi, le Prix Loebner, qui met en compétition chaque année plusieurs machines, a bien déterminé un vainqueur, le « robot » Chip Vivant, mais celui-ci n'a pas trompé les quatre examinateurs lors de la finale du 15 mai dernier. Personne n'a donc encore reçu le prix de 100 000 dollars promis.

Chip Vivant, conçu par l'Américain Mohan Embar, est en fait un agent conversationnel comme on commence à en voir de plus en plus sur le Web ou au téléphone pour répondre automatiquement à nos questions. En général, ils sont bons si l'interlocuteur ne sort pas du domaine d'excellence du robot. Sur le blog de Mohan Embar, une juge le félicite en rappelant que d'autres robots soit l'ont insultée, soit ont essayé de lui faire croire qu'ils étaient un chat, soit ont inversé les rôles en la bombardant de questions pour l'empêcher de poser les siennes. Chip Vivant a beau avoir été plus gentil, il a été démasqué.

En général, la technique consiste à puiser dans de vastes bases de données de réponses et à extraire le bon texte en fonction de plusieurs dizaines de milliers de règles logiques. La force brute et de grandes capacités de mémoire et de logique ont ainsi permis à IBM et son ordinateur Watson de gagner à un jeu télévisé aux États-Unis en 2011.

« Turing est une figure importante de l'intelligence artificielle. Passer de l'idée d'un calculateur à la réalisation d'interactions entre homme et machine est très visionnaire », constate Nicolas Sabouret, du Laboratoire d'informatique de Paris-VI. *« Il y a une continuité entre son article de 1937 et celui de* Mind. *Il s'agit de fixer des limites et de travailler à repousser les limites de ce qui est faisable dans ce cadre »*, rappelle Jean Lassègue. Beaucoup de laboratoires cherchent donc à aller encore plus loin dans l'imitation de l'homme par les machines, même s'ils n'ont pas réussi à passer le fameux « test ».

« Il ne faut pas oublier que l'intelligence n'est pas que dans le cerveau ! », provoque Jean Lassègue. *« Nous cherchons par exemple à prendre en compte l'interaction non verbale, comme les émotions. Ces dernières jouent un rôle social très important »*, précise Nicolas Sabouret, dont l'un des objectifs est de proposer un entraînement aux entretiens d'embauche en faisant dialoguer un chômeur avec un ordinateur. Jean Lassègue poursuit : *« En réalité, Turing défend là aussi deux projets. D'une part, le rêve d'une mécanisation de la pensée, processus déterministe et prédictif, et, d'autre part, celui d'une pensée vue au contraire comme un processus non prédictif et irréversible. »*

Turing n'a donc pas seulement été le premier à imaginer la possibilité, pour une machine, de simuler un esprit humain détaché de son corps matériel, il aurait aussi ouvert la voie à ceux qui aujourd'hui, en robotique, tiennent compte d'un ensemble de facteurs « extérieurs », émotions, expressions du visage, stimuli environnementaux…

POURQUOI CET ARTICLE ?

Alan Turing aurait eu 100 ans en 2012. Les travaux de ce génial mathématicien sont à l'origine de nombreuses découvertes essentielles dans plusieurs domaines scientifiques : l'informatique, l'intelligence artificielle et la biologie. Cet article revient sur le parcours intellectuel de cet homme, beaucoup plus cohérent qu'on ne pourrait le penser à première vue.

Le secret des formes de la nature

Dernier article de la vingtaine publiée en moins de vingt ans de carrière, celui intitulé « Les bases chimiques de la morphogénèse », paru en 1952, n'est pas le moins important. Il se propose d'étudier l'apparition de formes et de structures dans un système à partir d'un matériau homogène.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Comment les taches viennent au léopard ? Pourquoi les graines de tournesol s'organisent-elles en spirale au centre de la fleur ? Et, plus précisément, comment l'hydre d'eau douce se multiplie-t-elle à partir de sa scission en deux ou trois morceaux ?

A priori, quoi de plus naturel pour un spécialiste des codes secrets que de s'attaquer au défi du code de la nature, surtout en pleine émergence de la génétique ? Pourtant, selon Jean Lassègue, l'attirance pour ce problème n'a rien à voir avec l'ADN. *« Cela s'inscrit dans la continuité de ses articles de 1936 ou de 1950. Une fois encore, il s'agit de s'interroger sur les limites du déterminisme »*, rappelle le philosophe. Il est vrai que dans la nature le déterminisme prédictif est l'exception et pas la règle. Les sarabandes ondulantes des nuées d'étourneaux, l'architecture complexe des termitières ou les circonvolutions du cerveau ne se déduisent pas d'un jeu d'équations simples à résoudre.

Alan Turing imagine donc un modèle simple qui lui permet de mettre en équations l'apparition de ces formes à partir d'une situation banale. Deux molécules dites morphogènes sont mélangées. L'une est activatrice et l'autre inhibitrice. L'augmentation de la concentration de l'une contrarie celle de l'autre, ce qui contraint le système à osciller. En outre, ces molécules diffusent dans la solution. En mélangeant mathématiquement tous ces ingrédients, Turing montre que des structures ordonnées apparaissent ! Quelques taches noires se dessinent sur une feuille blanche. De là partiront les tentacules de l'hydre.

Depuis, des chimistes ont trouvé effectivement des réactions obéissant à ces règles créant, au milieu de la solution, des anneaux, des taches, des zébrures… Des biologistes, dans les années 1980, ont aussi identifié des morphogènes dans le développement de l'embryon, comme le rappelle John Reinitz, de l'université de Chicago, qui a résumé ce travail dans un numéro spécial de la revue *Nature* consacré à Alan Turing le 23 février.

Enfin, ces dernières années, grâce aux progrès de l'imagerie, notamment, des chercheurs réalisent qu'au niveau même des cellules il faut tenir compte non seulement des gènes mais aussi des différentes formes de la matière et de son environnement pour décrire la géométrie des tissus (*Le Monde* du 24 décembre 2011). Ces situations sont loin de se réduire à deux seules entités en présence, mais la philosophie du chercheur anglais est bien celle qui sous-tend ces travaux.

L'article d'Alan Turing publié par l'Académie royale des sciences fait aussi date pour une autre raison. Il contient la première simulation numérique d'un phénomène de la nature, selon John Reinitz. Une technique largement utilisée et développée depuis lors grâce… aux ordinateurs. La boucle est bouclée sur un parcours des plus cohérents qui a fait naître des branches toujours vertes et foisonnantes. ●

David Larousserie, dans *Le Monde Science & techno* daté du 23.06.2012

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'algorithme qui comprend les contes pour enfants

Intelligence artificielle – Les équipes de Facebook ont franchi une nouvelle étape dans l'analyse automatique des textes.

Lisez attentivement les phrases suivantes : « Jean va au bureau. » « Marie se dirige vers la salle de bains. » Maintenant, répondez à la question (sans relire ce qui précède) : où est Jean ? Un enfant de 3 ans répondrait. Pas un ordinateur. Sauf à suivre les directives d'une équipe du laboratoire de recherche de Facebook en intelligence artificielle, dirigée par le Français Yann LeCun. Elle vient de mettre en ligne sa solution, qu'elle présentera à un congrès international en avril.

L'algorithme comprend les textes, se souvient des informations lues et raisonne pour répondre. Il est même le meilleur dans deux exercices construits il y a peu, toujours par l'équipe de Facebook : le test bAbI (jeu de mots avec bébé et intelligence artificielle, abrégée AI) et le test du conte pour enfants.

Ces exercices fournissent des phrases au logiciel, puis lui posent des questions pour tester sa capacité de mémorisation et de raisonnement. Evidemment, le système n'a pas connaissance de la question avant de lire le texte et il n'a pas le droit de revenir sur le texte pour répondre.

Le test bAbI comporte vingt tâches allant de celle présentée en introduction à des questions plus difficiles, faisant appel à plus d'informations, de l'énumération, du repérage dans l'espace… Par exemple : « La cuisine est au nord du couloir. » « Le salon est à l'est du couloir. » Comment aller de la cuisine au salon ? Ou bien : « Le ballon rentre dans la valise. » « La valise rentre dans le placard. » « La boîte de chocolats est plus petite que le ballon. » La boîte rentre-t-elle dans la valise ?

Le test du conte pour enfants consiste à lire une vingtaine de phrases extraites de la littérature (*Le Livre de la jungle*, *Alice au pays des merveilles*…), puis à demander de compléter une phrase à trous (avec dix propositions).

L'algorithme est le seul à avoir réussi un sans-faute au test bAbI et s'est montré le meilleur dans la compréhension des contes. *« Cette nouvelle méthode fonctionne mieux sur ces tests que les précédentes, alors que celles-ci avaient accès à la question avant d'avoir l'histoire »*, explique Antoine Bordes, coauteur de l'article déjà en ligne. Sans surprise, ces spécialistes des techniques d'apprentissage automatique et des réseaux de neurones artificiels utilisent ces outils qui brillent depuis 2012 dans la reconnaissance d'images, de la parole ou dans la traduction automatique.

Un réseau de neurones fonctionne comme une formule à plusieurs variables, qui prend un objet en entrée (par exemple une image) et lui associe une étiquette en sortie (« chien », « chat »…). Les paramètres sont ajustés par entraînement sur de vastes banques de données, jusqu'à trouver les valeurs satisfaisantes. Ici, 10 000 textes sont utilisés.

Mais faire aussi bien qu'un bambin n'est pas le but recherché. L'ambition est plus élevée, comme les chercheurs l'écrivent dans leur article. *« L'essence de l'intelligence est la capacité à prédire. Un agent intelligent doit être capable de prédire des faits inobservés à partir de ses perceptions (visuelles, auditives…), combinées à sa connaissance du passé. »* Par exemple, deviner que le sol va être mouillé si un verre tombe d'une table.

Avant de réaliser ce rêve encore inaccessible, il faut au moins disposer de cette connaissance du passé, ce que les chercheurs appellent « l'état du monde », c'est-à-dire un ensemble d'informations à mémoriser et à mettre à jour en fonction des informations reçues. D'où ce passage par ces textes enfantins, qui montrent que le système est capable de comprendre des informations, de les retenir et d'opérer certaines déductions.

Face à la prolifération actuelle des agents conversationnels (aussi appelés *chatbots*) et autres assistants vocaux, le lecteur pourrait trouver ces résultats fades. Mais en fait, les *chatbots* ne comprennent pas les questions qu'on leur pose. Ils réagissent à des mots-clés, puis suivent des arbres de décision préprogrammés pour choisir leur réponse. Un *chatbot* spécialisé dans les questions sur le voyage ne sera d'aucune utilité pour recommander un restaurant… *« Ce que l'équipe de Facebook a réalisé est intéressant. Pour l'instant, les machines n'ont pas de notion de la réalité du monde. Elles ne comprennent pas les contextes dans un texte. Nous avons là un premier pas dans cette direction. Cela rapproche de l'intelligence artificielle au sens d'Alan Turing »*, estime Benoît Sagot, spécialiste du traitement du langage automatique à l'Institut national de recherche en informatique et en automatique (Inria).

À l'avenir, les chercheurs devront relever un double défi. D'abord, corriger les

POURQUOI CET ARTICLE ?

La quantité de données collectées (Big data) est de plus en plus grande, il devient donc urgent d'analyser des ensembles de textes. Il s'agit de la technique du *text mining* qui est un processus d'extraction de connaissances exploitables dans des documents en utilisant le *machine learning* (l'apprentissage par lui-même en utilisant les données collectées) et une approche statistique (nombre d'occurrences d'un terme par exemple). Chez Microsoft, beaucoup de journalistes vont ainsi être remplacés par ces logiciels.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

défauts classiques de l'apprentissage, à savoir les besoins importants en données. Quand l'on ne soumet que 1 000 textes à l'algorithme, ses performances chutent dramatiquement. Ensuite, il faudra s'attaquer au deuxième volet : la prédiction. En 2016, deux équipes de Facebook avaient, pour l'une, réussi à prévoir – comme un enfant ! – comment empiler des cubes en bois, et l'autre, à finir des séquences vidéo. Combiner ces deux compétences sera-t-il un jeu d'enfant ?

David Larousserie, dans *Le Monde Science & médecine* daté du 01.03.2017

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

LES CORRIGÉS






© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'atmosphère terrestre et la vie

Corrigé

1. Le document montre qu'en haut de l'atmosphère, le flux solaire « contient » toutes les longueurs d'onde des UV-B, de 280 à 320 nm. Ce flux solaire en haut de l'atmosphère est le flux « initial », non modifié par l'atmosphère. En revanche, à 30 km d'altitude, ce flux est modifié, les UV-B sont d'autant moins présents dans le flux solaire que leur longueur d'onde est faible. Et en surface, les UV-B de faible longueur d'onde (280-290 nm) sont absents du flux solaire, ceux de longueur d'onde intermédiaire (290-310 nm) ne sont plus très présents (diminution de l'ordre de 10^6 à 10^2 donc 1 million à cent fois moins) et ceux de faible longueur d'onde (310-320 nm) sont diminués d'un facteur dix.

2. Les UV-B sont absorbés par l'atmosphère entre son sommet et sa base (la surface) et notamment par la couche d'ozone présente dans la stratosphère entre 20 et 40 km. En effet, les UV-B sont absorbés par la molécule d'ozone O_3 et la photodissocient en une molécule de dioxygène O_2 et un atome d'oxygène libre, et ce d'autant plus qu'ils sont de longueur d'onde faible et donc d'énergie plus grande.

3. Le document montre que la molécule d'ADN absorbe certains rayons UV-B mais pas tous. Elle absorbe principalement ceux de longueur d'onde faible, mais elle est pour ainsi dire « transparente » pour les UV-B de grande longueur d'onde (310-320 nm).

4. Une couche d'ozone plus ténue absorberait moins de rayons UV et notamment moins d'UV énergétiques de faible longueur d'onde. La courbe rouge est donc une version « décalée » de la courbe de surface vers moins d'absorption des UV, notamment en ce qui concerne les UV de faible longueur d'onde qui parviendraient donc plus à la surface. Or, ce sont précisément ceux-ci qui sont le plus absorbés par l'ADN comme le montre le document 2. C'est donc ceux-ci qui sont le plus susceptibles de causer des mutations chez les êtres vivants !

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

La complexité du système climatique

Corrigé

1. Les températures d'équilibre présentées dans le tableau sont logiques. On prend la Terre comme point de référence :
– La Lune a une température d'équilibre légèrement plus basse (–4 °C par rapport à la Terre). En effet, bien qu'à la même distance du Soleil que la Terre, son albédo et sa surface sont plus faibles : elle absorbe moins de lumière du Soleil qui l'échauffe donc moins.
– Vénus a une température d'équilibre nettement plus basse (–22 °C par rapport à la Terre). Cela peut sembler étonnant dans un premier temps, car elle est située plus près du Soleil et a une surface juste un peu plus petite. Mais son albédo est très élevé : comme Vénus réfléchit 65 % de la lumière qui lui parvient, sa température d'équilibre est basse.
– Mars a une température d'équilibre nettement plus basse (–44 °C par rapport à la Terre). En effet, bien que son albédo soit bas et qu'il absorbe bien la lumière, sa surface est faible et surtout, Mars est beaucoup plus éloigné du Soleil.

2. La Terre et surtout Vénus sont en réalité plus chaudes que leur température d'équilibre, avec, respectivement +34 °C et un énorme +503 °C. La température réelle de la Lune, quant à elle, est la même que sa température d'équilibre, alors que celle de Mars est juste d'un dixième de degré plus élevée.

3. Tout d'abord, la présence ou non d'une vraie atmosphère est le premier facteur explicatif. Celle-ci est à l'origine d'un effet de serre qui entraîne un réchauffement du corps. La Lune n'ayant pas d'atmosphère, elle n'est pas réchauffée, et celle de Mars étant très ténue, la planète l'est à peine.
D'autre part, la différence extrêmement importante entre la Terre et Vénus provient de la teneur différente de leur atmosphère en CO_2, un gaz à effet de serre. Celle de Vénus étant essentiellement composée de ce gaz (et beaucoup plus dense), son effet de serre est colossal, bien plus important que sur Terre.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le climat du futur

Corrigé

1. *Attention au risque de confusion puisque, sur ce document, on a uniquement des chiffres négatifs !*
Le delta O 18 des précipitations à l'origine de la glace augmente avec la température de façon linéaire (on a une droite). On observe qu'à une température de –40 °C, le $\delta^{18}O$ est d'environ –40 ‰, alors qu'à –20 °C, il n'est que de –29 ‰ environ.
2. De –120 000 à –11 000 ans, le delta O 18 est d'environ –39 à –40 ‰ dans la glace du Groenland. Puis, à partir de –11 000 ans, sa valeur tourne autour de –36 à –37 ‰. Sur ce genre de graphique, il faut ignorer toutes les petites oscillations et essayer de distinguer une valeur globale moyenne sur une certaine période de temps.
3. On déduit des réponses précédentes que la température au Groenland était d'environ –40 ‰ de –120 000 à –11 000 ans. Puis, de –11 000 ans à aujourd'hui, la température était et est encore de –30 °C environ, soit 10 °C de plus. Ces températures sont bien évidemment très basses (nous sommes au Groenland tout de même) mais leurs valeurs relatives sont un reflet de la variation de la température globale sur Terre au cours des 120 000 dernières années. Il y a donc eu une période froide, à l'origine d'une glaciation en Europe, de –120 000 à –11 000 ans. Elle a ensuite été suivie d'une période plus chaude, un interglaciaire, avec une température moyenne globale supérieure de 10 °C, qui se poursuit à l'heure actuelle.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Énergie, choix de développement et futur climatique

Corrigé

Mini introduction, rappel de la problématique

On rappelle ici en quelques lignes que l'on va chercher :

- dans un premier temps, à présenter l'origine des particules fines et à expliquer leur impact sur la santé ;
- dans un second temps, à proposer des pistes pour limiter cette pollution.

Réponse à la première partie de la problématique

Dans cette partie, on commence par présenter ce que sont les particules fines, puis leur origine et enfin, on conclut sur leurs effets sur la santé.

D'après les documents présentés, les particules fines sont des particules de très petite taille. Deux catégories sont spécialement surveillées, comme l'indique le document 1 : les particules de taille inférieure à 10 micromètres (PM10) et 2,5 micromètres (PM2,5).

Les documents 1 et 2 nous montrent qu'elles ont principalement pour origine la combustion de carburants fossiles et de bois pour le chauffage, les transports, l'industrie, mais aussi des pratiques agricoles comme l'épandage d'engrais. Certaines particules, les particules primaires, sont directement issues de ces activités : elles sont composées de matière organique mal brûlée et de matière minérale. D'autres particules, les particules secondaires, ne sont pas émises directement mais se forment par condensation de gaz, eux aussi principalement issus de combustions, et sont surtout constituées de composés azotés et soufrés (ammoniac, sulfates, nitrates).

Les conséquences sanitaires de cette pollution sont importantes. Très petites, les particules pénètrent dans les poumons jusqu'aux alvéoles pulmonaires et causent logiquement des maladies respiratoires : bronchites, asthme, cancers des poumons. Le document 1 nous apprend aussi qu'elles peuvent même passer dans la circulation sanguine et provoquer d'autres maladies, plus liées au système circulatoire cette fois, comme des accidents vasculaires cérébraux, des infarctus ou des troubles pendant la grossesse (les « problèmes placentaires »).

Limiter l'exposition à ces particules est donc un enjeu important de santé publique.

Réponse à la seconde partie de la problématique

Cette partie ne repose plus vraiment sur les documents mais fait appel à vos capacités de réflexion, votre connaissance du cours et votre culture générale. Ce genre de questions qui demande de suggérer des solutions peut être présent, surtout sur les thèmes liés à la santé et à l'environnement.

On voit grâce aux documents que les secteurs qui produisent le plus de particules fines sont l'industrie, le chauffage des habitations, l'agriculture et les transports. Beaucoup de ces particules sont produites directement ou indirectement par des combustions.

Un premier moyen de limiter ces émissions serait donc d'encourager une diminution de la consommation de carburants et de combustibles. Dans l'industrie et le chauffage des particuliers, on pourrait encourager à plus d'économies d'énergie, et donc d'argent. Dans les transports, on pourrait inciter à utiliser davantage les transports en commun pour diminuer le recours au véhicule particulier.

Un second moyen serait d'encourager la transition vers des pratiques moins polluantes. On favoriserait donc l'utilisation de ressources moins émissives, si possible moins basées sur des combustions ou alors basées sur des combustions de meilleur rendement, ce qui limiterait les rejets. Par exemple, les poêles à bois récents et bien réglés produisent beaucoup moins de particules que les anciens, en plus d'avoir un rendement, et donc un coût en combustible, bien meilleur. On pourrait également imposer la pose de filtres à particules sur tous les appareils récents.

Résumé rapide des réponses apportées

En résumé, la pollution aux particules fines est un problème toujours d'actualité. Celles-ci sont produites par nos activités et entraînent de nombreuses maladies et morts prématurées. Afin de réduire les émissions, il faudrait diminuer notre dépendance à l'utilisation de combustibles, fossiles ou non, et améliorer le rendement énergétique des appareils et procédés qui en consomment.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le futur des énergies : histoire, enjeux et débats

Corrigé

1. Le magnétisme correspond à l'étude de matériaux particuliers agissant comme des aimants : ils s'attirent ou se repoussent selon les pôles face à face, mais attirent toujours certains corps comme le fer.
2. Le phénomène électrostatique concerne l'attraction ou la répulsion entre deux objets chargés. Le phénomène magnétique concerne l'attraction ou la répulsion entre des aimants, ou entre des aimants et d'autres objets, en fer par exemple.
Dans les deux cas (phénomène électrostatique et phénomène magnétique), il peut y avoir attraction ou répulsion, mais leur cause est de nature différente : un corps chargé dans un cas, un aimant dans l'autre.
3. Avec l'expérience d'Œrsted, on se rend compte qu'un courant électrique produit un champ magnétique qui fait dévier l'aiguille de la boussole.
4. L'expérience d'Œrsted associe le courant électrique (et l'électricité d'une façon plus générale) au magnétisme. Avant cette découverte, les phénomènes liés à l'électricité et au magnétisme étaient séparés, tant dans leur explication que dans leur utilisation.
5. Les aimants et le champ terrestre sont connus depuis l'Antiquité, mais Œrsted met en évidence qu'un fil parcouru par un courant se comporte comme un aimant, puisqu'il peut faire dévier l'aiguille aimantée.
6. Pour Ampère, tous les phénomènes magnétiques sont en réalité des effets purement électriques.
7. Maxwell reprend l'expérience d'Œrsted et l'interprète.
8. Lors de son observation, Œrsted veut montrer qu'il y a un lien entre la chaleur dégagée par un fil chauffé par un courant, et un aimant. Mais il découvre que la chaleur n'y est pour rien : il s'agit seulement du courant électrique lui-même, qui influe sur la boussole.
9. Maxwell observe qu'un aimant tend à prendre une direction perpendiculaire au fil électrique parcouru par un courant. Il en déduit qu'il existe un champ magnétique tout autour du fil parcouru par le courant.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Deux siècles d'énergie électrique

Corrigé

1. Un conducteur électrique est un matériau laissant passer le courant électrique : pour cela, il possède des électrons libres. À l'inverse, un isolant est un matériau qui ne laisse pas passer le courant électrique : il ne possède pas d'électrons libres. Un semi-conducteur est un matériau ayant des propriétés intermédiaires entre le conducteur et l'isolant.

2. La résistivité est la capacité à s'opposer au passage du courant électrique. Plus un matériau est conducteur, plus sa résistivité est faible. À l'inverse, la conductivité est la capacité d'un matériau à laisser passer le courant électrique. Plus un matériau est conducteur, plus sa conductivité est grande.

3. Le document 2 présente le dopage d'un réseau monocristallin d'atomes de silicium. Le dopage consiste à remplacer un atome de silicium par un autre atome, ici du phosphore, afin d'augmenter sa conductivité (puisque le phosphore a un électron de valence en plus par rapport aux atomes de silicium voisins).

4. Par définition, l'intensité du courant de court-circuit I_{cc} est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de la cellule est nulle. Donc $I_{cc} = 12{,}5$ mA.

5. Par définition, la tension à vide U_v est déterminée aux bornes de la cellule lorsque le courant circulant dans le circuit est nul. Donc $U_v = 3{,}0$ V.

6. Les coordonnées du point pour lequel la puissance est maximale sont : $U_{max} = 2{,}6$ V et $P_{max} = 33$ mW.

7. Par définition, $P_{reçue} = E \times S$.
Or $E = 1\,000$ W · m^{-2} et $S = 8{,}9 \times 10^{-5}$ m^2.
Donc $P_{reçue} = 1\,000 \times 8{,}9 \times 10^{-5} = 8{,}9 \times 10^{-2}$ W.

8. La puissance maximale délivrée par la cellule est $P_{max} = 33$ mW. Elle correspond à la puissance utile $P_{utile} = 33 \times 10^{-3}$ W.
Le rendement est donc

$$\eta = \frac{33 \times 10^{-3}}{8{,}9 \times 10^{-2}} = 0{,}37 = 37\ \%$$

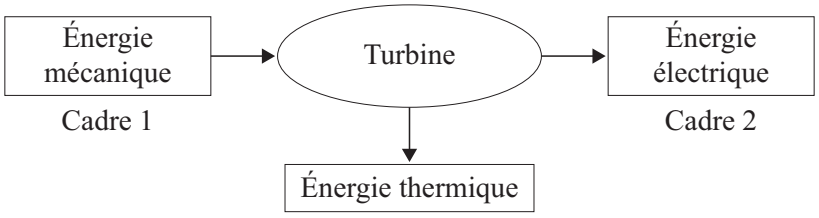
9. Le rendement reste faible (malgré une amélioration due à la triple jonction). En effet, le panneau photovoltaïque ne transforme pas entièrement le spectre d'émission solaire. Une bonne partie du rayonnement est systématiquement perdue en chaleur.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les atouts de l'électricité

Corrigé

1. Il est nécessaire de stocker l'énergie produite par les éoliennes, car il s'agit d'une des formes d'énergie renouvelable. Comme les énergies fossiles et nucléaires sont facilement stockables mais non renouvelables, il est indispensable de trouver comment stocker cette énergie qui est intermittente : cela permettra de pallier cet inconvénient.
2. D'après le document 1, la quantité d'énergie produite par le système des sphères de béton augmente avec la pression exercée par l'eau sur la turbine. Le document 2 indique qu'avec la profondeur, la pression augmente : elle avoisine 70 bar vers 700 m, alors qu'elle est de 110 bar à une profondeur de 1 100 m. L'immersion du système en profondeur permet de produire plus d'énergie : plus la turbine est située profondément, plus l'énergie produite sera grande.
3. La chaîne énergétique de la turbine est :



4. a. Les données de l'énoncé sont :
- Puissance P fournie par une sphère : $P = 5$ MW ;
- Temps t pour remplir une sphère : $t = 4$ heures ;
- Volume V d'eau stockée : $V = 12\,000$ m³.

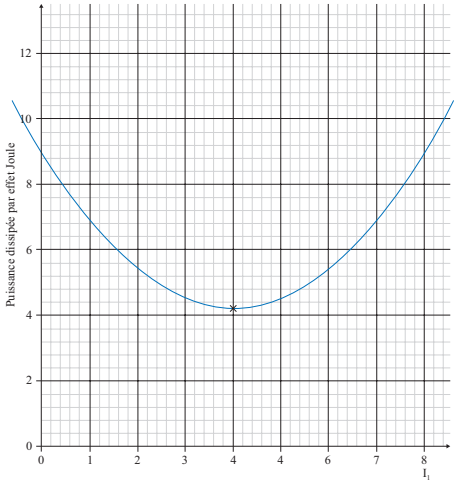
Pour obtenir une énergie en mégawatt-heure, $E = P \times t = 4 \times 5 = 20$ MWh.
4. b. Une sphère produit une énergie d'environ 20 MWh. L'énergie totale stockée pour 100 sphères vaut $100 \times 20 = 2\,000$ MWh.
La ferme Powerpack peut stocker une énergie totale de 129 MWh.
La capacité de stockage des sphères est donc $\frac{2000}{129} = 15$ fois supérieure à celle du parc équipé de batteries lithium-ion, donc elles sont bien plus intéressantes.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

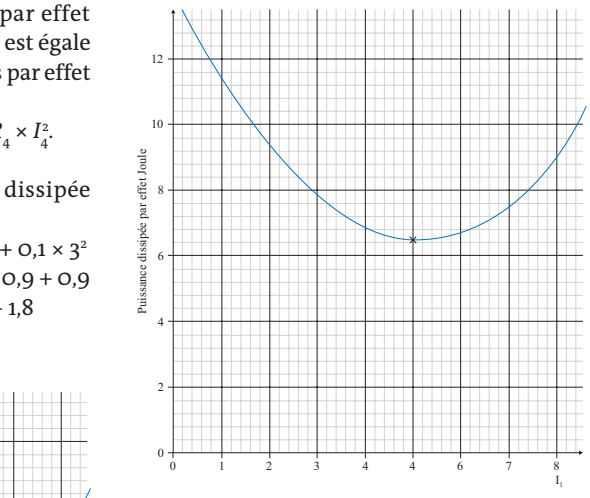
Optimisation du transport de l'énergie

Corrigé

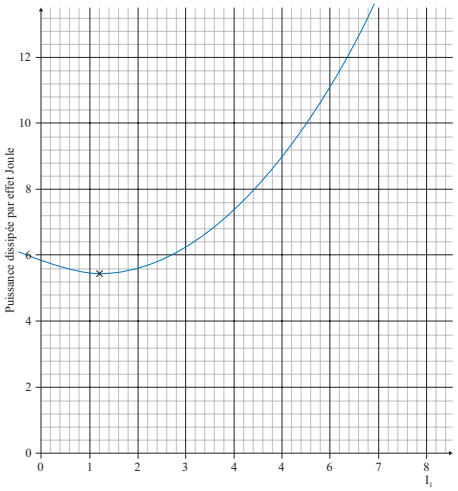
1. a. Les intensités I_1 et I_2 arrivent au nœud, les intensités I_3 et I_4 partent du nœud.
Donc on peut écrire $I_1 + I_2 = I_3 + I_4$.
b. Comme $I_3 + I_4 = K$, d'après l'expression précédente, $I_1 + I_2 = K$. La somme des intensités $I_1 + I_2$ est constante.
c. Chacune des intensités I_1 et I_2 ne peut pas dépasser la valeur maximale délivrée par chacune des sources. On a donc $I_1 \leqslant s_1$ et $I_2 \leqslant s_2$.
d. Comme $I_1 + I_2 = K$,on a $I_2 = K - I_1$. D'où $K - I_1 \leqslant s_2$ et $I_1 \geqslant K - s_2$.
2. a. La puissance totale dissipée par effet Joule par l'ensemble des résistances est égale à la somme des puissances dissipées par effet Joule dans chacune des résistances.
Donc $P_{JT} = R_1 \times I_1^2 + R_2 \times I_2^2 + R_3 \times I_3^2 + R_4 \times I_4^2$.
On a $K = I_3 + I_4 = 6$, d'où $I_2 = 6 - I_1$.
Dans l'expression de la puissance dissipée par effet Joule, on obtient :
$P_{JT} = 0{,}1 \times I_1^2 + 0{,}2 \times (6 - I_1)^2 + 0{,}1 \times 3^2 + 0{,}1 \times 3^2$
$P_{JT} = 0{,}1 \times I_1^2 + 0{,}2 \times (36 - 12 \times I_1 + I_1^2) + 0{,}9 + 0{,}9$
$P_{JT} = 0{,}1 \times I_1^2 + 7{,}2 - 2{,}4 \times I_1 + 0{,}2 \times I_1^2 + 1{,}8$
Donc $P_{JT} = 0{,}3 \times I_1^2 - 2{,}4 \times I_1 + 9$.
b. On obtient la courbe suivante :



Le minimum de la courbe est obtenu pour $I_1 = 4$ A, et $P_{JT} = 4{,}2$ W.
c. Comme $I_2 = 6 - I_1$, on a $I_2 = 6 - 4 = 2$ A.
3. a. On a $K = I_3 + I_4 = 6$, d'où $I_2 = 6 - I_1$.
Dans l'expression de la puissance dissipée par effet Joule, on obtient :
$P_{JT} = 0{,}2 \times I_1^2 + 0{,}05 \times (6 - I_1)^2 + 0{,}2 \times 4^2 + 0{,}2 \times 2^2$
$P_{JT} = 0{,}2 \times I_1^2 + 0{,}05 \times (36 - 12 \times I_1 + I_1^2) + 3{,}2 + 0{,}8$
$P_{JT} = 0{,}2 \times I_1^2 + 1{,}8 - 0{,}6 \times I_1 + 0{,}05 \times I_1^2 + 4$
Donc $P_{JT} = 0{,}25 \times I_1^2 - 0{,}6 \times I_1 + 5{,}8$.
b. On obtient la courbe suivante :



Le minimum de la courbe est obtenu pour $I_1 = 1{,}2$ A, et $P_{JT} = 5{,}6$ W.
c. D'après les contraintes, $I_1 \geqslant K - s_2$.
Donc $I_1 \geqslant 6 - 4$, et $I_1 \geqslant 2$ A. Or le minimum de la puissance dissipée par effet Joule est obtenue pour $I_1 = 1{,}2$ A, donc la puissance dissipée par effet Joule ne pourra jamais être minimale.
4. a. On a $K = I_3 + I_4 = 6$, d'où $I_2 = 6 - I_1$.
Dans l'expression de la puissance dissipée par effet Joule, on obtient :
$P_{JT} = 0{,}05 \times I_1^2 + 0{,}25 \times (6 - I_1)^2 + 0{,}25 \times 4^2 + 0{,}25 \times 2^2$
$P_{JT} = 0{,}05 \times I_1^2 + 0{,}25 \times (36 - 12 \times I_1 + I_1^2) + 4 + 1$
$P_{JT} = 0{,}05 \times I_1^2 + 9 - 3 \times I_1 + 0{,}25 \times I_1^2 + 5$
Donc $P_{JT} = 0{,}3 \times I_1^2 - 3 \times I_1 + 14$.
b. On obtient la courbe suivante :



Le minimum de la courbe est obtenu pour $I_1 = 5$ A, et $P_{JT} = 6{,}5$ W.
c. D'après les contraintes, $I_1 \leqslant s_1$. Donc $I_1 \leqslant 4{,}5$ A. Or le minimum de la puissance dissipée par effet Joule est obtenue pour $I_1 = 5$ A, donc la puissance dissipée par effet Joule ne pourra jamais être minimale.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Diversité génétique chez le diable de Tasmanie et vulnérabilité aux maladies

Corrigé

Introduction et rappel de la problématique

On rappelle ici en quelques lignes qu'on va chercher à :

- expliquer comment on peut suivre l'évolution de la population des diables de Tasmanie ;
- proposer une explication au déclin de cette population en étudiant sa diversité génétique.

Exploitation du document 1

Le document montre un déclin extrêmement important des populations de diables de Tasmanie entre 2001 et 2011 : on passe d'un effectif de plus de 0,7 UA (unités arbitraires) à presque 0 UA en 2011. Cela montre que l'on n'a pas voulu indiquer la véritable unité employée, jugée trop compliquée. C'est assez courant dans les études de documents et cela ne doit pas vous effrayer.

En plus de l'exploitation du document, il faut montrer ses connaissances. En effet, ce document assez simple est en réalité un « appel du pied » pour montrer sa maîtrise du cours. Il faut donc exposer ce que vous avez retenu des méthodes d'évaluation de l'abondance des populations et notamment de la méthode de capture-marquage-recapture.

Vous répondez ainsi à la première problématique.

Exploitation du document 2

Ici, on a plus affaire à une authentique étude de document. On commence par présenter les données :

- On étudie la séquence d'un gène impliqué dans la défense immunitaire. Pour différents triplets de nucléotides, on nous indique le nombre de mutations chez trois espèces : l'être humain, le lion asiatique et le diable de Tasmanie.
- On observe que le nombre de mutations est systématiquement inférieur chez le diable. Par exemple, en position 70, on observe 5 mutations chez notre espèce, 4 chez le lion et seulement 2 chez le diable.

On analyse ensuite ces données pour répondre à la problématique posée :

- Le faible nombre de mutations traduit une faible diversité génétique chez le diable.
- En raison de cette faible diversité, les globules blancs des diables de Tasmanie parviennent mal à identifier les cellules cancéreuses provenant d'autres diables.

On répond donc ici à la deuxième problématique.

Conclusion, résumé et ouverture

Si l'on a un peu de temps, il peut être bon de résumer rapidement les réponses apportées. Cela montre au correcteur que l'on a bien cerné ce qui était demandé et que l'on a cherché à y répondre clairement. Si on se sent inspiré, on peut même proposer une petite ouverture.

- Des méthodes de suivi des populations comme celle de capture-marquage-recapture ont permis de montrer un déclin important de la population de diables de Tasmanie.
- Ce déclin est dû à un cancer transmissible contre lequel le système immunitaire des diables ne peut pas lutter en raison de leur faible diversité génétique.
- Cela montre qu'une baisse de la diversité génétique à l'échelle d'une population peut entraîner une baisse de la biodiversité à l'échelle d'un écosystème car, ici, une espèce entière est menacée.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les résistances aux insecticides des insectes

Corrigé

1. On observe qu'avant les années 1960, le doryphore n'est initialement presque pas résistant aux insecticides. Puis le nombre de substances auxquelles le doryphore est résistant croît par paliers : au début des années 1960, il est résistant à quelques substances ; en 1970, il l'est à une dizaine ; en 1980 à une vingtaine ; aujourd'hui, on observe pas moins de cinquante substances auxquelles le doryphore est résistant.

2. Le mécanisme à l'œuvre est la sélection naturelle. Initialement, chez le doryphore, la majorité des individus sont sensibles aux insecticides. Toutefois, la variabilité génétique due aux mutations fait que, parmi ces insectes, il existera aussi des insectes dotés de caractéristiques leur conférant une résistance. Quand on introduit dans leur environnement un insecticide, les résistants ont un avantage sur les sensibles et se reproduisent mieux. En quelques générations, les populations de doryphores sont très majoritairement constituées de résistants. Puis, pour lutter contre ces doryphores résistants, l'homme utilise un nouvel insecticide. Mais, par le même mécanisme, en quelques générations, la majorité des doryphores sont devenus résistants à ce nouvel insecticide. À l'heure actuelle, il existe chez le doryphore des résistances à toutes les familles d'insecticides existantes.

3. Le mécanisme de résistance présenté (il y en a d'autres) est celui de la synthèse d'une estérase. Cette enzyme est tout simplement capable de dégrader les molécules d'insecticides, les empêchant ainsi de produire un effet, en l'occurrence ici, une paralysie mortelle. En effet, dans toutes les populations, il existe naturellement des moustiques mutants qui surexpriment l'estérase. C'est ordinairement un handicap, mais ça devient un avantage en présence d'insecticide.

4. Le « coût de la résistance » est le fait que produire des molécules conférant une résistance à un insecticide se fait au détriment de la production d'autres molécules. Et donc, dans un milieu « normal », sans insecticides, les insectes sensibles survivent et se reproduisent mieux que les résistants.
Pour lutter contre les résistances aux insecticides il faut donc… arrêter de les utiliser. Dans ce cas, les insectes sensibles supplanteront rapidement les résistants par sélection naturelle. Si l'on veut rester réaliste, pour limiter les résistances, il faudrait encourager un usage raisonné des insecticides, avec des applications plus précises, plus limitées dans le temps et dans l'espace. De la théorie à la pratique, il y a cependant un abîme.

REMARQUE TERMINOLOGIQUE

Quand on dit « le doryphore est résistant », on ne parle évidemment pas d'un seul doryphore. On parle de l'espèce dans son ensemble, chez laquelle on observe des populations plus ou moins résistantes. Donc quand on dit « le doryphore résiste à 10 substances », il faut comprendre : « on a observé des populations de doryphores résistantes à 10 substances », même si ce n'est pas forcément à ces 10 substances à la fois.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

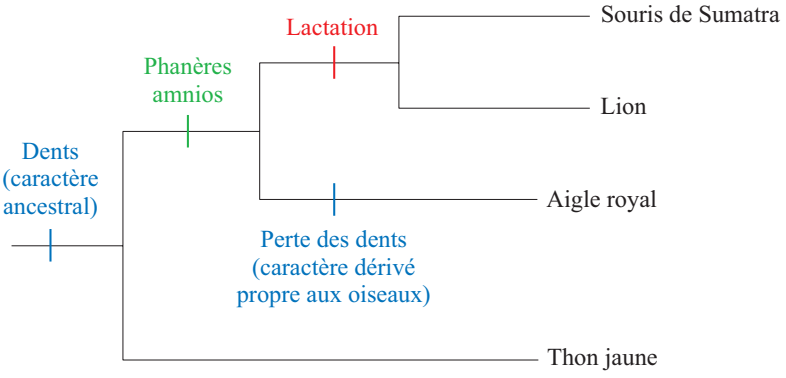
Construction d'un arbre phylogénétique

Corrigé

1. Les analogies sont des ressemblances qui proviennent généralement d'un mode de vie semblable, par convergence évolutive : elles ne permettent pas d'établir une parenté. Les homologies sont les ressemblances héritées d'un ancêtre commun : ce sont elles qu'il faut utiliser. Ici, le régime alimentaire carnivore est une analogie. En effet, un thon, un lion et un aigle sont tous les trois des prédateurs, mais cela ne veut pas dire qu'ils descendent tous les trois d'un ancêtre prédateur : ils sont trop différents par ailleurs.

2. Pour établir un arbre phylogénétique, certaines homologies ne sont pas intéressantes. C'est le cas de celles apparues chez un ancêtre commun à toutes les espèces étudiées : les caractères ancestraux. En effet, si une homologie est présente chez tous, elle ne nous renseigne pas sur une parenté pour ces espèces-là. Elle deviendrait pertinente si on ajoutait à notre arbre une autre espèce ne la possédant pas. Les homologies qui ne sont présentes que chez certaines espèces sont celles qu'il faut conserver : ce sont les caractères dérivés.
Ici, toutes les espèces étudiées ont un squelette osseux, c'est un caractère ancestral qui ne nous est pas utile.

3. Établir l'arbre est ensuite assez facile. On risque moins de se tromper si on commence par essayer de déterminer les deux espèces les plus apparentées. Ici, un seul de tous les caractères présentés n'est présent que chez deux espèces : la production de lait n'existe que chez la souris de Sumatra et le lion. On les regroupe donc.
Ensuite, c'est un peu plus délicat, car plusieurs critères sont partagés par trois espèces. En effet, la souris, le lion et le thon ont des dents. D'un autre côté, la souris, le lion et l'aigle ont un amnios et des phanères. En théorie, cela devrait laisser un doute mais dans le cadre d'un exercice modeste comme celui-ci, le fait que la souris, le lion et l'aigle partagent deux caractères au lieu d'un est là pour vous indiquer la bonne réponse. En fait, l'absence de dents chez l'aigle est un caractère propre aux oiseaux : il s'agit d'une perte qui est un caractère dérivé de ce groupe.
Bien évidemment, pour les scientifiques, trouver le « bon » arbre phylogénétique est bien plus ardu (ils comparent beaucoup plus d'espèces dont la parenté est beaucoup moins facile à établir) et d'ailleurs, dans de nombreux cas, on obtient plusieurs arbres dont certains sont plus probables que d'autres.
On obtient donc l'arbre phylogénétique suivant :

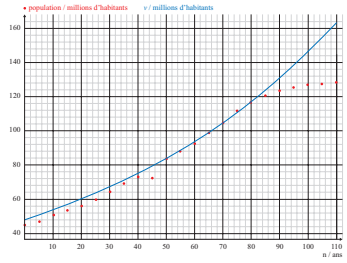


© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les modèles démographiques

Corrigé

1. La représentation graphique du tableau à la calculatrice donne le nuage de points suivant :



2. La baisse de la population entre 1940 et 1945 est due à la Seconde Guerre mondiale.

3. La suite (v_N) est une suite géométrique de premier terme $v_0 = 83{,}6$ et telle que $v_{30} = 116{,}8$.

a. Les suites géométriques de raison q vérifient la relation suivante : $v_N = v_0 \times q^N$. On a donc $v_N = 83{,}6 \times q^N$.

b. On a $v_{30} = 83{,}6 \times q^{30} = 116{,}8$. Donc

$$q^{30} = \frac{116{,}8}{83{,}6} = 1{,}3971$$

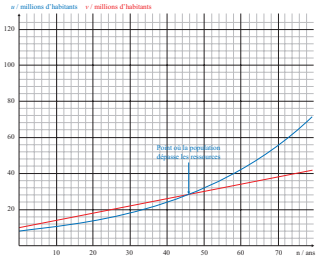
Par analogie avec l'obtention de la racine douzième de 2 introduite en classe de Première pour construire la gamme tempérée, on peut également calculer la racine trentième de la raison de la suite.

On a alors $q = \sqrt[30]{1{,}3971} = 1{,}3971^{\frac{1}{30}} \approx 1{,}0112$.

c. 1973 correspond au rang 23 de la suite géométrique. On a alors $v_{23} = 83{,}6 \times 1{,}0112^{23} \approx 108$. Donc on peut estimer la population du Japon en 1973 108 millions d'habitants.

d. Avec le changement de variable, on a $w_n = v_N = v_{n-50} = 83{,}6 \times 1{,}0112^{n-50}$.

e. On obtient alors la courbe suivante :



4. En 1980, le modèle de la suite géométrique est concordant avec la population réelle du Japon. En revanche, à partir de cette date-là, le modèle s'éloigne de la réalité : on ne peut pas l'utiliser pour estimer la population du Japon.

5. Le modèle utilisé estime très bien la population de 1950 à 1980. Avant 1950, même s'il est proche, il ne correspond pas à la population. Après 1980, il s'éloigne de plus en plus de la réalité.

6. On note que la population du Japon tend vers une limite autour de 130 millions d'habitants. Cette limite constitue le seuil défini par Pierre-François Verhulst.

7. À partir de 1980, comme l'évolution de la population se fait moins vite, voire à tendance à tendre vers un seuil, l'écart entre la population réelle du Japon et le modèle augmente de plus en plus : on peut alors parler de croissance qui décélère.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

L'intelligence artificielle

Corrigé

1. Pour 82 % des femmes ayant un cancer du sein, donc considérées comme malades, la mammographie détecte une anomalie. La sensibilité du test est donc 82 %. La spécificité correspond à la probabilité que l'on détecte une anomalie à une personne non malade. L'énoncé donne le pourcentage que l'on détecte une anomalie à une personne non malade : il s'agit de calculer le complément à 100 %, c'est-à-dire 100 – 9 = 91 %.

2. a. Parmi les femmes de 40 ans ayant effectué une mammographie, 1 % ont un cancer du sein. L'échantillon est de 10 000 femmes. Le nombre de personnes atteintes d'un cancer du sein est donc :

$100 \times \frac{82}{100} = 82$ femmes malades.

b. Pour 82 % des femmes ayant un cancer du sein, la mammographie détecte une anomalie. Donc, parmi les 100 femmes atteintes d'un cancer du sein, il y a :

$10\,000 \times \frac{1}{100} = 100$ à qui l'on détecte une anomalie.

c. On sait qu'il y a 100 femmes malades sur les 10 000 de l'échantillon. Il y a donc :
10 000 – 100 = 9 900 non malades.

Pour 9 % des femmes n'ayant pas de cancer du sein, la mammographie détecte une anomalie. Donc parmi les 9 900 femmes non atteintes d'un cancer du sein, il y a :

$9\,900 \times \frac{9}{100} = 891$ femmes à qui l'on ne détecte pas d'anomalie.

d. Le nombre de femmes malades et à qui l'on ne détecte pas d'anomalie est
100 – 82 = 18.
Le nombre de femmes non malades et à qui l'on ne détecte pas d'anomalie est
9 900 – 891 = 9 009.
Le nombre de tests positifs est donc
82 + 891 = 973.
Le nombre de tests négatifs est donc
18 + 9 009 = 9 027.
On a donc :

	Anomalie détectée	Pas d'anomalie détectée	Total
Malades	82	18	100
Non malades	891	9 009	9 900
Total	973	9 027	10 000

3. La probabilité d'être malade pour une personne à qui l'on a détecté une anomalie est :

$\frac{82}{973} = 0{,}084 = 8{,}4\ \%$

4. La VPP correspond à la probabilité d'être malade lorsqu'une anomalie a été détectée. Donc VPP = 8,4 %.
La VPN est la probabilité de ne pas être malade lorsqu'aucune anomalie n'a été détectée. On a donc

$\text{VPN} = \frac{9\,009}{9\,027} = 0{,}998 = 99{,}8\ \%$

5. Sur les 9 027 personnes de l'échantillon à qui l'on ne détecte pas d'anomalies, 18 sont pourtant malades. Si le médecin se base sur l'intelligence artificielle et n'administre donc aucun traitement à ces 18 personnes, cela pose le problème de la responsabilité médicale. Qui serait alors responsable de cette erreur de diagnostic ? Le médecin qui a pourtant suivi les conclusions de l'intelligence artificielle ? le statisticien ayant réalisé l'étude qui a servi à établir ces conclusions ? Beaucoup de questions éthiques se posent autour de l'automatisation des diagnostics médicaux.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

LE GUIDE PRATIQUE






La méthodologie de l'épreuve

Présentation de l'épreuve



L'épreuve pouvant avoir lieu d'avril à juin selon l'organisation locale dans votre établissement, il est assez peu probable qu'un des thèmes n'ait pas été traité en totalité au moment où vous la passerez. Vos professeurs choisiront plusieurs sujets dans la banque de sujets nationale et veilleront à ce que votre examen porte uniquement sur des notions vues en cours.

L'épreuve comprend deux exercices indépendants l'un de l'autre, chacun portant sur un grand thème différent du programme parmi les trois : « science, climat et société », « le futur des énergies » et « une histoire du vivant ». Pour chaque exercice, il faut répondre à environ cinq à dix assez petites questions. Chaque exercice comportera à la fois des questions relevant davantage soit de la physique soit des SVT.

Attention, la forme des questions peut être assez variée. La plupart des questions sont simples et ne demanderont qu'une réponse succincte (mais bien évidemment à justifier rigoureusement). Cependant, il est également possible que la moitié d'un exercice consiste en une seule question de synthèse demandant une réponse plus longue et articulée. Enfin, une partie des questions peut être posée sous forme de QCM. Ces deux dernières modalités sont possibles, mais pas obligatoires : il faut donc faire preuve d'un peu de souplesse et adapter sa réponse en fonction du type de question posée.

Enfin, chaque exercice propose des documents sur lesquels appuyer vos réponses et il faut le plus souvent les exploiter en lien avec vos connaissances. Il est important de bien partir des données des documents pour répondre et d'éviter la tentation de réciter son cours sans rapport réel avec la question posée.

Il est nécessaire de savoir vous servir de votre calculatrice : attention aux parenthèses, aux exposants, à savoir faire un nuage de points, etc.

Comment s'y prendre pendant l'épreuve ?

Conseils généraux pour « minuter » son épreuve

Il est impératif d'avoir une montre, car chaque exercice est globalement calibré pour être fait en une heure. Si vous vous rendez compte que vous êtes en train de passer plus d'une heure sur le premier exercice, il faut passer au second. En effet, le temps passé à essayer d'obtenir encore un point ou deux au premier exercice sera bien mieux utilisé sur le deuxième exercice où dix points sont encore à obtenir. D'une manière générale, il faut essayer de répondre à toutes les questions posées et ne pas rester « bloqué » : une question à laquelle vous n'avez pas eu le temps de répondre ne vous rapportera pas de point ! Surveillez bien votre temps, car les deux heures de l'épreuve passent vite.

Que faire devant son sujet ?

Attaquez un exercice après l'autre, ils sont indépendants. Pour chaque exercice, il faut lire rapidement toutes les questions avant de commencer : les premières questions sont souvent faciles et rapportent donc facilement des points. La plupart des questions sont indépendantes. Le sujet comporte souvent de nombreux documents, mais seuls certains éléments sont importants : pensez à bien les surligner en début d'épreuve pour ne rien oublier. Cette étape doit vous prendre cinq minutes, dix au maximum sur l'heure que vous avez pour l'exercice.

Passez ensuite à la rédaction de vos réponses pour laquelle vous avez environ cinquante minutes.

Évitez de répondre à plusieurs questions en même temps. Pensez au correcteur et indiquez clairement sur votre copie la numérotation des questions, présente sur l'énoncé.

Cas particulier d'une question de synthèse

Une question de synthèse fait la moitié d'un exercice et vous avez donc une demi-heure pour y répondre. Si vous avez l'esprit très synthétique et organisé, vous pouvez

EN BREF…

- Troisième trimestre (entre avril et juin).
- 2 h
- Coefficient : 2,5 pour l'année de terminale
  Nombre de points par exercice : 2 exercices, chacun noté sur 10.
  La calculatrice est autorisée.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

vous risquer à y répondre directement sur votre copie, mais il vaudra souvent mieux passer cinq ou dix minutes à faire un plan au brouillon pour prévoir votre réponse. Celle-ci étant assez longue, vous avez en effet un risque important de devenir confus si vous n'anticipez pas, au moins dans les grandes lignes, les étapes de votre raisonnement et la conclusion à laquelle vous allez aboutir.

Sur la copie, vous devez commencer par rappeler la problématique posée. Puis, exploitez les documents en vous appuyant sur vos connaissances de façon claire et méthodique. Enfin, répondez à la problématique de la manière la plus explicite possible à la fin de votre paragraphe argumenté.

Le planning de révisions

Dès le début de l'année

Apprenez bien votre cours tout au long de l'année, et non avant un devoir ou lors de la semaine de révisions. Concentrez-vous sur les attendus de chaque chapitre. Attention, une lecture superficielle n'apporte rien. Travaillez régulièrement afin de créer des automatismes et résoudre ainsi les exercices de plus en plus facilement. Ne faites pas d'impasses : si vous ne connaissez pas une formule demandée, vous ne pourrez rien faire. Il en va de même pour une connaissance essentielle exigée.

Mettez en fiche ou sous forme de carte mentale votre cours. Faites vos fiches au fur et à mesure en y notant toutes les notions et tous les savoir-faire attendus. Juste avant l'épreuve, vous aurez ainsi votre « banque » de fiches de révisions déjà toute prête.

Refaites les exercices déjà vus en cours dans le temps imparti, même ceux que vous avez bien réussis. Ne regardez pas la correction immédiatement : il faut apprendre à chercher et à produire une réponse pour chaque question, cela vous permettra de voir en quoi votre raisonnement est erroné. C'est en se heurtant aux difficultés que l'on progresse (un peu comme en sport). Éventuellement, notez sur une fiche à conserver toute l'année les erreurs que vous faites régulièrement et essayez d'éviter de les reproduire. Attention à refaire les exercices au fur et à mesure.

Pendant les vacances scolaires

Faites un premier point pendant les vacances de la Toussaint. À ce moment, vous n'avez eu que deux mois de cours. Si vous avez pris du retard dans vos fiches de révisions ou que vous avez du mal avec certaines notions, c'est le moment de rattraper vos lacunes.

Faites un second point pendant les vacances de Noël : elles sont peu propices aux révisions, mais essayez dans la mesure du possible de vérifier à ce moment si vous êtes à jour. En revanche, il sera très important que vous révisiez sérieusement au moment des vacances d'hiver. À ce moment, vous aurez réalisé environ deux thèmes sur les trois présentés ci-dessus. C'est le dernier moment où vous aurez un peu de temps calme pour vous mettre au clair avec vos fiches de révisions et vos reprises d'exercices. En effet, pour toute la fin d'année qui va suivre, vous aurez des épreuves régulièrement, à commencer par celles de spécialité dès la fin mars qui vont grandement vous accaparer. Il est assez vraisemblable que vous ayez les vacances de Pâques pour réviser votre enseignement scientifique, mais, attention, il est aussi possible, en fonction de votre zone de vacances et de votre établissement que votre épreuve ait lieu avant. Ne vous laissez pas surprendre !

Deux semaines avant l'épreuve

Deux semaines avant le début de l'épreuve, c'est le moment de ressortir votre collection de fiches et de faire un ultime point.

Faites-vous un planning de révisions sur les deux semaines à venir. Prévoyez des plages pour réviser chaque grande notion du programme avec une durée indicative.

Essayez de prévoir au moins une session de bac blanc personnelle. Reprenez un sujet fait en début d'année, donnez-vous deux heures et essayez de le faire. Une fois que vous avez fini, regardez la correction et comparez avec ce que vous avez fait. Essayez d'en tirer des leçons pour la véritable épreuve.

L'IMPORTANCE D'UNE BONNE HYGIÈNE DE VIE

Au quotidien, il est important de respecter son rythme veille / sommeil habituel en se couchant et en se levant à des heures régulières : sept nuits consécutives écourtées de deux heures de repos équivalent à une nuit blanche, et une dette de sommeil importante peut avoir les mêmes effets que l'alcool ! Quant à la durée moyenne de sommeil nécessaire, elle est, d'après les spécialistes, d'au moins sept heures pendant les révisions.

L'alimentation joue aussi un rôle primordial : mangez équilibré et dans le calme, préférez les aliments qui apportent de l'énergie (crudités, fruits, légumes, poulet, grillades, œufs durs, féculents) aux sucreries et aux aliments riches en graisses… Voilà autant de facteurs qui favoriseront un état de tranquillité propice aux révisions et à la concentration. À l'inverse, évitez bien sûr de consommer café, tabac et alcool.

Autre atout et pas des moindres pour vaincre le mauvais stress : le sport ! La natation, par exemple, améliore les capacités physiques (respiration, force, etc.) et libère les tensions musculaires. Les effets psychologiques du sport sont également très importants, et c'est justement ce qui peut vous permettre d'atténuer les effets du stress au quotidien. En effet :

- il libère des endorphines (neurotransmetteurs) qui provoquent une sensation de plaisir, voire d'euphorie au-delà d'une heure : un exercice physique, même relativement bref, suscite une sensation de détente et de bien-être ;
- quand les muscles sont sollicités, ils sécrètent de l'adrénaline, l'hormone habituellement responsable du stress. Une pratique sportive régulière permet au corps de s'habituer à cette hormone. Résultat : on devient, sans s'en rendre compte, plus résistant au stress et à l'anxiété dans la vie quotidienne ;
- les endorphines libérées par l'activité physique favorisent le sommeil. Permettant une bonne oxygénation du cerveau, le sport peut contribuer à augmenter l'efficience intellectuelle, ce qui devrait vous être utile !

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Enseignement scientifique : la synthèse du programme



© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.



© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Crédits

Science, climat et société

p. 5, © Rawf8/iStock ; © SeppFriedhuber/iStock ; © Pgiam/iStock ; © majorosl/iStock
p. 11, © Helle Astrid Kjær/Wikimedia
p. 17, © N T Stobbs/Wikimedia

Le futur des énergies

p. 25, © zhongguo/iStock ; © RuudMorijn/iStock ; © Tramino/iStock ; © FreshSplash/iStock
p. 27, © RuudMorijn/iStock

Une histoire du vivant

p. 45, © cinoby/iStock ; © RyersonClark/iStock ; © Nikada/iStock ; © Eva-Katalin/iStock

Les corrigés

p. 77, © Freder/iStock ; © Chunyipo Wong/iStock ; © WDnet/iStock ; © sdecoret/iStock

Le guide pratique

p. 91, © FatCamera/iStock ; © PeopleImages/iStock ; © Steve Debenport/iStock ; © fizkes/iStock
p. 92, © mixetto/iStock

EAN : 9782820811134
© rue des écoles – *Le Monde*, 2020
Éditions rue des écoles – 2 ter rue des Chantiers – 75005 Paris
Achevé d'imprimer en France par Aubin Imprimeur, en septembre 2020
Dépôt légal : octobre 2020



MAIF

assureur militant

MAIF - société d'assurance mutuelle à cotisations variables - CS 90000 - 79038 Niort cedex 9. Entreprise régie par le Code des assurances.

Réviser son bac avec Le Monde

CAHIER SPÉCIAL

16 pages pour se tester avant le bac

Testez-vous pour le bac

ENSEIGNEMENT SCIENTIFIQUE

65 questions

corrigées et commentées

rue des écoles

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Science, climat et société

L'atmosphère terrestre et la vie

Question 1

L'atmosphère actuelle de la Terre est principalement constituée de :

☐ **A.** CO_2 et O_2.
☐ **B.** diazote et dioxygène.
☐ **C.** dioxyde de carbone et de vapeur d'eau.
☐ **D.** O_3 et N_2.

Question 2

La présence d'êtres vivants sur Terre a :

☐ **A.** participé à faire diminuer le taux de CO_2 dans l'atmosphère et y a injecté de l'O_2.
☐ **B.** fait diminuer les taux de CO_2 et N_2 dans l'atmosphère.
☐ **C.** participé à faire augmenter le taux d'O_2 dans l'atmosphère et y a injecté du CO_2.
☐ **D.** fait diminuer les taux d'O_2 et H_2O dans l'atmosphère.

Question 3

L'ozone stratosphérique se forme à la suite de :

☐ **A.** l'action des êtres vivants.
☐ **B.** la photolyse des molécules d'O_2.
☐ **C.** la photolyse des molécules d'O_3.
☐ **D.** l'action humaine.

Question 4

Dans le cycle du carbone :

☐ **A.** l'atmosphère contient la plus grande quantité de carbone, sous forme de CO_2.
☐ **B.** l'atmosphère contient la plus faible quantité de carbone, sous forme de CO_2.
☐ **C.** la lithosphère contient la plus grande quantité de carbone, sous forme de CO_2.
☐ **D.** la lithosphère contient la plus faible quantité de carbone, sous forme de CO_2.

Question 5

À l'heure actuelle, les flux de carbone entre les différentes enveloppes terrestres :

☐ **A.** sont à l'équilibre.
☐ **B.** entraînent un appauvrissement de la teneur en CO_2 de l'atmosphère.
☐ **C.** entraînent un enrichissement de la teneur en CO_2 de l'atmosphère.
☐ **D.** n'ont pas d'impact sur la teneur en CO_2 de l'atmosphère.

La complexité du système climatique

Question 6

Certaines des grandeurs qui caractérisent un climat sont :

☐ **A.** la température, la teneur en CO_2 de l'air, la pression atmosphérique.
☐ **B.** la nébulosité, la vitesse et direction des vents, la teneur en O_2.
☐ **C.** la pression atmosphérique, la pluviométrie, la teneur en N_2 de l'air.
☐ **D.** la température, la teneur en H_2O à l'état gazeux, la vitesse et la direction des vents.

Question 7

La climatologie étudie :

☐ **A.** les variations du climat à une échelle de temps longue (années à millénaires).
☐ **B.** les phénomènes atmosphériques à échelle de temps longue (années à millénaires).
☐ **C.** les variations du climat à une échelle de temps courte (jours, mois).
☐ **D.** les phénomènes atmosphériques à échelle de temps courte (jours, mois).

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 8

L'expression « réchauffement climatique » désigne :

☐ **A.** une élévation de la température d'environ 10 °C au cours du dernier siècle et demi.
☐ **B.** une élévation de la température d'environ 10 °C depuis le XVIe siècle.
☐ **C.** une élévation de la température d'environ 1 °C au cours du dernier siècle et demi.
☐ **D.** une élévation de la température d'environ 1 °C depuis le XVIe siècle.

Question 9

Les principaux gaz à effet de serre sont :

☐ **A.** H_2O, CH_4, N_2O et CO_2.
☐ **B.** méthane, butane et propane.
☐ **C.** H_2O, NH_3, NO_2 et CO_2.
☐ **D.** vapeur d'eau, protoxyde d'azote, dioxyde de soufre et monoxyde de carbone.

Question 10

Parmi les effets amplificateurs du réchauffement climatique, on a :

☐ **A.** la croissance de la surface de la planète recouverte de glace, ce qui fait augmenter l'albédo terrestre.
☐ **B.** la croissance de la surface de la planète recouverte de glace, ce qui fait diminuer l'albédo terrestre.
☐ **C.** la décroissance de la surface de la planète recouverte de glace, ce qui fait augmenter l'albédo terrestre.
☐ **D.** la décroissance de la surface de la planète recouverte de glace, ce qui fait diminuer l'albédo terrestre.

Le climat du futur

Question 11

Le climat et son évolution sont analysés grâce à des modèles climatiques qui sont :

☐ **A.** des modèles analogiques de simulation de l'atmosphère couplés à d'autres modèles décrivant les évolutions des autres enveloppes terrestres.
☐ **B.** des modèles numériques de simulation de l'atmosphère couplés à d'autres modèles décrivant les évolutions des autres enveloppes terrestres.
☐ **C.** des modèles analogiques de simulation de l'atmosphère sans prise en compte de l'évolution des autres enveloppes terrestres.
☐ **D.** des modèles numériques de simulation de l'atmosphère sans prise en compte de l'évolution des autres enveloppes terrestres.

Question 12

Les activités suivantes sont les principales sources de CO_2 d'origine humaine :

☐ **A.** déforestation et agriculture.
☐ **B.** combustion d'hydrocarbures, déforestation et fabrication de ciment.
☐ **C.** synthèse d'hydrocarbures, respiration et élevage.
☐ **D.** élevage, cultures de coton et de maïs.

Question 13

Les activités suivantes sont les principales sources de CH_4 d'origine humaine :

☐ **A.** la chasse et les flatulences bovines.
☐ **B.** la combustion de la tourbe et la destruction des zones humides.
☐ **C.** l'élevage porcin, le non recyclage des plastiques et la culture du riz.
☐ **D.** les fuites de gaz naturel, les ruminants et la fermentation dans les décharges.

Question 14

Les modèles climatiques s'accordent pour prévoir une élévation de la température d'ici à 2100 de :

☐ **A.** 0,5 °C si les émissions de gaz à effet de serre sont limitées.
☐ **B.** 5 °C si les émissions de gaz à effet de serre augmentent encore fortement.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **C.** 0,5 °C si les émissions de gaz à effet de serre augmentent encore fortement.
☐ 5 °C si les émissions de gaz à effet de serre sont limitées.

Question 15

Parmi les conséquences du réchauffement climatique, on peut trouver :

☐ **A.** une diminution de la fréquence des événements climatiques extrêmes.
☐ **B.** une alcalinisation des océans.
☐ **C.** un impact limité sur les écosystèmes marins.
☐ **D.** une élévation du niveau de la mer pouvant atteindre un mètre.

Énergie, choix de développement et futur climatique

Question 16

L'énergie utilisée dans le monde provient principalement à l'heure actuelle :

☐ **A.** de la fission nucléaire.
☐ **B.** de la combustion de la biomasse.
☐ **C.** de sources renouvelables comme le solaire ou l'éolien.
☐ **D.** des combustibles fossiles.

Question 17

L'énergie est principalement consommée dans le monde par :

☐ **A.** l'industrie, les transports et les habitations.
☐ **B.** les secteurs primaires et tertiaires.
☐ **C.** l'industrie et l'agriculture.
☐ **D.** les transports, l'agriculture et la pêche.

Question 18

L'ozone troposphérique est un polluant :

☐ **A.** directement produit par la combustion de carburants fossiles.
☐ **B.** directement produit par les rayons UV artificiels.
☐ **C.** indirectement produit par la combustion des carburants fossiles.
☐ **D.** indirectement produit par les rayons UV artificiels.

Question 19

Les aérosols sont :

☐ **A.** des avions solaires, futur du transport aérien.
☐ **B.** des poussières issues des pneus et des plaquettes de frein des automobiles.
☐ **C.** des bombes de peinture et de désodorisant qui polluent l'air intérieur des maisons.
☐ **D.** de fines particules en suspension dans un gaz.

Question 20

L'empreinte carbone désigne :

☐ **A.** la masse de carbone produite par une activité ou une personne.
☐ **B.** la masse de carburants carbonés consommée par une activité ou une personne.
☐ **C.** la masse de CO_2 produite par une activité ou une personne.
☐ **D.** la masse de tous les composés consommée par une activité ou une personne.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Le futur des énergies

Histoire, enjeux et débats

Question 21

L'invention qui a été absolument nécessaire pour pouvoir créer l'alternateur est :

☐ **A.** le magnétisme.
☐ **B.** la dynamo.
☐ **C.** l'induction électromagnétique.

Question 22

Actuellement, le transport du courant électrique, en France, se fait avec :

☐ **A.** du courant continu à 400 000 V.
☐ **B.** du courant alternatif à 230 V.
☐ **C.** du courant alternatif à 400 000 V.

Question 23

Pour diminuer les combustibles fossiles, il faut savoir stocker l'énergie. On utilise :

☐ **A.** la conversion en dihydrogène.
☐ **B.** le stockage en déchets nucléaires.
☐ **C.** le stockage en dynamo.

Question 24

La fusion nucléaire est utilisée dans :

☐ **A.** le projet ITER.
☐ **B.** les centrales nucléaires.
☐ **C.** aucune technologie.

Question 25

L'accumulateur qui n'existe pas est :

☐ **A.** l'accumulateur au plomb.
☐ **B.** l'accumulateur lithium-ion.
☐ **C.** l'accumulateur alcalin.

Deux siècles d'énergie électrique

Question 26

L'expérience qui conduit au phénomène d'induction électromagnétique est :

☐ **A.** le déplacement d'un aimant devant un électro-aimant.
☐ **B.** le déplacement d'une bobine devant une boussole.
☐ **C.** le déplacement d'un aimant devant une bobine.

Question 27

Un alternateur est constitué d'un aimant qui sera le rotor et d'une bobine qui sera le stator. Lors de son fonctionnement, le courant électrique est :

☐ **A.** alternatif.
☐ **B.** continu.
☐ **C.** rotatif.

Question 28

Le rendement d'un alternateur est donné par la relation :

☐ **A.** $\eta = \dfrac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance absorbée}}$

☐ **B.** $\eta = \dfrac{\text{Puissance absorbée}}{\text{Puissance utile}}$

☐ **C.** $\eta = \dfrac{\text{Énergie absorbée}}{\text{Énergie utile}}$

Question 29

Le spectre de raies d'émission d'un atome est dû au fait que :

☐ **A.** l'énergie des atomes est quantifiée.
☐ **B.** les électrons sont des particules élémentaires.
☐ **C.** les photons existent.

Question 30

Une cellule photovoltaïque délivre une tension de 0,32 V et un courant d'intensité égale à 2,8 A. Que vaut sa résistance ?

☐ **A.** 8,8 Ω
☐ **B.** 0,90 Ω
☐ **C.** 0,11 Ω

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Les atouts de l'électricité

Question 31

Le courant produit par un barrage hydro-électrique est :

☐ **A.** un courant positif.
☐ **B.** un courant continu.
☐ **C.** un courant alternatif.

Question 32

La conversion d'énergie dans une turbine est de type :

☐ **A.** énergie cinétique vers énergie mécanique.
☐ **B.** énergie mécanique vers énergie électrique.
☐ **C.** énergie cinétique vers énergie électrique.

Question 33

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est donné par la relation :

☐ **A.** $\eta = \dfrac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance reçue}}$

☐ **B.** $\eta = \dfrac{\text{Puissance reçue}}{\text{Puissance utile}}$

☐ **C.** $\eta = \dfrac{\text{Énergie reçue}}{\text{Énergie utile}}$

Question 34

La conversion d'énergie dans une pile est de type :

☐ **A.** énergie chimique vers énergie électrique.
☐ **B.** énergie électrique vers énergie chimique.
☐ **C.** énergie cinétique vers énergie électrique.

Question 35

Le rendement d'un accumulateur lors de la décharge est donné par la relation :

☐ **A.** $\eta = \dfrac{U}{E}$

☐ **B.** $\eta = \dfrac{E}{U}$

☐ **C.** $\eta = \dfrac{\text{U}}{\text{Énergie utile}}$

Optimisation du transport de l'énergie

Question 36

Quelle est l'expression de la puissance dissipée par effet Joule dans un conducteur ?

☐ **A.** $P = R^2 \times I$
☐ **B.** $P = R \times I$
☐ **C.** $P = R \times I^2$

Question 37

Pour un câble électrique donné, la résistance varie en fonction de sa longueur de la façon suivante :

☐ **A.** plus la longueur du câble est petite, plus sa résistance est grande.
☐ **B.** plus la longueur du câble est grande, plus sa résistance est petite.
☐ **C.** plus la longueur du câble est petite, plus sa résistance est petite.

Question 38

Pour diminuer les pertes par effet Joule, on peut :

☐ **A.** augmenter la tension.
☐ **B.** augmenter l'intensité.
☐ **C.** augmenter la résistance.

Question 39

La contrainte qui est toujours vraie est :

☐ **A.** la valeur maximale de l'intensité sortant d'une source dépend de la capacité de la source.
☐ **B.** la valeur de l'intensité arrivant dans une cible dépend de la capacité de la source.
☐ **C.** la valeur de l'intensité sortant d'une source est égale à la valeur de l'intensité arrivant dans une cible.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 40

La loi des nœuds est :

☐ **A.** la somme des intensités qui arrivent dans un nœud est égale à la somme des intensités qui sortent du nœud.
☐ **B.** la somme des intensités qui arrivent dans un nœud ne peut prendre qu'une valeur maximale.
☐ **C.** la somme des intensités qui sortent d'un nœud ne peut prendre qu'une valeur maximale.

Une histoire du vivant

La biodiversité et son évolution

Question 41

La richesse spécifique est :

☐ **A.** l'ensemble des revenus générés par les espèces d'un écosystème.
☐ **B.** le nombre d'allèles d'une espèce.
☐ **C.** le nombre d'espèces présentes dans un milieu.
☐ D. le seul moyen d'estimer la biodiversité.

Question 42

En écologie, l'abondance est :

☐ **A.** le nombre de génotypes présents dans un milieu.
☐ **B.** le nombre d'individus présents dans un milieu.
☐ **C.** le nombre d'espèces présentes dans un milieu.
☐ **D.** le nombre d'écosystèmes présents dans un milieu.

Question 43

La méthode de capture-marquage-recapture :

☐ **A.** vise à estimer, sans erreur possible, la diversité spécifique d'une population.
☐ **B.** vise à estimer, sans erreur possible, l'abondance d'une population.
☐ **C.** vise à estimer, avec une certaine marge d'erreur, la diversité spécifique d'une population.
☐ **D.** vise à estimer, avec une certaine marge d'erreur, l'abondance d'une population.

Question 44

Le modèle de Hardy-Weinberg prévoit :

☐ **A.** une stabilité des fréquences alléliques d'une population, sous certaines conditions.
☐ **B.** une variabilité des fréquences alléliques d'une population, sous certaines conditions.
☐ **C.** une stabilité inconditionnelle des fréquences alléliques d'une population.
☐ **D.** une variabilité inconditionnelle des fréquences alléliques d'une population.

Question 45

La fragmentation d'une population :

☐ **A.** entraîne un enrichissement écosystémique.
☐ **B.** entraîne un appauvrissement écosystémique.
☐ **C.** entraîne un enrichissement génétique.
☐ **D.** entraîne un appauvrissement génétique.

L'évolution comme grille de lecture du monde

Question 46

Les mutations sont :

☐ **A.** des modifications des chromosomes uniquement.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **B.** des modifications de l'ADN, de plus ou moins grande ampleur.
☐ **C.** des modifications de l'ADN limitées à une paire de bases.
☐ **D.** des modifications des chromosomes par sélection naturelle.

Question 47

Les ressemblances entre des structures d'origines différentes sous l'effet de contraintes environnementales similaires sont dues à :

☐ **A.** l'évolution des espèces.
☐ **B.** la sélection naturelle.
☐ **C.** la convergence évolutive.
☐ **D.** l'adaptation.

Question 48

Les structures biologiques sont :

☐ **A.** toujours parfaitement adaptées à l'environnement.
☐ **B.** adaptées à l'environnement mais sous-optimales en raison des contraintes évolutives.
☐ **C.** peu adaptées à l'environnement en raison des contraintes évolutives.
☐ **D.** jamais adaptées à l'environnement et le fruit du hasard.

Question 49

Les caractères inutiles :

☐ **A.** disparaissent toujours.
☐ **B.** disparaissent assez souvent mais peuvent subsister.
☐ **C.** subsistent la plupart du temps mais disparaissent sous l'effet de la sélection naturelle.
☐ **D.** ne disparaissent jamais.

Question 50

L'apparition de résistances aux antibiotiques chez les bactéries :

☐ **A.** provient d'un processus de sélection naturelle causé par l'homme.
☐ **B.** est due à la mutation des bactéries qui se transforment en bactéries résistantes.
☐ **C.** est causée par le hasard.
☐ **D.** est heureusement limitée au cas des bactéries en raison de leur taux de reproduction rapide.

L'évolution humaine

Question 51

Les primates sont un groupe d'animaux :

☐ **A.** dont une seule espèce a survécu à l'heure actuelle.
☐ **B.** qui possèdent un pouce opposable et des ongles.
☐ **C.** qui est apparu il y a 400 millions d'années.
☐ **D.** qui ne possèdent pas de queue.

Question 52

L'Homme et le chimpanzé sont deux espèces très proches génétiquement mais qui présentent des différences marquées, car :

☐ **A.** leur caryotype possède des différences notables.
☐ **B.** leur phénotype est différent.
☐ **C.** la chronologie d'expression des gènes qui contrôlent leur développement diffère.
☐ **D.** leur génotype est très différent.

Question 53

L'ancêtre commun le plus récent de l'Homme et du chimpanzé a un âge estimé à :

☐ **A.** 7 000 ans.
☐ **B.** 70 000 ans.
☐ **C.** 700 000 ans.
☐ **D.** 7 000 000 d'années.

Question 54

La lignée humaine :

☐ **A.** rassemble notre espèce, les chimpanzés et leur ancêtre commun.
☐ **B.** se caractérise par une bipédie prolongée.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

☐ **C.** se caractérise par une croissance de la capacité crânienne.
☐ **D.** ne comprend que notre espèce.

Question 55

Le genre Homo réunit les caractères suivants :

☐ **A.** bipédie permanente et développement cérébral.
☐ **B.** face aplatie, mâchoire allongée et caractères culturels.
☐ **C.** colonne vertébrale allongée et tibias courts.
☐ **D.** un trou occipital vers l'arrière et l'utilisation d'outils.

Les modèles démographiques

Question 56

Quelle est l'expression du taux d'accroissement entre les états u_n et u_{n+1} ?

☐ **A.** $\dfrac{u_{n+1} - u_n}{u_n}$

☐ **B.** $\dfrac{u_{n+1} - u_n}{u_{n+1}}$

☐ **C.** $\dfrac{u_n - u_{n+1}}{u_n}$

Question 57

Dans une suite arithmétique, quelle proposition est juste ?

☐ **A.** Les termes sont de plus en plus grands.
☐ **B.** On passe d'un terme au suivant en multipliant par un même nombre.
☐ **C.** La raison est un nombre positif ou négatif.

Question 58

Soit (u_n) la suite telle que $u_n = 50 - 2n$. Quelle proposition est juste ?

☐ **A.** Le premier terme de la suite est égal à 50.
☐ **B.** La raison de la suite est 2.
☐ **C.** $u_{10} = 40$.

Question 59

Dans une suite géométrique, quelle proposition est juste ?

☐ **A.** Les termes sont de plus en plus grands.
☐ **B.** On passe d'un terme au suivant en additionnant un même nombre.
☐ **C.** La raison est un nombre positif ou négatif.

Question 60

Que peut-on dire de la suite telle que $u_1 = 600$, $u_2 = 300$, $u_3 = 150$ et $u_4 = 75$?

☐ **A.** C'est une suite géométrique de raison $q = 0{,}5$.
☐ **B.** Une suite géométrique de raison $q = 2$.
☐ **C.** Une suite arithmétique de raison $r = -300$.

L'intelligence artificielle

Question 61

Quelle est la taille d'un texte en .txt de 120 caractères ?

☐ **A.** 120 o.
☐ **B.** 120 ko.
☐ **C.** 120 Mo.

Question 62

Parmi les propositions suivantes, laquelle est juste ?

☐ **A.** L'apprentissage machine par renforcement consiste à laisser l'algorithme apprendre de ses propres erreurs.
☐ **B.** L'apprentissage machine sans supervision est utilisé pour faire des courbes de tendance.
☐ **C.** L'apprentissage machine supervisé apprend par un système de récompenses/punitions.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 63

Choisissez la proposition qui définit ce qu'est une courbe de tendance.

☐ **A.** Elle permet de faire des prévisions si l'on a pris soin d'entrer suffisamment de données.
☐ **B.** Elle est toujours linéaire.
☐ **C.** Elle passe par tous les points.

Question 64

Une association organise chaque année un séjour destiné à des adultes handicapés. À sa création en 1997, dix adultes handicapés sont partis durant cinq jours. Ainsi, on dit qu'en 1997, le nombre de « journées participant » est $5 \times 10 = 50$. La courbe de tendance obtenue pour cette étude statistique de 1997 à 2020 a pour équation $y = 35{,}595\,x - 70\,987$, où y représente le nombre de journées et x l'année. Si l'évolution se poursuit ainsi, en quelle année y aura-t-il plus de 1 000 « journées participant » ?

☐ **A.** En 2022.
☐ **B.** En 2066.
☐ **C.** En 2049.

Question 65

Étant donné un nombre entier x, on cherche à déterminer la somme de 1 à x, c'est-à-dire la valeur de $1 + 2 + \ldots + x$. Quelle est l'erreur dans le programme suivant ?

```
def somme(x):
    total=0
    i=0
    while i < x :
        total = total +i
        i = i + 1
    return total
```

☐ **A.** L'erreur vient du fait que la boucle *while* s'arrête trop tôt.
☐ **B.** L'erreur vient du fait qu'il n'y a pas besoin de mettre la variable *i*.
☐ **C.** L'erreur vient du fait qu'il faut faire un retour de somme.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Science, climat et société

Question 1 : B
L'atmosphère actuelle est composée à 99 % de diazote (N_2) et dioxygène (O_2).

Question 2 : A
Par leur activité photosynthétique, les êtres vivants ont contribué à appauvrir en CO_2 une atmosphère primitive qui en contenait à l'origine de grandes quantités et y ont introduit un gaz qui n'y était originellement pas présent : l'O_2.

Question 3 : B
L'ozone stratosphérique se forme suite à la photolyse par les UV-C des molécules d'O_2, ce qui libère des atomes d'oxygène isolés, très réactifs, qui se combinent immédiatement avec une autre molécule d'O_2 pour former de l'ozone O_3.

Question 4 : B
L'atmosphère contient une quantité de carbone beaucoup plus faible que les autres enveloppes terrestres (environ 700 Gt), sous forme de CO_2. La lithosphère contient le stock le plus important (40 000 à 60 000 Gt environ selon les estimations), mais le carbone y est présent sous forme de roches carbonées et surtout carbonatées, et pas de CO_2.

Question 5 : C
À l'heure actuelle, la combustion massive des roches carbonées utilisées comme sources d'énergie entraîne un enrichissement de la teneur en CO_2 de l'atmosphère.

Question 6 : D
Les grandeurs qui définissent un climat sont la pression atmosphérique, la température, le degré d'hygrométrie (qui correspond à la teneur en vapeur d'eau, l'eau (H_2O) à l'état gazeux, de l'air), la pluviométrie, la nébulosité et la vitesse et la direction des vents. Les teneurs en N_2, CO_2 et O_2 de l'air ne varient pas en fonction du climat.

Question 7 : A
La climatologie étudie le climat sur des temps longs. La météorologie, elle, étudie les phénomènes atmosphériques (les météores : nuages, vents, etc.) à courte échelle de temps.

Question 8 : C
Le réchauffement climatique désigne une élévation de la température globale du globale d'environ 1 °C, mesurée depuis un siècle et demi environ.

Question 9 : A
Les principaux gaz à effet de serre sont (dans l'ordre de leur contribution à l'effet de serre global) la vapeur d'eau (H_2O à l'état gazeux), le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O).

Question 10 : D
Sans surprise, le réchauffement climatique fait diminuer les surfaces terrestres englacées. La conséquence est que la Terre est moins blanche donc moins réfléchissante globalement : elle absorbe plus de lumière, son albédo diminue. L'albédo est la capacité d'une surface à réfléchir la lumière, un albédo de 1 étant une surface totalement réfléchissante et un albédo de 0 étant une surface totalement absorbante.

Question 11 : B
Les modèles climatiques simulent l'atmosphère et son évolution. Étant donné la complexité du système climatique, il est impossible de le simuler analogiquement (c'est-à-dire avec des sortes de maquettes reproduisant la réalité) : on utilise plutôt des programmes informatiques de simulation numérique. L'atmosphère n'étant pas isolée des autres enveloppes terrestres (hydrosphère, biosphère, lithosphère), sa modélisation est couplée à celle des autres enveloppes.

Question 12 : B
La principale source humaine de production de CO est de loin la combustion des hydrocarbures d'origine fossile (gaz, pétrole, charbon). Les autres activités

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

humaines qui entraînent un dégagement important de CO sont la déforestation et la production de ciment.

Question 13 : D
La principale source humaine de production de CH est constituée par les fuites de gaz naturel (essentiellement du méthane, environ 20 % des émissions totales) suivie par l'élevage des bovins, ovins et caprins (environ 15 % en raison de la rumination) et la fermentation dans les décharges (environ 12 %) et au fond des rizières (environ 5 %).

Question 14 : B
Les modèles climatiques s'accordent sur une augmentation de la température de 1,5 à 5 °C d'ici à la fin du siècle. Une augmentation de 1,5 °C correspond à un scénario où les émissions de gaz à effet de serre seraient immédiatement limitées. Une augmentation de 5 °C correspond à un scénario où l'augmentation des émissions se poursuivrait.

Question 15 : D
Les conséquences prévisibles du réchauffement climatique sont une élévation du niveau marin pouvant atteindre un mètre, une augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes, une acidification des océans et un impact majeur sur tous les écosystèmes.

Question 16 : D
75 % de l'énergie produite dans le monde en 2019 l'a été par la combustion de pétrole, charbon et gaz naturel. Environ 20 % l'a été à partir de ressources renouvelables et environ 5 % grâce à la fission nucléaire.

Question 17 : A
En 2019, l'énergie a principalement été consommée par : l'industrie (environ 30 %), les transports (environ 30 %) et les habitations (environ 20 %).

Question 18 : C
L'ozone troposphérique se forme à partir du dioxyde d'azote lui-même issu de la combustion des combustibles fossiles.

Question 19 : D
Le mot *aérosol* désigne de très fines particules, solides ou liquides, en suspension dans un gaz, généralement l'air quand on parle d'aérosols polluants. Les bombes aérosol portent ce nom car elles projettent un « nuage » de contenu grâce à un gaz propulseur.

Question 20 : C
L'empreinte carbone représente la production de gaz à effet de serre d'une activité ou d'une personne. Le principal gaz à effet de serre étant le CO_2, on peut grossièrement l'exprimer par la masse de CO_2 produite mais ça peut être plus complexe.

Le futur des énergies

Question 21 : C
Il a fallu un long enchaînement de découvertes pour arriver à l'invention de l'alternateur. Mais c'est la découverte de l'électro-aimant qui donne naissance à l'alternateur et à la dynamo.

Question 22 : C
Pour éviter les trop grandes pertes par effet Joule, il faut transporter du courant électrique à forte tension. Le courant continu, quant à lui, pose des problèmes de chute de tension dans les câbles. Le courant alternatif s'est généralisé depuis les années 1950.

Question 23 : A
Les déchets nucléaires présentent un problème de recyclage et doivent souvent être enfouis. La dynamo est un appareil qui produit du courant continu lorsqu'on l'utilise. Le stockage de l'énergie se fait donc en la convertissant en dihydrogène.

Question 24 : A
Le projet ITER est un projet de production d'énergie grâce à la fusion nucléaire. Il est en cours de construction. Les centrales nucléaires actuelles utilisent la fission de l'uranium 235. L'inconvénient majeur de ces centrales est la production de déchets nucléaires.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 25 : C
L'accumulateur au plomb est un accumulateur utilisé dans les voitures actuelles ; l'accumulateur lithium-ion est utilisé dans tous les appareils rechargeables. En revanche, les accumulateurs alcalins n'existent pas : seules les piles alcalines existent, et elles ne peuvent pas être rechargées.

Question 26 : C
Le phénomène d'induction électromagnétique est l'apparition d'un courant électrique dans une bobine lorsqu'un aimant se déplace près d'elle ; ou inversement, l'apparition d'un champ magnétique lorsqu'un courant électrique varie. Il faut donc le déplacement d'un aimant devant la bobine pour observer le phénomène.

Question 27 : A
Le phénomène d'induction électromagnétique conduit à l'apparition d'un courant électrique. Comme il y a passage alternativement d'un pôle Nord puis d'un pôle Sud de l'aimant devant la bobine, le courant obtenu sera alternatif.

Question 28 : A
L'alternateur convertit le travail mécanique en travail électrique. Le rendement est par définition l'énergie utile sur l'énergie apportée. On peut également le définir en puissance. D'où l'expression :

$$\eta = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance absorbée}}$$

Question 29 : A
L'énergie des atomes est quantifiée, c'est-à-dire que chaque atome possède des valeurs bien définies et bien précises. Lorsque l'atome se désexcite (change de niveau d'énergie), le photon émis aura une valeur bien précise également, ce qui conduira à une raie.

Question 30 : C
La relation donnant la résistance de la cellule photovoltaïque est la loi d'Ohm : $R = \frac{U}{I}$. Soit ici, $R = \frac{U}{I} = 0{,}11\ \Omega$.

Question 31 : C
L'utilisation d'un alternateur implique la production de courant alternatif par phénomène d'induction. Comme il y a passage alternativement d'un pôle Nord puis d'un pôle Sud de l'aimant devant la bobine, le courant obtenu sera alternatif.

Question 32 : A
Une turbine est un dispositif rotatif mis en mouvement par de l'eau (le plus souvent) et qui permet de faire tourner un alternateur.

Question 33 : A
La cellule photovoltaïque convertit l'énergie radiative en énergie électrique. Le rendement est par définition :

$$\eta = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance reçue}}$$

Question 34 : A
Une pile est un dispositif dans lequel les substances chimiques qui participent à l'échange d'électrons permettent la création d'un courant électrique à la sortie de la pile.

Question 35 : A
Si on appelle U la tension aux bornes de l'accumulateur lors de la décharge et E sa force électromotrice, c'est-à-dire sa tension à vide, alors le rendement est :

$$\eta = \frac{U}{E}$$

Question 36 : C
Pour un conducteur donné de résistance R, traversé par un courant d'intensité I, la puissance dissipée par effet Joule est donnée par $P = R \times I^2$

Question 37 : C
La relation donnant la résistance d'un câble en fonction de sa longueur est $R = \rho \times \frac{l}{A}$.
La valeur de la résistance varie dans le même sens que la longueur du câble. Plus la longueur est petite, plus la résistance est petite.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

Question 38 : A
D'après l'expression de la puissance dissipée par effet Joule, $P = R \times I^2$, si on augmente la valeur de l'intensité ou de la résistance, la puissance sera augmentée. Il faut donc diminuer la résistance, mais c'est difficile à mettre en œuvre. Il faut donc diminuer l'intensité du courant. À puissance constante, il faut augmenter la tension.

Question 39 : A
La valeur de l'intensité arrivant dans une cible dépend des besoins de la cible, en supposant que la source puisse fournir cette intensité-là. La valeur de l'intensité sortant d'une source n'est pas forcément égale à l'intensité arrivant dans une cible, sauf s'il n'y a qu'une arête.

Question 40 : A
La loi des nœuds est en fait un bilan en intensité de ce qui se passe au nœud considéré. Elle est basée sur le fait que l'intensité du courant reste constante dans le nœud, donc la somme des intensités qui arrivent est égale à la somme des intensités qui sortent du nœud.

Une histoire du vivant

Question 41 : C

Question 42 : B

Question 43 : D
Cette méthode consiste à capturer dans un premier temps un certain nombre d'individus, à les marquer, puis à les relâcher. Dans un deuxième temps, on capture à nouveau un certain nombre d'individus. Le nombre d'individus marqués recapturés permet alors une estimation de la population totale. C'est une méthode statistique et il y a donc une marge d'erreur.

Question 44 : A
Dans une population infinie, avec appariement au hasard des individus, sans flux entrants ou sortants d'individus, sans mutations ni phénomènes évolutifs, le modèle de Hardy-Weinberg prévoit une stabilité des fréquences alléliques. C'est un modèle complètement théorique.

Question 45 : D
La fragmentation d'une population revient à créer de multiples populations plus petites, chacune plus susceptible de s'appauvrir génétiquement.

Question 46 : B
La définition au sens large des mutations est qu'il s'agit de modifications de l'ADN, souvent limitées à une seule paire de bases, mais pouvant être de plus grande ampleur et toucher tout un morceau de chromosome, voire un chromosome entier.

Question 47 : C
Les contraintes d'un même environnement amènent à la sélection de structures ayant des caractéristiques similaires : c'est la convergence évolutive. Tous les organismes aquatiques qui nagent ont une forme fuselée, car c'est la forme qui diminue le plus la résistance que l'eau oppose au déplacement.

Question 48 : B
Les structures biologiques sont le fruit d'une sélection naturelle et il y a une pression de sélection positive pour celles qui remplissent leur rôle correctement : c'est l'adaptation. Cependant, ces structures sont aussi le fruit d'une histoire évolutive et elles s'établissent généralement à partir de structures pré-existantes (ce qui explique qu'elles ne soient généralement pas totalement optimales).

Question 49 : B
Les caractères inutiles peuvent disparaître, car ils ne subissent pas de pression de sélection en faveur de leur maintien. Mais s'ils sont seulement inutiles (et pas néfastes), ils ne subissent pas non plus de pression de sélection en faveur de leur disparition et peuvent donc subsister malgré leur inutilité.

Question 50 : A
L'apparition de résistance aux antibiotiques est due à un phénomène de

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

sélection naturelle causé par la présence d'antibiotiques : les bactéries naturellement résistantes (car elles possèdent naturellement une mutation favorable) survivent et se reproduisent préférentiellement aux autres qui meurent dans cet environnement défavorable. À terme, après un certain nombre de générations, la majorité de la population de bactéries est constituée d'individus résistants.

Question 51 : B

Les primates sont un groupe de mammifères dont les yeux sont orientés vers l'avant et qui possèdent un pouce opposable et des ongles.

Question 52 : C

Les séquences codantes (c'est-à-dire les gènes) de l'Homme et du chimpanzé sont identiques à 98,5 %. Ce qui explique l'essentiel des différences entre les deux espèces est que la chronologie d'expression des gènes est différente pendant le développement embryonnaire.

Question 53 : D

Les fossiles et ce que l'on appelle l'horloge moléculaire (la vitesse à laquelle les mutations s'accumulent dans les séquences génétiques) permettent d'avancer un âge d'environ sept millions d'années pour l'ancêtre commun Homme/chimpanzé.

Question 54 : B

La lignée humaine est la branche de l'arbre du vivant qui s'est séparée de l'ancêtre commun Homme/chimpanzé et a donné naissance à de nombreuses espèces d'êtres « humains » aujourd'hui disparues et à la nôtre. Leur caractéristique commune majeure est la bipédie.

Question 55 : A

Le genre Homo regroupe notre espèce et certaines autres espèces proches ayant existé autrefois. Nos points communs avec elles sont la bipédie et le développement du volume du cerveau.

Question 56 : A

Le taux d'accroissement est le rapport entre la variation absolue et l'état u_n, soit : $\frac{u_{n+1} - u_n}{u_n}$.

Question 57 : C

Les termes pouvant être positifs ou négatifs, ils peuvent également être de plus en plus petits ou garder toujours la même valeur. On passe d'un terme au suivant en additionnant un même nombre, puisque c'est une suite arithmétique.

Question 58 : A

Par définition, (u_n) étant une suite arithmétique, la relation générale est : $u_n = u_0 + n \times r$. Le premier terme de la suite est égal à 50. La raison est -2. On calcule $u_{10} = 5 - 2 \times 10 = 30$

Question 59 : C

La raison peut avoir une valeur comprise entre 0 et 1, chaque terme sera alors plus petit que le précédent. On passe d'un terme au suivant en multipliant par un même nombre, puisque c'est une suite géométrique.

Question 60 : A

Le rapport entre chaque terme donne $\frac{u_2}{u_1} = \frac{300}{600} = 0{,}5$. De même, on trouve $\frac{u_3}{u_2} = \frac{u_4}{u_3} = 0{,}5$. Ainsi, on a une suite géométrique de raison $q = 0{,}5$.

Question 61 : A

Chaque caractère est codé sur un octet. Donc 120 caractères pèsent 120 octets. Il faut toutefois être vigilant sur le format de document : un texte de 120 caractères en format .doc aurait une taille bien supérieure à 120 o, puisque, en plus des caractères, il comportera un en-tête incorporant tout un tas de données lié à l'utilisateur et au système utilisé.

Question 62 : A

L'apprentissage machine par renforcement permet à l'algorithme d'apprendre directement selon les choix effectués :

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.

s'il se trompe, il est pénalisé, sinon il est récompensé. Les courbes de tendance sont effectuées grâce à l'apprentissage avec supervision. Et c'est l'apprentissage par renforcement qui apprend par un système de récompenses/punitions.

Question 63 : A

Lorsque le nuage de points est de forme allongée et suffisamment important, l'algorithme ajuste une courbe qui minimise les écarts par rapport aux valeurs mesurées : elle ne passe donc pas par tous les points. Elle peut avoir la forme d'une droite (auquel cas elle est linéaire), mais aussi d'une parabole, d'une courbe exponentielle, etc.

Question 64 : A

Dans la courbe de tendance, il faut isoler la variable x qui représente l'année. On a $y + 70\,987 = 35{,}395\,x$. D'où $x = \frac{y + 70\,987}{35{,}395} = \frac{1\,000 + 70\,987}{35{,}395} = 2\,022$.

Question 65 : A

Dans la boucle *while*, on va faire la somme des valeurs successives de i que l'on incrémente à chaque boucle grâce à la ligne $i = i + 1$. Mais on sort de la boucle dès que la condition $i < x$ n'est plus vérifiée. Donc la dernière valeur à ajouter, qui correspond à la valeur x entrée, ne sera pas prise en compte dans la somme.

© rue des écoles & *Le Monde*, 2021. Reproduction, diffusion et communication strictement interdites.
Ne peut être vendu séparément.