

Comprendre la nature de la science, un enjeu de formation au collège et au lycée

De nombreux sujets comme le réchauffement climatique, la santé humaine ou la crise de la biodiversité nécessitent des connaissances scientifiques solides pour en comprendre les enjeux et mettre à distance les discours pseudo-scientifiques et les fausses informations. La formation sur la nature de la science procure aux élèves des outils pour comprendre le monde dans lequel ils évoluent. Ainsi, les connaissances épistémologiques, qui concernent la compréhension de la nature et de la construction des savoirs scientifiques, sont essentielles à développer explicitement dans les enseignements au collège et au lycée.

Appréhender la diversité des démarches en sciences de la vie et de la Terre permet aux élèves d'apprécier la richesse et la complexité du travail qui fonde l'expertise scientifique. Comprendre comment se construit un savoir scientifique développe la capacité à argumenter en articulant les faits aux modèles, la rigueur intellectuelle et l'esprit critique. Les élèves deviennent alors capables d'apprécier l'importance du consensus scientifique et de distinguer savoirs, croyances et opinions.

Les enjeux d'une formation épistémologique riche et exigeante sont présents dans les programmes de collège et de lycée tant en sciences de la vie qu'en sciences de la Terre. Abordés notamment dans les préambules, ils permettent de donner une grille de lecture des connaissances et compétences à construire et de donner du sens au travail effectué en classe.

Le dossier comprend un ensemble de 12 documents, dont un document ressource (document 1) sur lequel le candidat pourra s'appuyer afin de répondre aux questions posées. Une exploitation judicieuse et précise de certains documents est attendue. **Cependant, l'utilisation de la totalité des documents n'est pas obligatoire.** Le dossier comprend également des extraits des programmes, servant d'appui à plusieurs questions.

Partie 1 – Pratiquer des démarches scientifiques en classe

(Durée estimée : 2h)

Partie A – Une démarche scientifique fondée sur l'observation des cellules

Question 1.1

Selon François Jacob, « pour qu'un objet soit accessible à l'analyse scientifique, il ne suffit pas de l'apercevoir. Il faut encore qu'une théorie soit prête à l'accueillir » (*La logique du vivant*, 1970).

À partir du document 2, expliquer quelles sont les difficultés rencontrées par les élèves en classe de sixième pour construire le concept de cellule à partir d'observations microscopiques.

Question 1.2

En classe de sixième, vous élaborez une séance au cours de laquelle les élèves ont à réaliser des observations microscopiques et à comparer différents types de cellules (cellules épidermiques d'oignon, hépatocytes et paramécie).

Rédiger le bilan attendu qui constitue la trace écrite de l'élève rendant compte des apprentissages effectués.

Question 1.3

Réaliser un schéma bilan illustrant la progressivité de la construction du concept de cellule du collège à la fin de la classe de seconde.

Partie B – Une démarche scientifique expérimentale sur les besoins nutritifs des végétaux en classe de sixième

Question 1.4

Vous avez réalisé en classe de sixième une évaluation diagnostique en relevant les représentations initiales des élèves sur les besoins nutritifs des végétaux (document 3).

Analyser les réponses des élèves (document 3A et 3C) et classer leurs différentes explications (document 3B).

Question 1.5

À partir de l'exploitation des documents 3 à 6, identifier des similitudes entre les représentations des élèves et les modèles explicatifs élaborés au cours de l'histoire des sciences.

Question 1.6

Construire une séquence pédagogique d'une durée de 3 heures en classe de sixième permettant de travailler les besoins nutritifs des végétaux et de développer les deux compétences suivantes :

- **Formuler des hypothèses fondées qui peuvent être éprouvées ;**
- **Concevoir et mettre en œuvre des expériences pour tester ces hypothèses.**

Il est attendu une exploitation des représentations des élèves recueillies en amont de la séquence (tout ou partie du document 3). Pour chaque séance, les objectifs, les consignes de la (ou des) activité(s) et les modalités de travail seront établis. L'utilisation du document 5 et/ou du document 6 est attendue.

Partie 2 – Comprendre la construction d'un savoir scientifique

(Durée estimée : 1h30)

Question 2.1

Expliquer comment le document 8 relatif à la controverse sur l'âge de la Terre au XIX^e siècle permet de travailler certains aspects de la construction d'un savoir scientifique avec des élèves de première enseignement scientifique.

Le document 1 peut servir d'appui pour élaborer la réponse.

Question 2.2

À partir de l'exploitation du document 9, réaliser une analyse critique de la méthode mise en œuvre par Buffon.

Question 2.3

Construire une séance de 2 heures en classe de première enseignement scientifique sur l'histoire de l'âge de la Terre permettant de travailler explicitement l'objectif général du programme « comprendre la nature du savoir scientifique et ses méthodes d'élaboration ».

Les objectifs, les consignes, l'organisation de travail, les supports et la production finale seront précisés. La proposition s'appuiera sur les documents 8 et 9 du dossier et/ou tout autre document qui semblera pertinent.

Partie 3 – Prendre en compte les évolutions récentes des sciences climatiques

(Durée estimée : 1h30)

Question 3.1

Vous préparez un cours pour les élèves de terminale spécialité SVT s'appuyant sur l'exploitation du document 10. Cette préparation nécessite de clarifier les concepts correspondant aux différentes légendes.

Analyser les graphiques a et b du document 10, en expliquant l'ensemble des termes suivants :

- « observé » sur les deux graphiques a et b ;
- « reconstruit » sur le graphique a ;
- « simulé » sur le graphique b ;
- « humain » et « naturel-solaire et volcanique » concernant les simulations dans le graphique.

Question 3.2

À partir des documents 10, 11 et 12 et de vos connaissances, expliquer comment a été élaboré le consensus scientifique sur l'origine anthropique du réchauffement climatique.

Question 3.3.

Relever des arguments issus du document 12 qui permettent aux élèves de terminale spécialité SVT de comprendre comment la modélisation climatique rend possible l'identification de mesures d'atténuation nécessaires pour limiter le réchauffement climatique.

Question 3.4

En prenant l'exemple du climat, présenter comment les élèves enrichissent progressivement leur compréhension de la nature de la science.

Votre réponse, d'une longueur d'une page au maximum, prendra en compte la progressivité des apprentissages de la classe de sixième à celle de terminale (spécialité SVT et enseignement scientifique).

Document 1 – Document ressource sur la nature et la construction d'un savoir scientifique

Document 1A – Distinction entre savoir, croyance et opinion

Pour distinguer savoir, croyance et opinion, Guillaume Lecointre, zoologiste au Museum national d'Histoire naturelle, propose de s'appuyer sur deux critères :

- s'agit-il d'une affirmation à titre collectif (C) ou à titre personnel (P) ?
- s'agit-il d'une affirmation justifiée rationnellement par la personne (J) ou référée à une autorité (A) ?

Savoirs, croyance et opinions		
	Collectif/Personnel	Autorité/Justification
Savoirs	C	J
Croyance	P	A
Croyance religieuse	C	A
Opinions	P	A et J
Idéologies	C	A et J

Source [18] : Lecointre (2017)

Document 1B – Quelques caractéristiques de la nature et de la construction d'un savoir scientifique

Caractéristiques	Éléments d'analyse possibles
Nature d'un savoir scientifique	Savoirs problématisés Justification rationnelle Domaine de validité
Processus d'élaboration d'un savoir scientifique	Construction intellectuelle Pluralité des démarches, des méthodes utilisées Articulation entre réel et modèle théorique
Rôle de la communauté scientifique	Dimension collective dans l'élaboration Dimension collective dans la validation Consensus <i>versus</i> controverse
Ressources disponibles pour élaborer un savoir scientifique	Ressources théoriques (connaissances, modèles, etc.) Ressources matérielles (instruments, outils, technologie, etc.)
Attitudes favorables à la construction des savoirs scientifiques	Curiosité, ouverture d'esprit Esprit critique
Interactions entre la science et la société	Influence mutuelle science-société Compréhension des débats de société impliquant la science Formation du citoyen éclairé
Dimension temporelle de l'élaboration des savoirs scientifiques	Évolution des connaissances au cours du temps Contexte historique du travail des scientifiques

Source [9] : D'après Maurines et al. (2013)

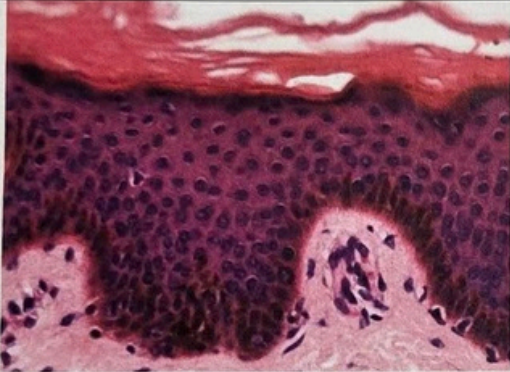
Document 2 – Microphotographies de cellules observées au microscope



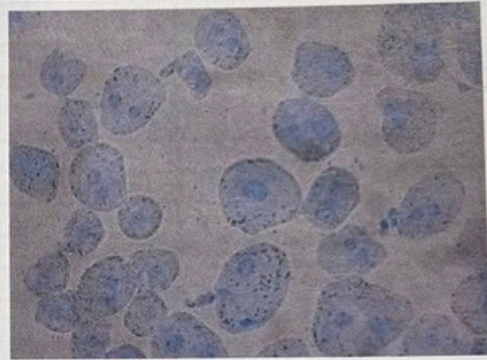
Paramécie – Objectif x40 (microscopie optique)



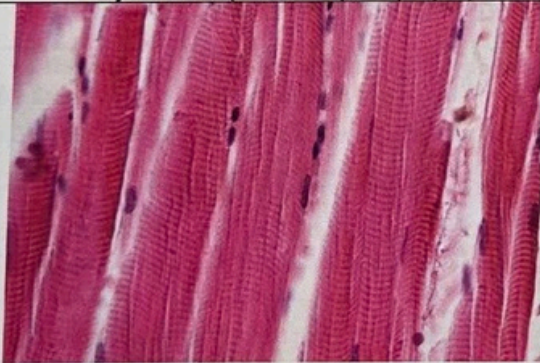
Épiderme d'oignon coloré au vert de méthyle
Objectif x10 (microscopie optique)



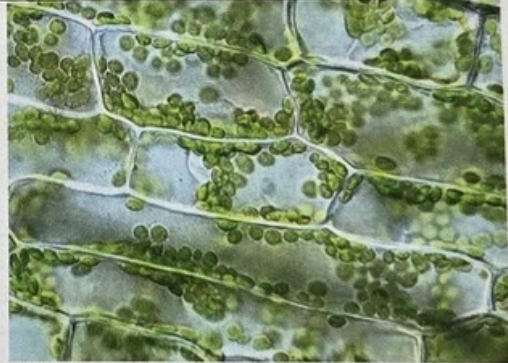
Coupe d'épiderme de peau humaine
Objectif x20 (microscopie optique)



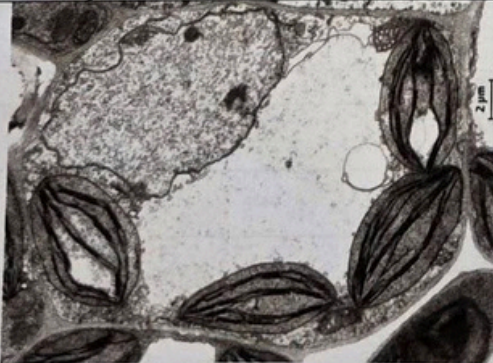
Hépatocytes colorés au bleu de méthylène
Objectif x40 (microscopie optique)



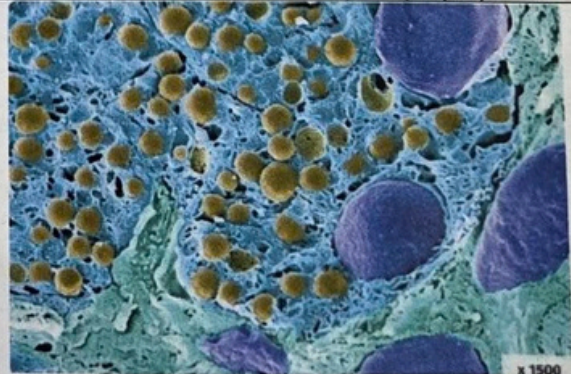
Coupe longitudinale d'un muscle strié squelettique
Objectif x20 (microscopie optique)



Feuille d'élodée
Objectif x10 (microscopie optique)



Cellule foliaire observée au MET



Cellules de pancréas humain observées au MEB

Sources [10], [14], [15], [11], [13], [16], [7]

Document 3 - Des représentations initiales d'élèves à l'entrée en classe de sixième concernant les besoins nutritifs des végétaux

Deux questions ont été posées aux 23 élèves d'une classe de sixième en début d'année scolaire dans le cadre du programme de cycle 3 « sciences et technologie » afin de recueillir leurs représentations initiales :

- Question 1 - De quoi les plantes ont-elles besoin pour grandir ?
- Question 2 - Comment le sais-tu ?

Document 3.A - Exploitation de 23 réponses d'élèves pour la question « De quoi les plantes ont-elles besoin pour grandir ? »

Besoins identifiés	Nombre d'élèves ayant fait la proposition	Ratio (%)
Eau	23	100
Terre	11	47,8
Soleil	8	34,7
Lumière	7	30,4
Chaleur	3	13
Air	2	8,7
Engrais/crottin	2	8,7
Vers de terre	1	4,3
Minéraux de la terre	1	4,3

Document 3.B - Exploitation de 23 réponses pour la question « Comment le sais-tu ? »

Verbatims des réponses d'élèves (orthographe corrigée)	Nombre d'élèves ayant fait la proposition (certains ont proposé plusieurs réponses)
Ma mère me l'a dit/Mes parents me l'ont dit	4
Nous l'avons appris en cours de sciences Nous l'avons appris en CE2 et CM1	7
J'en avais fait l'expérience /des expériences	3
Je l'ai vu dans un documentaire/je l'ai lu	1
J'ai déjà essayé	1
Je le fais chez moi	1
J'ai un potager	1
Je vois mes parents arroser	1
J'ai vu des gens le faire	1
J'allais arroser tous les jours avec mon papy	1
Si les plantes n'ont pas d'eau, de terre et de soleil, elles vont mourir	1
Si on ne les mouille pas, elles vont être déshydratées et du coup elles vont sécher	1
Quand j'arrose la plante, que je la mets dans un endroit avec de l'air, de la chaleur et de la lumière elle pousse	1
Le soleil contient du calcium ce qui fait grandir les plantes	1
Sans réponse	2

Document 3.C - Deux exemples de réponses d'élèves

Élève A :

Version originale manuscrite

1. De quoi ont besoin les plantes pour grandir ?
 Les plantes ont besoin de soleil / lumière, d'eau, de chaleur, d'air.
 2. Comment le sais-tu ?
 Quand j'arrose la plante que je la mets dans un endroit avec de l'air, de la chaleur et de la lumière elle pousse.

Version numérique (orthographe corrigée)

1-De quoi ont besoin les plantes pour grandir ?
 Les plantes ont besoin de soleil/lumière, d'eau, chaleur, d'air.
 2-Comment le sais-tu ?
 Quand j'arrose la plante, que je la mets dans un endroit avec de l'air, de la chaleur et de la lumière, elle pousse.

Élève B

Version originale manuscrite

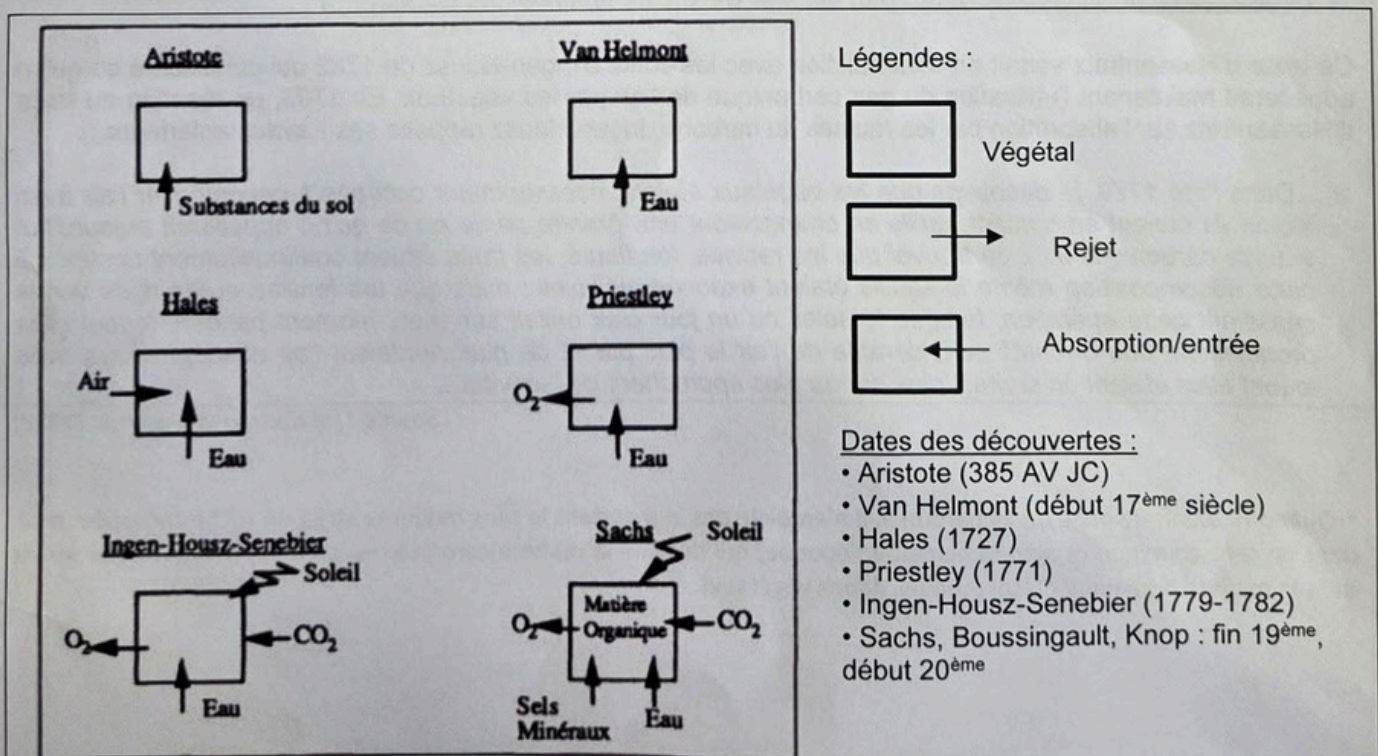
1. De quoi ont besoin les plantes pour grandir ?
 Elles ont besoin d'eau, de la lumière du soleil et de la terre parfois, car certaines plantes sont aquatiques.
 2. Comment le sais-tu ?
 Je le sais car nous l'avons appris en sciences.

Version numérique (orthographe corrigée)

1-De quoi ont besoin les plantes pour grandir ?
 Elles ont besoin d'eau, de la lumière du soleil et de la terre, parfois, car certaines plantes sont aquatiques.
 2-Comment le sais-tu ?
 Je le sais car nous l'avons appris en sciences.

Document 4 - Points de repères historiques relatifs à la nutrition végétale

Document 4.A - Schémas synthétiques de plusieurs modèles explicatifs



Source : [12] D'après Rumelhard (1985)

Document 4.B - Précisions historiques

Depuis Aristote (385-322 AV JC), sinon même avant, il existe des explications pour la nutrition végétale. Les théories d'Aristote dominèrent jusqu'au milieu du 17^{ème} siècle : la plante reçoit du sol une nourriture toute élaborée (théorie de l'humus). La plante est un animal dont les racines sont les « veines lactées ».

Boussingault (1851-1855) fera la démonstration expérimentale que l'azote est fourni sous forme minérale, ceci avec une expérience simple : cultiver sur sol purement minéral. Avec cette méthode des cultures sur milieu synthétique, le rôle des différents éléments minéraux fut précisé (travaux de Raulin, Ville, Sachs, Knop...) puis Mazé (1915) pour les oligo-éléments.

Sources : D'après [12] Rumelhard (1985)

Document 5 - Une controverse au 18^{ème} siècle entre les tenants de la théorie de l'humus et ceux en faveur d'une théorie minérale

La théorie de l'humus provient de la conception d'Aristote selon laquelle la nutrition des plantes serait réduite aux fonctions des racines : la matière organique de la plante ne peut provenir que de la matière préexistante, l'humus du sol. La controverse entre les tenants de la théorie de l'humus et ceux qui la dénoncèrent en faveur d'une théorie minérale de la nutrition et du prélèvement du carbone dans le CO₂ de l'atmosphère dura longtemps. Une controverse s'établit notamment à la fin du 18^{ème} siècle entre Hassenfratz (chimiste et collaborateur de Lavoisier) et Ingen-Housz (médecin et naturaliste).

En 1792, Hassenfratz publiait en effet dans les Annales de chimie un texte dans lequel il tentait de démontrer que le carbone des végétaux provient du sol (de l'humus du sol) et qu'il est absorbé par les racines :

« ... de toutes les manières d'expliquer l'accroissement du carbone dans les plantes par l'acte de végétation, celle qui a un rapport plus direct avec les engrais, celle qui s'accorde le mieux avec tous les faits connus, est la dissolution du charbon* dans l'eau, sucé ensuite par les racines et déposé dans l'intérieur des plantes ; qu'ainsi le charbon dissous dans l'eau est une substance nutritive des plantes... »

Ce texte d'Hassenfratz venait en contradiction avec les écrits d'Ingen-Housz de 1782 qui concluait à ce qu'on appellerait maintenant l'utilisation du gaz carbonique de l'air par les végétaux. En 1796, en réaction au texte d'Hassenfratz sur l'absorption par les racines du carbone, Ingen-Housz rappelle ses travaux antérieurs :

« ... Dans l'été 1779, je découvris que les végétaux étaient incessamment occupés à décomposer l'air avec lequel ils étaient en contact, qu'ils en changeaient une grande partie en ce qu'on appellerait aujourd'hui « acide carbonique » ... Je trouvai que les racines, les fleurs, les fruits étaient continuellement occupés à cette décomposition même lorsqu'ils étaient exposés au soleil ; mais que les feuilles et les tiges vertes cessaient cette opération, lorsque le soleil ou un jour clair brillait sur elles, moment pendant lequel elles produisaient une quantité considérable de l'air le plus pur et de plus rendaient l'air atmosphérique avec lequel elles étaient en contact plus pur ou plus approchant de l'air vital... ».

Source : [6] Kassou et Souchon (1992)

* Quand Hassenfratz parle de « charbon », il n'emploie pas le mot dans le sens moderne strict de roche carbonée, mais dans un sens chimique et agronomique de l'époque, qui désigne la matière carbonée en général, présent notamment dans la matière organique du sol (humus, débris végétaux).

Document 6 - Expérience historique de Jean-Baptiste Van Helmont

Au début du 17^{ème} siècle, J.-B Van Helmont relate une de ses expériences de la façon suivante : « J'avais pris un pot de terre cuite. J'y avais placé 200 livres de terre, séchée dans un four, arrosée d'eau ensuite et j'y avais planté une bouture de saule pesant 5 livres. Cinq ans après, l'arbre qu'elle était devenue pesait 169 livres et 3 onces. Mais le pot n'était constamment humidifié que par la pluie ou, quand c'était nécessaire, par de l'eau distillée... Je n'ai pas relevé le poids des feuilles tombées lors des quatre automnes. Finalement je séchai à nouveau la terre du pot ; elle pesait 200 livres moins 2 onces : 169 livres de bois, écorce et racines, avait donc été produite à partir de l'eau seule. »

Source : [2] *Campestrini (1992)*

Document 7 - Des plants de lentilles dans différentes conditions de culture



Source : [4] *École des Cahouettes (2018)*

Document 8 - Une controverse sur l'âge de la Terre au XIX^e siècle

L'extrait présenté est une adaptation d'un débat sur l'âge de la Terre publié en 2003 par Arthur Stinner, professeur de didactique des sciences et Jürgen Teichmann, historien des sciences, avec l'objectif de présenter le fonctionnement de la science à un public non spécialiste. Bien que fictif, ce débat repose sur des sources historiques solides relatant les échanges publics sur plusieurs années entre scientifiques à partir du discours prononcé par Lord Kelvin en 1868 à la *Glasgow Geological Society* et la réponse à ce discours par Huxley. Les participants à ce débat fictif qui se passe à la Royal Institution de Londres en 1872 sont :

- Le physicien Lord Kelvin, fondateur de la seconde loi de la thermodynamique indiquant qu'il est impossible de convertir entièrement en travail la chaleur extraite d'un objet ;
- Le physicien Hermann von Helmholtz qui a travaillé à l'établissement de la première loi de la thermodynamique définissant le principe de la conservation de l'énergie ;
- Thomas Henry Huxley, biologiste et fervent défenseur de la théorie de l'évolution proposée par Darwin ;
- Le géologue Sir Charles Lyell qui a publié en 1830 ses *Principes géologiques* stipulant que les forces et l'activité géologiques sont restées constantes pendant des âges interminables (principe d'uniformitarisme : « le présent est la clé du passé »).

Lord Kelvin - Je pense que mes calculs, qui donnent un âge de la Terre de 98 millions d'années, contredisent clairement les estimations de milliards d'années des géologues. Je suis convaincu que la méthode des géologues et des biologistes manque d'expériences systématiques ainsi que d'une bonne théorie mathématique.

Hermann von Helmholtz - Le principe de conservation de l'énergie, qui semble s'appliquer à l'ensemble de l'univers, est la découverte la plus importante du XIX^e siècle. Elle est très importante, non seulement pour toutes les sciences physiques et la technologie, mais aussi, je pense, pour la géologie.

Sir Charles Lyell - La géologie a besoin, non pas de millions, mais de milliards d'années pour expliquer les processus que nous avons observés et étudiés.

Huxley - Je suis d'accord avec Darwin pour dire que l'âge de la Terre doit être nettement supérieur aux 100 millions d'années que les physiciens nous accordent, peut-être même supérieur de plusieurs ordres de grandeur. Nous, biologistes, sommes d'accord avec Sir Charles pour dire qu'il manque quelque chose d'important dans le calcul de l'âge de la Terre par les physiciens.

Lord Kelvin - Bien sûr, je ne suis pas le premier physicien à traiter de la question de l'âge de la Terre et je ne serai certainement pas le dernier. Newton a estimé un temps de refroidissement de la Terre à environ 50 000 ans et le comte de Buffon est arrivé expérimentalement à 70 000 ans.

Sir Charles - Vous devez vous rappeler que la Terre est constituée de continents et d'océans et que nous ne pouvons que deviner le contenu et la composition physique de la Terre en dessous d'environ 10 miles. Lord Kelvin, dans vos calculs, vous utilisez un taux de refroidissement très rapide que nous, géologues, ne pouvons accepter. Vous ne nous avez donné qu'une formule basée sur une théorie. Il y a peut-être d'autres théories que nous n'avons pas encore envisagées.

Lord Kelvin - La formule utilisée par le professeur Helmholtz est basée sur les principes de la physique. Nous ne connaissons aucune autre source d'énergie, aucune autre théorie viable. Votre vision est intenable car elle viole la loi de la conservation de l'énergie. Dans mon article de 1862, j'ai supposé que le globe en fusion (température d'environ 7000 °F) avait été généré à l'origine par l'énergie gravitationnelle, et j'ai soutenu qu'il avait fallu un temps relativement court, probablement seulement quelques milliers d'années, pour que la surface du globe devienne suffisamment froide pour qu'on puisse y marcher. Je suppose également que la température de la surface est restée approximativement ce qu'elle est aujourd'hui depuis cette époque. De plus, dans toutes les parties de la Terre, on a constaté une augmentation progressive de la température en allant plus en profondeur. Cela implique une perte continue de chaleur par conduction.

Sir Charles - Lord Kelvin, j'aimerais savoir quelles autres hypothèses vous avez faites, quelles propriétés physiques vous avez utilisées et quelles valeurs vous avez choisies pour celles-ci. Nous, les géologues, sommes intéressés et connaissons un peu les propriétés physiques des roches.

Lord Kelvin - J'étais sur le point de le faire, Sir Charles. J'ai supposé que la Terre est principalement un solide et que la perte de chaleur est principalement due à la conduction. Les constantes physiques dont j'avais besoin étaient : le gradient de température de la surface de la Terre, la chaleur spécifique de la croûte terrestre et le coefficient de conduction thermique de la croûte.

Sir Charles - Je serais intéressé de connaître les valeurs de ces constantes physiques que vous avez utilisées, Lord Kelvin.

Lord Kelvin - J'ai estimé une moyenne pour le gradient de température de 1/50 °F par pied de profondeur et j'ai décidé que le coefficient de conduction thermique de la croûte terrestre était de 400 BTU/y.ft.°F¹.

Sir Charles - Ces valeurs peuvent être ce que vous appelez des suppositions raisonnables, mais elles sont basées sur des données insuffisantes. Enfin, nous, géologues, savons que la température de fusion des roches de la croûte n'a pas été déterminée avec une grande fiabilité. Nous ne savons pas vraiment quelle est la conduction dans les profondeurs de la Terre. En fait, la Terre peut avoir une partie considérable faite de fer fondu et, si ma physique me sert bien, alors l'effet de la convection devra être considéré. Et alors votre analyse mathématique basée sur les travaux de Fourier ne pourra pas être appliquée.

Lord Kelvin - Oui, j'ai fait quelques "suppositions plausibles", mais elles sont fondées sur un raisonnement scientifique solide ! J'ai discuté de ces objections et d'autres objections similaires de manière assez détaillée dans mon article, si vous voulez le relire.

Sir Charles - Mais n'est-il pas possible qu'une partie de la chaleur de la Terre soit générée par des réactions chimiques en cours et ne soit pas seulement le résultat de la chaleur résiduelle d'une fusion initiale ? Parce que si c'est le cas, alors votre estimation de l'âge de la Terre doit être modifiée en notre faveur.

Lord Kelvin - Quelle que soit l'opinion que vous défendez, Sir Charles, les conclusions tirées doivent être subordonnées aux lois de la physique.

Sir Charles - Avec le recul, je constate que le mécanisme que j'ai proposé pour expliquer la chaleur interne de la Terre violait les lois de la thermodynamique. Nous faisons attention aux exigences des lois de la physique. Bien que nous, géologues, ne soyons pas bien formés aux méthodes mathématiques modernes de la physique, nous avons essayé d'utiliser des approches plus quantitatives. C'est pourquoi nous avons modifié notre estimation de l'âge de la Terre, passant d'une période "indéfiniment longue" à une période définie de plus de 1000 millions d'années.

Huxley - Lord Kelvin, il est tout à fait possible que vos hypothèses concernant la température initiale, la conductivité thermique moyenne du matériau terrestre, la chaleur de fusion, le gradient de température, la chaleur spécifique, etc. soient erronées ?

Helmholtz - En tant que physicien, je remettrais moi aussi en question certaines des hypothèses de Lord Kelvin, mais en tant que mathématicien, je suis d'accord avec ses solutions. Il est clair que si nous admettons l'exactitude de ses hypothèses, ses conclusions doivent être justes. Il est donc crucial que nous examinions ses hypothèses.

Huxley - Merci au professeur von Helmholtz pour son soutien. Je pense que les mathématiques peuvent être comparées à un moulin d'une facture exquise, qui vous broie des produits de n'importe quel degré de finesse ; mais, néanmoins, ce que vous obtenez dépend de ce que vous y mettez. De même des pages de formules n'obtiendront pas un résultat précis à partir de données vagues.

Sir Charles - Bravo, bravo, Huxley ! Le caractère fascinant et impressionnant des mathématiques rigoureuses, avec leur atmosphère, leur précision et leur élégance, ne doit pas nous faire oublier les défauts des prémisses qui conditionnent l'ensemble du processus. Il n'y a peut-être pas de séduction plus insidieuse et dangereuse qu'un processus mathématique élaboré construit sur des prémisses non vérifiées. Je pense que nous devons garder l'esprit ouvert à la fois sur les limites des lois de la physique actuellement connues et sur la façon dont nous appliquons ces limites, et avoir l'esprit ouvert à la possibilité de découvrir de nouvelles sources d'énergie.

Source : [17] d'après Stinner et Teichmann (2003)

¹ Le BTU ou *British Thermal Unit* est une unité d'énergie qui mesure la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'une livre anglaise d'eau d'un degré °F à la pression constante d'une atmosphère.

Document 9 – Les expériences de refroidissement de boulets de fer de Buffon

Pour estimer l'âge de la Terre, Georges-Louis Leclerc de Buffon (1707-1788) réalise une série d'expériences visant à mesurer la vitesse de refroidissement de globes de fer de différents diamètres. Les extraits ci-dessous sont issus de son ouvrage publié en 1774, *Histoire naturelle, générale et particulière, Supplément, servant de suite à la Théorie de la Terre & d'introduction à l'histoire des minéraux*, tome premier, 1774.

Extrait n°1 (p.145-148)

Avant de rapporter les expériences, j'observerai :

1° Que pendant tout le temps qu'on les a faites, le thermomètre exposé à l'air libre était à la congélation ou à quelques degrés au-dessous ; mais qu'on a laissé refroidir les boulets dans une cave où le thermomètre était à peu près à dix degrés au-dessus de la congélation, c'est-à-dire au degré de la température des caves de l'Observatoire ; et c'est ce degré que je prends ici pour celui de la température actuelle de la Terre.

2° J'ai cherché à saisir deux instants dans le refroidissement, le premier où les boulets cessaient de brûler, c'est-à-dire le moment où on pouvait les toucher et les tenir avec la main, pendant une seconde, sans se brûler ; le second temps de ce refroidissement était celui où les boulets se sont trouvés refroidis jusqu'au point de la température actuelle, c'est-à-dire, à 10 degrés au-dessus de la congélation. Et pour connaître le moment de ce refroidissement jusqu'à la température actuelle, on s'est servi d'autres boulets de comparaison de même matière et de mêmes diamètres qui n'avaient pas été chauffés, et que l'on touchait en même temps que ceux qui avaient été chauffés. Par cet attouchement immédiat et simultané de la main ou des deux mains sur les deux boulets, on pouvait juger assez bien du moment où ces boulets étaient également froids ; cette manière simple est non seulement plus aisée que le thermomètre qu'il eût été difficile d'appliquer ici, mais elle est encore plus précise, parce qu'il ne s'agit que de juger de l'égalité et non pas de la proportion de la chaleur, et que nos sens sont meilleurs juges que les instruments de tout ce qui est absolument égal ou parfaitement semblable. Au reste, il est plus aisé de reconnaître l'instant où les boulets cessent de brûler que celui où ils se sont refroidis à la température actuelle, parce qu'une sensation vive est toujours plus précise qu'une sensation tempérée, attendu que la première nous affecte d'une manière plus forte

Extrait n°2 (p. 150) – Une mise en tableau de cet extrait est présenté ensuite.

La différence la plus constante que l'on puisse prendre entre chacun des termes qui expriment le temps du refroidissement, depuis l'instant où l'on tire les boulets du feu, jusqu'à celui où l'on peut les toucher sans se brûler, se trouve être de 24 minutes, car en supposant chaque terme augmenté de 24, on aura : 12', 36', 60', 84', 108', 132', 156', 180', 204', 228'. Et la suite des temps réels de ces refroidissements trouvés par les expériences précédentes est : 12', 35,5', 58', 80', 102', 127', 156', 182', 205', 232'. Ce qui approche de la première autant que l'expérience peut approcher du calcul.

De même la différence la plus constante que l'on puisse prendre entre chacun des termes du refroidissement jusqu'à la température actuelle, se trouve être de 54 minutes, car en supposant chaque terme augmenté de 54 on aura : 39', 93', 147', 201', 255', 309', 363', 417', 471', 525'. Et la suite des temps réels de ce refroidissement, trouvés par les expériences précédentes, est : 39', 93', 145', 196', 248', 308', 356', 415', 466', 522'. Ce qui approche aussi beaucoup de la première suite supposée.

Tableau des temps de refroidissement des boulets de fer mesurés et calculés par Buffon

Diamètre du boulet (en demi-pouce)	Temps pour chauffer le boulet à blanc (en min)	Temps pour tenir le boulet sans se brûler (en min)		Temps pour que le boulet soit à température ambiante (en min)	
		Valeurs mesurées	Valeurs corrigées (*)	Valeurs mesurées	Valeurs corrigées (*)
1	2	12	12	39	39
2	6	35,5	36*	93	93
3	9	58	60*	145	147*
4	13	80	84*	196	201*
5	16	102	108*	248	255*
6	20	127	132*	308	309*
7	24	156	156	356	363*
8	28	182	180*	415	417*
9	31	205	204*	466	471*
10	34	232	228*	522	525*

Buffon constate que les résultats des mesures expérimentales peuvent être décrits par des suites arithmétiques, mais uniquement à condition de corriger certaines valeurs par un facteur correctif (valeurs notées *).

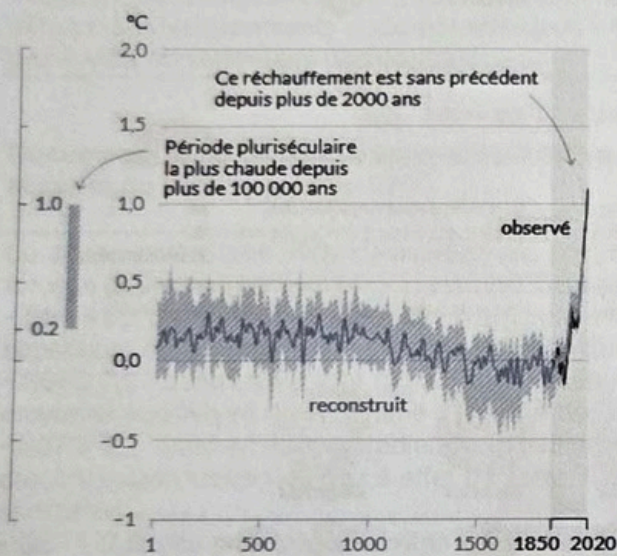
Extrait n°3 (p. 157)

Maintenant, si l'on voulait chercher avec Newton combien il faudrait de temps à un globe gros comme la Terre pour se refroidir, on trouverait, d'après les expériences précédentes, qu'au lieu de 50 000 ans qu'il assigne pour le temps du refroidissement de la Terre jusqu'à la température actuelle, il faudrait déjà 42 964 ans et 221 jours pour la refroidir, seulement jusqu'au point où elle cesserait de brûler, et 96 670 ans et 132 jours pour la refroidir à la température actuelle.

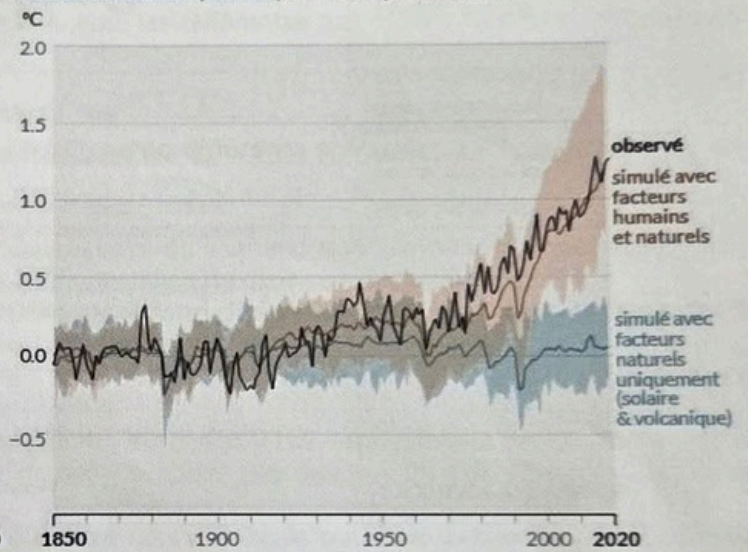
Source : [1] Buffon (1774)

Document 10 - Changement de la température à la surface du globe par rapport à la période 1850-1900

a) Changement de la température à la surface du globe (moyenne décennale) reconstruit (1-2000) et observé (1850-2020)



b) Changement de la température à la surface du globe (moyenne annuelle) observé et simulé en considérant les facteurs humains et naturels et les facteurs naturels uniquement (1850-2020 pour les deux)



Graphique (a) Changements de la température à la surface du globe reconstruits (courbe grise pleine, années 1–2000) et issus des observations directes (courbe noire pleine, 1850–2020), par rapport à 1850–1900 et en moyenne décennale. L'enveloppe grise hachurée, striée de lignes diagonales blanches, indique les fourchettes très probables des reconstructions de température.

Graphique (b) Changements de la température à la surface du globe au cours des 170 dernières années (ligne noire) par rapport à 1850–1900 et en moyenne annuelle, comparés aux changements simulés par les modèles. Les lignes pleines colorées indiquent la moyenne multi-modèle, et les enveloppes colorées indiquent la fourchette très probable des températures simulées.

Source : [8] GIEC (2021)

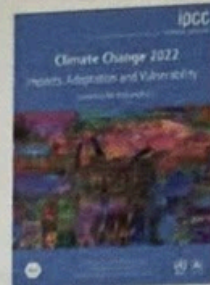
Document 11 - Comparaison de la compréhension du climat entre le premier rapport d'évaluation (1990) et le sixième rapport d'évaluation (2021) du GIEC

COMPRÉHENSION DE L'INFLUENCE DE L'HUMAIN SUR LE CLIMAT



1990
PREMIER RAPPORT
D'ÉVALUATION DU GIEC

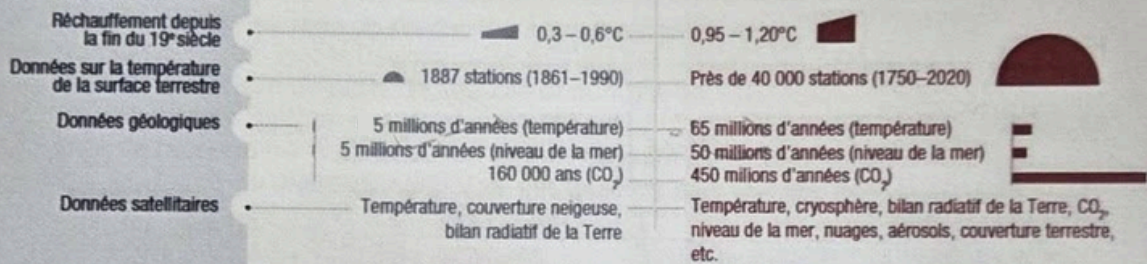
! Suspectée



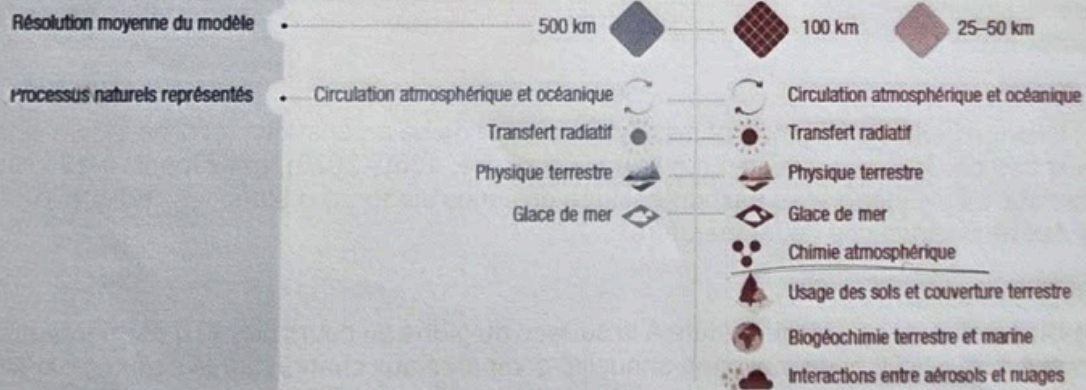
2021
SIXIÈME RAPPORT
D'ÉVALUATION DU GIEC

Démontrée ✓

OBSERVATIONS



MODÈLES CLIMATIQUES



La comparaison n'est que partielle, car par souci de simplicité elle n'intègre pas de nombreux autres progrès réalisés depuis 1990, sur la compréhension théorique, les archives géologiques et l'attribution du changement à l'activité humaine notamment.

Source : [8] GIEC (2021)

Document 12 - Différents scénarios climatiques pour les climats du futur

Document 12.A - Historique des scénarios climatiques développés dans le cadre des rapports du GIEC

Les scénarios de référence (SRES), élaborés dans les années 1990, correspondent à des concentrations en gaz à effet de serre et en aérosols observées. Ils sont utilisés comme conditions initiales des modèles numériques, afin de simuler l'évolution récente du climat. Ces simulations couvrent la période 1860-2000.

Depuis les années 2000, les déterminants socio-économiques tout comme la connaissance du système climatique ont bien évolué. Une mise à jour des outils utilisés par le GIEC était donc nécessaire. Les nouveaux scénarios seront fournis par la communauté scientifique pour les besoins du GIEC. La nouvelle méthode de la communauté scientifique applique désormais une approche en parallèle. Les scientifiques ont défini *a priori* quatre scénarios d'émission de gaz à effet de serre : les RCP pour Representative Concentration Pathway. Les équipes travaillent simultanément : les climatologues produisent des projections climatiques utilisant les RCP comme entrée, tandis que les socio-économistes élaborent des scénarios d'émission qu'ils comparent aux scénarios RCP.

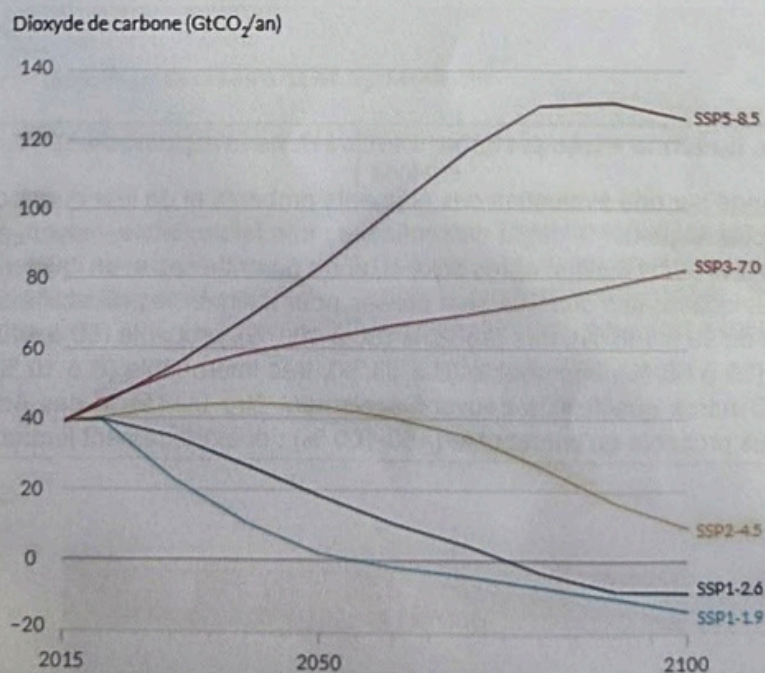
Un nouvel ensemble de scénarios climatiques (les scénarios SSP) a été développé dans le cadre du sixième rapport du GIEC paru en 2023, les "Shared Socioeconomic Pathways" (SSP Trajectoires Socio-économiques communes). Par rapport aux RCP utilisés précédemment, les nouveaux scénarios SSP illustrent différents développements socio-économiques en lien avec les différentes trajectoires des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Source : [3] DRIAS

Document 12.B - Émissions annuelles futures de CO₂ selon différents scénarios développés dans le cadre du 6^{ème} rapport du GIEC

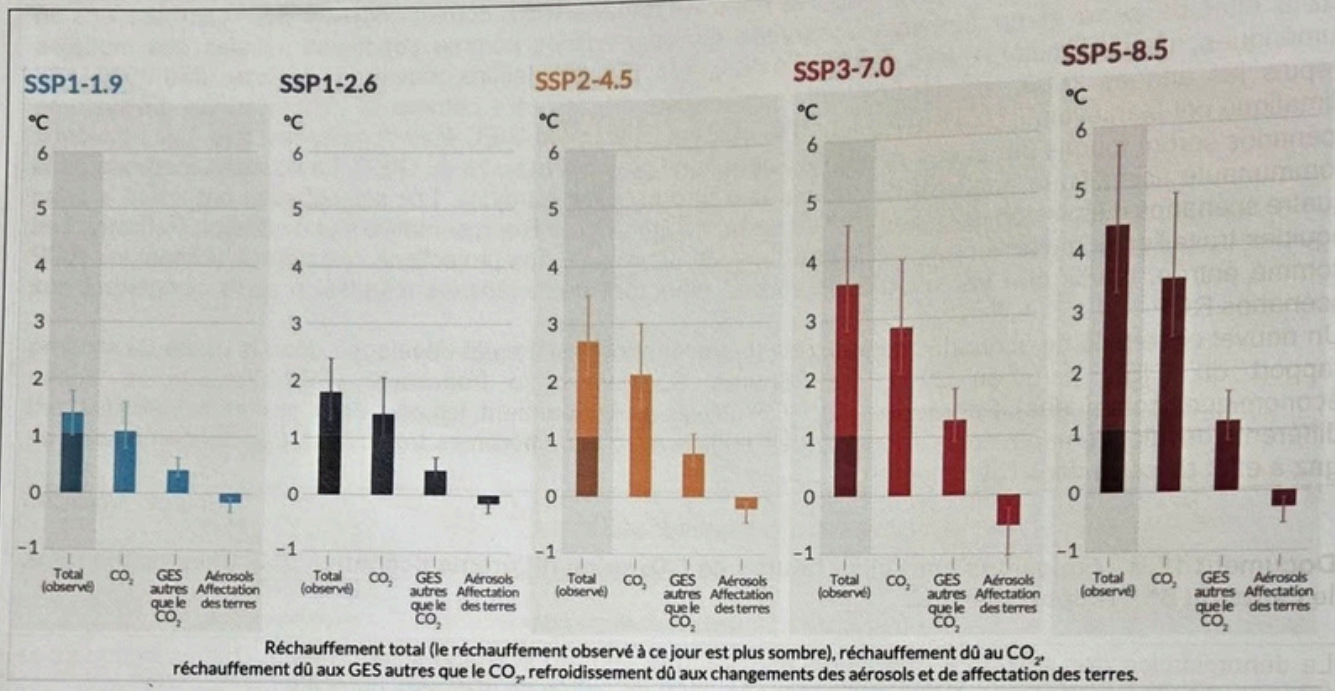
La dénomination des scénarios individuels comprend le nom du scénario suivi de deux chiffres indiquant le forçage radiatif supplémentaire atteint d'ici l'année 2100 en unités de dixièmes de watts.

- SSP5 8.5 : avec un forçage radiatif supplémentaire de 8,5 W/m² d'ici 2100, ce scénario représente la limite supérieure de la gamme des scénarios décrits dans la littérature.
- SSP3 7.0 : avec un forçage radiatif supplémentaire de 7 W/m² d'ici 2100, ce scénario se situe dans la partie moyenne supérieure de la gamme complète des scénarios.
- SSP2 4.5 : avec un forçage radiatif supplémentaire de 4,5 W/m² d'ici 2100, représente la trajectoire moyenne des émissions futures de gaz à effet de serre. Ce scénario suppose que des mesures de protection du climat sont prises
- SSP1 2.6 : ce scénario avec 2,6 W/m² d'ici 2100 a été conçu dans le but de simuler un développement compatible avec l'objectif de 2°C. Ce scénario intègre la mise en œuvre de mesures fortes de réduction des émissions de GES.



Source : [8] GIEC (2021)

Document 12.C - Contributions au réchauffement par groupes de facteurs pour les cinq scénarios
 Changement de la température à la surface du globe en 2081–2100 par rapport à 1850–1900 (°C)



Les contributions au réchauffement, par groupe de facteurs anthropiques et par scénario (SSP), sont indiquées par un changement de la température à la surface du globe (°C) en 2081–2100 par rapport à 1850–1900, avec indication du réchauffement observé à ce jour. Les barres et les moustaches représentent, respectivement, les valeurs médianes et la fourchette très probable [cf. *signification statistique ci-dessous*].

Dans les diagrammes à barres des divers scénarios, les barres représentent : le réchauffement planétaire total (°C ; barre « Total ») ; les contributions au réchauffement (°C) dues aux variations du CO₂ (barre « CO₂ ») et aux gaz à effet de serre (GES) autres que le CO₂ ; et le refroidissement net dû à d'autres facteurs anthropiques (barre « Aérosols et affectation des terres »).

Source : [8] GIEC (2021)

Signification statistique du terme « très probable » utilisé dans le rapport du GIEC

Chaque conclusion se fonde sur une évaluation des éléments probants et de leur degré de concordance. Cinq qualificatifs sont utilisés pour exprimer le degré de confiance : très faible, faible, moyen, élevé et très élevé. Le degré de confiance d'un résultat est indiqué après celui-ci, entre parenthèses et en italique, comme ceci : (degré de confiance moyen). Les qualificatifs ci-après sont utilisés pour indiquer la probabilité évaluée d'un résultat : quasi-certain (probabilité de 99 à 100 %), très probable (90 à 100 %), probable (66 à 100 %), à peu près aussi probable qu'improbable (33 à 66 %), improbable (0 à 33 %), très improbable (0 à 10 %), extraordinairement improbable (0 à 1 %). D'autres qualificatifs peuvent également être utilisés le cas échéant : extrêmement probable (95-100 %) ; plus probable qu'improbable (>50-100 %) ; et extrêmement improbable (0-5 %).

Source : [8] GIEC (2021)

Extrait du programme de Sciences et technologie du cycle 3 (BO n° 25 du 22 juin 2023)

a- Extrait du préambule

La construction de savoirs et de compétences scientifiques et technologiques s'appuie sur des démarches variées qui mettent en œuvre notamment l'observation, la manipulation, l'expérimentation, la modélisation, l'argumentation, la documentation, l'enquête, indispensables à la pratique des sciences et de la technologie. L'enseignement des sciences et de la technologie contribue à donner aux élèves une représentation cohérente et raisonnée du monde qui les entoure, de son fonctionnement et de son histoire. À ce titre, l'étude du réel et la confrontation des idées et des hypothèses aux observations et aux résultats d'expériences jouent un rôle fondamental. En effet, lorsqu'un discours contredit les faits issus d'expériences et d'observations, les démarches scientifiques donnent la primauté aux faits, en assurant leur fiabilité par le test de leur reproductibilité et de leur robustesse.

La pratique de la démarche scientifique concourt à la mise en cohérence de faits, à l'identification de paramètres pertinents, à l'élaboration de concepts et à la construction de modèles et de théories.

b- Le vivant, sa diversité et les fonctions qui le caractérisent

L'enjeu est de donner aux élèves des clés de compréhension du monde vivant par une approche scientifique et sensible de sa diversité et de son unité. Ce thème permet de comprendre l'importance, en sciences, de l'observation et des différents modes de représentation graphique (croquis, dessins, schémas) et d'engager les élèves dans ces pratiques (...)

Connaissances et compétences attendues en fin de cours moyen	Connaissances et compétences attendues en fin de sixième
<p><i>Organisation des êtres vivants</i> Distinguer (par l'observation) les différents niveaux d'organisation des êtres vivants (organisme, appareil, organe) à partir de deux exemples (plante à fleurs et animal).</p>	<p><i>Organisation des êtres vivants</i> Réaliser et représenter des observations microscopiques de cellules (issues de tissus animaux et végétaux et d'organismes unicellulaires). Identifier la cellule comme l'unité structurale commune à tous les êtres vivants.</p>

c- Écosystèmes : structure, fonctionnement et dynamisme

Connaissances et compétences attendues en fin de cours moyen	Connaissances et compétences attendues en fin de sixième
<p>Place des êtres vivants dans les chaînes alimentaires Expérimenter pour identifier quelques besoins des végétaux.</p>	<p>Place des êtres vivants dans les chaînes alimentaires Concevoir et mettre en œuvre des expériences pour relier la production de matière par les végétaux et leurs besoins (lumière, eau, sels minéraux, dioxyde de carbone).</p>

- **L'organisation fonctionnelle du vivant**

Les niveaux d'organisation des êtres vivants pluricellulaires sont explorés. La notion de cellule spécialisée, avec ses caractéristiques structurelles et métaboliques, est reliée à une expression génétique spécifique. L'étude des échanges de matière et d'énergie entre les cellules constitue une première approche des relations existantes entre les cellules d'un organisme, entre les organismes et entre les êtres vivants et leur milieu. Ce thème appelle des activités pratiques variées qui s'appuient sur les techniques actuelles d'études et de représentation de l'organisation fonctionnelle des êtres vivants, de la cellule à l'organisme. L'étude des interactions entre les organismes s'étend à l'étude de la biodiversité à différentes échelles et du fonctionnement des écosystèmes.

L'organisme pluricellulaire, un ensemble de cellules spécialisées

Connaissances

Chez les organismes unicellulaires, toutes les fonctions sont assurées par une seule cellule. Chez les organismes pluricellulaires, les organes sont constitués de cellules spécialisées formant des tissus, et assurant des fonctions particulières.

Toutes les cellules d'un organisme sont issues d'une cellule unique à l'origine de cet organisme. Elles possèdent toutes initialement la même information génétique organisée en gènes constitués d'ADN (acide désoxyribonucléique). Cependant, les cellules spécialisées n'expriment qu'une partie de l'ADN.

Notions fondamentales : cellule, matrice extracellulaire/paroi, tissu, organe ; organite, spécialisation cellulaire, ADN, double hélice, nucléotides (adénine, thymine, cytosine, guanine), complémentarité, gène, séquence.

Objectifs : les élèves apprennent que les cellules spécialisées ont une fonction particulière dans l'organisme, en lien avec leur organisation et que la structure moléculaire de l'ADN lui permet de porter une information. Dans le cadre de l'étude des cellules organisées en tissus, il est attendu que l'existence d'une matrice extracellulaire soit connue : elle est constituée de différentes molécules qui, dans leur grande majorité, permettent l'adhérence cellulaire. Les molécules impliquées ne doivent pas être détaillées.

Capacités

- Réaliser et /ou observer des préparations microscopiques montrant des cellules animales ou végétales.
- Observer et analyser des images de microscopie électronique.
- Distinguer les différentes échelles du vivant (molécules, cellules, tissus, organes, organisme) en donnant l'ordre de grandeur de leur taille.

Précisions : un animal et une plante pourront servir de support à l'étude. Ainsi, la coexistence ou non de cellules autotrophes et de cellules hétérotrophes dans un même organisme pourrait être établie en relation avec le thème suivant.

La division cellulaire, déjà abordée au collège (cycle 4), ne donne pas lieu à des développements supplémentaires. La mitose sera étudiée dans l'enseignement de spécialité proposé au cycle terminal.

3 — La Terre, un astre singulier

Introduction et enjeux. La Terre, singulière parmi un nombre gigantesque de planètes, est un objet d'étude ancien. Les évidences apparentes et les récits non scientifiques ont d'abord conduit à de premières représentations sur son origine et sa place dans l'Univers. La compréhension scientifique de sa forme, de son âge et de son mouvement résulte d'un long cheminement de la pensée scientifique.

Objectifs. La connaissance des caractéristiques de la Terre (rayon terrestre, forme et âge) s'est construite sur un temps très long, donnant lieu à plusieurs controverses. L'évolution des observations, des outils mathématiques et techniques a permis d'aboutir à un résultat stabilisé. Cette partie du programme donne l'occasion de distinguer un savoir scientifique d'une croyance.

3.2 — L'histoire de l'âge de la Terre

L'âge de la Terre est d'un ordre de grandeur sans rapport avec la vie humaine. Sa compréhension progressive met en œuvre des arguments variés.

Savoirs	Savoir-faire
Au cours de l'histoire des sciences, plusieurs arguments ont été utilisés pour aboutir à la connaissance actuelle de l'âge de la Terre : temps de refroidissement, empilements sédimentaires, évolution biologique, radioactivité. Grâce à l'existence de certains noyaux radioactifs contenus dans les minéraux des roches, l'âge de la Terre est aujourd'hui précisément déterminé à $4,57 \cdot 10^9$ ans.	Interpréter des documents présentant des arguments historiques utilisés pour comprendre l'âge de la Terre. Identifier diverses théories impliquées dans la controverse scientifique de l'âge de la Terre. ↔ Ordres de grandeur.

Pistes de mise en œuvre du programme

Nature du savoir scientifique et méthodes d'élaboration

Histoire des sciences : quelques étapes de l'étude de l'âge de la Terre, Buffon, Darwin, Kelvin, Rutherford.

Pluralité des démarches scientifiques.

La datation des météorites pour préciser l'âge de la Terre.

Sciences, société et environnement

Faits et croyances actuelles autour de l'origine et de l'âge de la Terre.

Exemple pour le projet expérimental et numérique

Refroidissement d'un corps.

Extrait du programme de la terminale spécialité SVT (BO n°8 du 25 juillet 2019)

Les climats de la Terre : comprendre le passé pour agir aujourd'hui et demain

Depuis 150 ans, le climat planétaire présente un réchauffement d'environ 1°C . Les scientifiques pointent le fait que ce changement climatique a des conséquences importantes déjà observables sur la météorologie, la biosphère et l'humanité.

L'objectif de ce thème est de s'appropriier les outils nécessaires pour appréhender les enjeux climatiques contemporains en établissant des comparaisons avec différents exemples de variations climatiques passées. Il s'agit en particulier de comprendre que les méthodes d'étude et les mécanismes expliquant les variations constatées peuvent être de natures différentes. Certains mécanismes, déjà étudiés, sont réactivés dans ce contexte. Après avoir compris les causes et la dynamique des variations climatiques passées et mobilisé ses acquis précédents (cycle du carbone, effet de serre, circulation océanique...), l'élève peut aborder les enjeux contemporains liés au réchauffement climatique : ses conséquences sur la biosphère et l'humanité, mais aussi les possibilités envisagées en matière d'atténuation et d'adaptation. L'étude du réchauffement climatique, celle de ses causes mais aussi de ses conséquences sur l'atmosphère et sur les océans sont abordées en complémentarité par l'enseignement scientifique dispensé en classe terminale.

Connaissances**Capacités, attitudes****Comprendre les conséquences du réchauffement climatique et les possibilités d'actions**

Un effort de recherche scientifique majeur est mené depuis quelques dizaines d'années pour élaborer un modèle robuste sur le changement climatique, ses causes et ses conséquences, et pour définir les actions qui peuvent être conduites pour y faire face.

En dehors des effets abiotiques, le réchauffement climatique a des impacts importants sur la biodiversité et la santé humaine :

- par des effets directs sur les populations (effectifs, état sanitaire, répartition à la surface du globe) et sur leur évolution ;

- par des effets indirects liés aux perturbations des écosystèmes naturels et agricoles (approvisionnement et régulation).

L'augmentation de la concentration en CO₂ favorise la production de biomasse, mais des difficultés peuvent résulter de la faible disponibilité des terres agricoles suite à la désertification ou à la montée du niveau marin, à la diffusion de pathogènes, à l'évolution de la qualité des sols et des apports en eau).

Aux niveaux individuel et collectif, il convient de mener des recherches et d'entreprendre des actions :

- en agissant par la réduction des émissions de gaz à effet de serre (les bénéfices et inconvénients de méthodes de stockage du carbone sont à l'étude) ;

- en proposant des adaptations.

Il existe, dans différents pays, des plans d'action bâtis sur un consensus scientifique, dont l'objectif est de renforcer l'acquisition des connaissances, ainsi que l'évaluation éclairée et modulable des stratégies mises en place.

Notions fondamentales : élaboration du consensus scientifique, stratégies d'atténuation et d'adaptation.

Objectifs : plusieurs éléments de cette partie sont abordés en enseignement scientifique de la classe terminale. Ils sont mobilisés ici comme outils d'analyse. Il ne s'agit pas de réaliser un catalogue des conséquences du réchauffement climatique ni des actions d'atténuation et d'adaptation possibles. À partir d'un nombre réduit d'exemples, il s'agit de réinvestir les connaissances et outils vus précédemment pour comprendre un problème donné, à partir d'un corpus d'informations fournies. On veille à une complémentarité avec ce qui est développé en enseignement scientifique. On cherche aussi, dans la mesure du possible, à favoriser une démarche de projet en étudiant un exemple de manière approfondie, en insistant sur les méthodes d'études, d'évaluation et de synthèse (revues systématiques, méta-analyses).

On insiste enfin sur la complémentarité entre atténuation et adaptation, entre démarche individuelle et démarche collective, et entre politiques nationales et internationales, pour faire face au réchauffement climatique.

Montrer comment le travail des scientifiques permet de disposer de modèles et d'arguments qui peuvent orienter les décisions publiques.

Prendre conscience que certains biais cognitifs doivent être surmontés (confusion entre météorologie et climatologie, mauvaise appréhension des échelles de temps, méconnaissance des données scientifiques, confusion entre corrélation et causalité).

Réaliser et /ou analyser un suivi de long terme de la distribution spatiale des espèces face au réchauffement climatique (déplacement en altitude ou en latitude, invasions biologiques...).

Suivre et analyser l'évolution d'un service écosystémique (dépollution de l'eau et de l'air, lutte contre l'érosion, fixation de carbone...).

Concevoir et mettre en œuvre une ou plusieurs démarches de projet pour comprendre et évaluer dans sa complexité une stratégie d'atténuation ou d'adaptation en réponse aux problèmes posés par le changement climatique.

Mobiliser les modèles de cycle du carbone pour quantifier les mesures individuelles et collectives d'atténuation nécessaires pour limiter le réchauffement climatique.

Comparer les bénéfices/inconvénients de différentes stratégies de stockage du carbone (agriculture et sylviculture, puits miniers...).

Recenser, extraire et exploiter des informations sur les politiques d'adaptation (exemple du plan national d'action sur le changement climatique - PNACC) pour identifier les mécanismes et les bénéfices de différentes méthodes (digue et naturalisation des côtes contre l'érosion, végétalisation des villes, prévention et suivi des maladies infectieuses...).

Références bibliographiques

- [1] Buffon, G.-L. L. comte de (1707-1788) A. du texte. (1774). *Histoire naturelle, générale et particulière. Supplément, Tome 1* (Imprimerie Royale). <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k1070532s>
- [2] Campestrini, P. (1992). Sortir de la logique de Van Helmont. *Aster: Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 15, 85-100. <https://doi.org/10.4267/2042/9075>
- [3] DRIAS, *Les futurs du climat—Accueil*. (s. d.). Consulté 8 septembre 2025, à l'adresse <https://www.drias-climat.fr/>
- [4] École des Cahouettes. (s. d.). *Expérience: Les lentilles*. Cahouettes. Consulté 8 septembre 2025, à l'adresse <https://cahouettes.fr/2018/11/experience-les-lentilles.html>
- [5] Kalfoun, F., Thomas, P., & Vidal, G. (s. d.). *Fonte de la banquise (glace de mer) et élévation du niveau marin*. Planet Terre. Consulté 8 septembre 2025, à l'adresse <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/fonte-banquise-2005-10-06.xml>
- [6] Kassou, S., & Souchon, C. (1992). Utilisation des aspects historiques dans l'enseignement de la photosynthèse. *Aster: Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 15, 55-73. <https://doi.org/10.4267/2042/9073>
- [7] *La spécialisation des cellules | Lelivrescolaire.fr*. (s. d.). Consulté 8 septembre 2025, à l'adresse <https://www.lolivrescolaire.fr/page/6329903>
- [8] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, Ö., Yu, R., & Zhou, B. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [9] Maurines, L., Gallezot, M., Ramage, M.-J., & Beaufile, D. (2013). La nature des sciences dans les programmes de seconde de physique-chimie et de sciences de la vie et de la Terre. *RDST. Recherches en didactique des sciences et des technologies*, 7, Article 7. <https://doi.org/10.4000/rdst.674>
- [10] *Paramecium caudatum*. (s. d.). DepositPhotos. Consulté 8 septembre 2025, à l'adresse <https://depositphotos.com/fr/illustration/animal-conjugation-of-paramecium-caudatum-17622611.html>
- [11] Pol, D. (2007, février 8). *Observer des hépatocytes | Planet-Vie*. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/manipulations-en-svt/observer-des-hepatocytes>
- [12] Rumelhard, G. (1985). *Quelques représentations à propos de la photosynthèse*. 1, 37-66. <https://doi.org/10.4267/2042/9204>
- [13] *Skeletal Muscle | Muscle Tissue*. (s. d.). Consulté 8 septembre 2025, à l'adresse <https://www.histologyguide.com/slideview/MH-055ahr-skeletal-muscle/04-slide-1.html?x=4299&y=3354&z=33.30>
- [14] *Techniques SVT: mettre en évidence le noyau*. (s. d.). Consulté 8 septembre 2025, à l'adresse https://svt.ac-versailles.fr/IMG/archives/docpeda/actpeda/lycee/boite_outils/Classeur%20SVT/noyau.html
- [15] *Thin Skin with Melanin | Skin*. (s. d.). Consulté 8 septembre 2025, à l'adresse <https://www.histologyguide.com/slideview/MHS-236-thin-skin/11-slide-1.html?x=21474&y=996&z=50.00>
- [16] Une cellule végétale au MET (2010). *SVT Seconde. Nathan, Paris*.
- [17] Stinner, A., & Teichmann, J. (2003). Lord Kelvin and the Age-of-the-Earth Debate: A Dramatization. *Science & Education*, 12(2), 213-228. <https://doi.org/10.1023/A:1023091932201>
- [18] Lecointre, G. (2017). Sciences et jugement critique. Conférence donnée à l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Champs-sur-Marne. Consulté 8 septembre 2025, à l'adresse https://svt.accreteil.fr/IMG/pdf/resume-conference_1_guillaume_lecointre_video_relu.pdf