

Les cataclysmes célestes

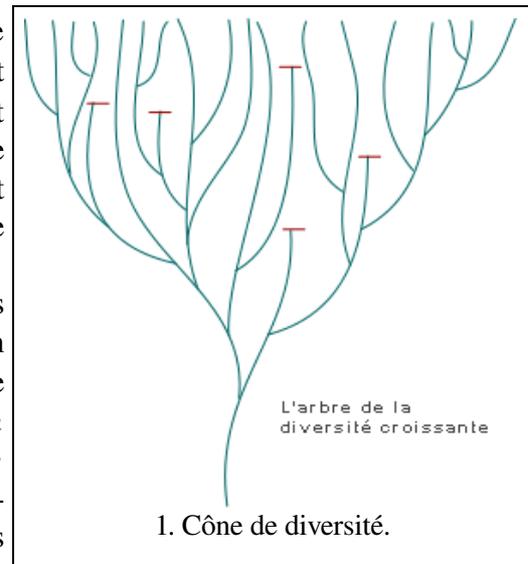
Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie
Faculté des Sciences
Université de Liège

Au cours de l'histoire de la Terre, des phénomènes naturels ont occasionné des extinctions massives d'espèces tant animales que végétales. Même si les causes de ces grandes extinctions ne sont pas encore parfaitement élucidées, des hypothèses existent pour la plupart. Dans certains cas, de grands cataclysmes d'origine astronomique sont montrés du doigt. Si l'impact d'astéroïde est le plus célèbre, d'autres phénomènes d'origine parfois plus lointaine et moins populaire constituent aussi de bons candidats. Il y est notamment question d'impact cométaire, d'explosions d'étoiles massives en supernovae, ou encore du bombardement de notre planète par le redoutable faisceau très énergétique lié au phénomène des sursauts gamma. Nous proposons de dresser un inventaire de ces catastrophes célestes, en les associant à certaines grandes extinctions, tout en évoquant les perspectives et les risques pour l'avenir.

1. Evolution et diversité

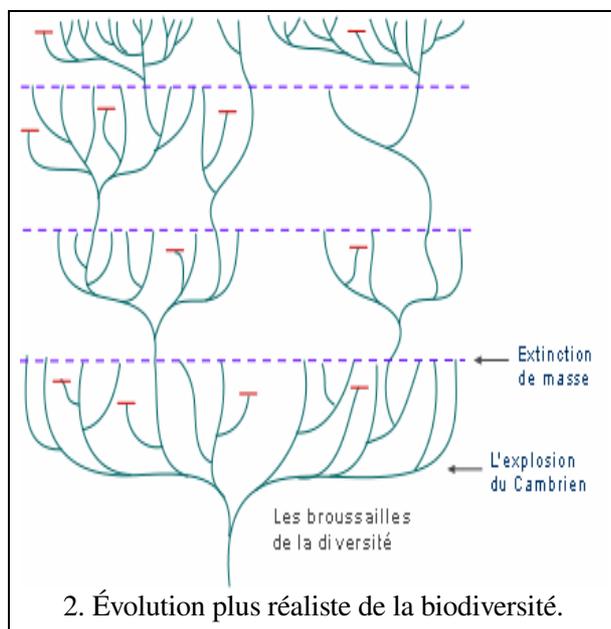
Il y a encore peu de temps, la vision traditionnelle de l'évolution était celle d'un **cône de diversité**. Il était (faussement) admis que les êtres vivants descendent d'êtres primitifs en petits nombres, le tout allant dans le sens de toujours plus de variétés, sans qu'il y ait d'interruptions significatives dans ce processus de spéciation (processus de formation de nouvelles espèces).

Dans cette vision simpliste de l'évolution, les branches interrompues correspondent à la disparition d'une espèce. On parle alors d'**extinction**, définie comme étant *la disparition complète d'une espèce ou d'un groupe d'espèces. On considère qu'une espèce est éteinte lorsque le dernier individu meurt*. Dans le schéma ci-contre, les extinctions sont illustrées par les traits horizontaux interrompant certaines branches de l'arbre de la diversité.



Toutefois, s'il est vrai que localement dans des branches données on observe à certains moments des augmentations de la diversité des espèces, globalement cela est faux. On se rend compte en effet qu'au cours du temps, l'évolution de la biodiversité n'est pas monotone dans le sens de l'augmentation. Des interruptions brutales (à l'échelle de l'évolution) et massives (en terme de nombre d'espèces) ont ponctué l'évolution de la diversité des espèces. Ces discontinuités portent le nom de **Grande Extinction** ou **d'Extinction de Masse**, définie comme étant *l'extinction d'une fraction significative des espèces peuplant la Terre, du point de vue marin ou continental, voire les deux*.

Dans le schéma ci-contre, l'évolution de la diversité apparaît en effet comme étant plus chahutée et disparate, par rapport à ce qui était suggéré dans le schéma précédent. Ce schéma illustre, en-bas, un épisode de diversification et de multiplication des espèces qui s'est produit il y a environ 540 millions d'années appelé *explosion du Cambrien*. Une évolution du type « cône de diversité » s'en est suivie, mais elle fut interrompue par une première extinction de masse, interrompant ainsi une multitude de branches de l'arbre de l'évolution. A partir de là, les branches ininterrompues peuvent continuer à se ramifier et à progresser, permettant ainsi à la diversité de progresser à nouveau, et ce jusqu'à la prochaine Grande Extinction.

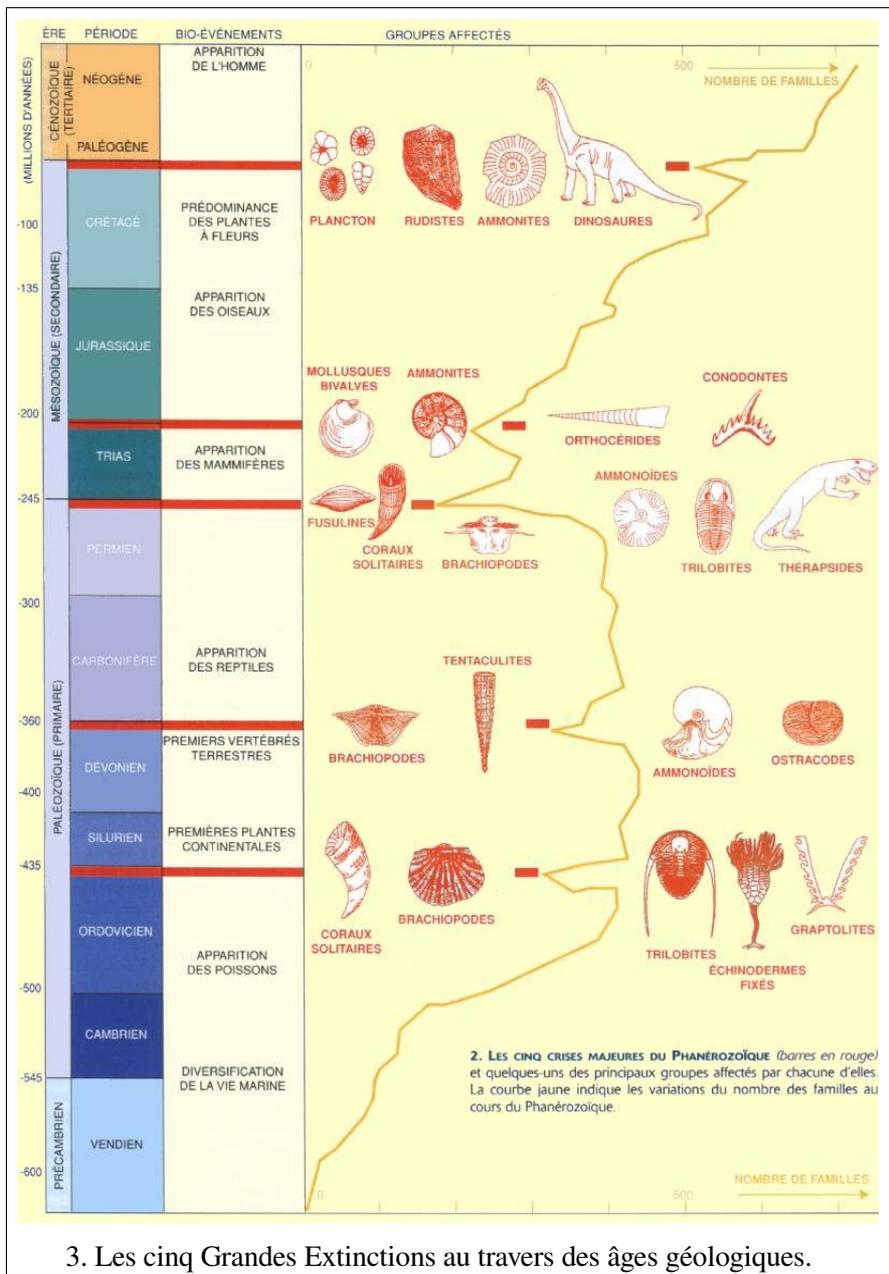


Au travers des âges géologiques, on a pu dénombrer **cinq extinctions de masse**, qui se

sont avérées *décisives pour l'évolution globale de la diversité des espèces*. Leur existence est révélée par les archives fossiles, montrant la disparition de groupes d'espèces qui n'ont manifestement pas laissé de descendants. Sans ces événements particuliers, la biodiversité serait totalement différente de ce qu'elle est aujourd'hui, ce qui justifie qu'on se penche plus spécifiquement sur celles-ci.

2. Les 5 Grandes Extinctions

La figure ci-dessous retrace les ères et périodes géologiques, en illustrant les principaux événements auxquels elles correspondent du point de l'évolution de la diversité des espèces peuplant la Terre.



3. Les cinq Grandes Extinctions au travers des âges géologiques.

Dans le cas de chaque Grande Extinction (indiquée par un trait épais), les principaux groupes d'espèces affectés sont indiqués.

La ligne du temps verticale est exprimée en millions d'années (avec le présent en haut). Les noms des ères et des périodes géologiques sont indiqués. On y relève également des événements importants pour la diversité, tels que l'apparition des reptiles, celle des mammifères, ou encore celle de l'homme.

La courbe brisée à droite illustre l'évolution du nombre de familles d'espèces (et non le nombre d'espèces!), augmentant de gauche à droite au cours du temps. Les extinctions de masse coïncident avec les brusques diminutions du nombre de familles d'espèces recensées, tant animales que végétales. En bas de cette courbe, l'explosion du Cambrien, correspond à l'augmentation spectaculaire du nombre de

familles d'espèces dans le milieu marin.

En remontant cette ligne du temps, de l'époque la plus récente à la plus ancienne, on dénombre ainsi les extinctions de masse suivantes:

1. Crétacé-Tertiaire (**extinction KT**): - 65 millions d'années

C'est la plus étudiée des crises majeures. Elle provoqua la disparition d'environ 75% des espèces, mais de façon sélective. En milieu marin, par exemple, les ammonites et les belemnites sont anéanties, et les récifs coralliens sont très touchés. Sur les continents, la végétation se renouvelle (pic de fougères). Les dinosaures et les ptérosaures (reptiles volants) disparaissent, ce qui favorise l'émergence des mammifères. Toutefois, le caractère soudain de ces disparitions reste controversé. Les preuves en faveur d'un impact météoritique sont nombreuses (cratère de Chicxulub, Mexique), mais les causes terrestres probables abondent également: volcanisme, refroidissement global. Notons que ces événements terrestres pourraient avoir été déclenchés par un grand impact.

2. Fin du Trias (**extinction du Norien**): - 199 à - 214 millions d'années

Moins connue que les autres, cette crise dure environ 15 millions d'années. Elle entraîne la disparition d'environ 75% des espèces marines, la régression des récifs et un recul important des mollusques. Sur les continents, les effets sont plus variés: forte réduction de la diversité des plantes à pollen, net recul des amphibiens, alors que les crocodiles, les reptiles volants et les dinosaures se diversifient.

Les niveaux océaniques semblent avoir été bas à cette époque, avec un réchauffement climatique entraînant une forte aridité. D'importantes éruptions volcaniques ont eu lieu, et on relève également un impact météoritique (cratère du Manicouagan au Québec).

3. Permien-Trias (**extinction PT**): - 245 millions d'années

Cette crise est la plus grave de toutes: selon les estimations, 95% des espèces marines ont alors disparu. Certains groupes (par ex. les trilobites) disparaissent définitivement. Cette crise a aussi touché les flores continentales, avec une disparition progressive due à un pic d'aridité. On observe un net recul de la diversité des insectes et près de 70% des familles de vertébrés disparaissent. Parmi les reptiles, qui venaient d'apparaître, 89 genres sur 90 disparaissent.

4. Fin du Dévonien (**extinction du Dévonien**): -365 millions d'années

Cette crise a conduit à la disparition d'environ 75% des espèces marines. En revanche, les plantes et les arthropodes¹ continentaux ne semblent pas affectés.

A cette époque, une vaste aire océanique (appelée paléothétys) se referme, modifiant les courants marins et la circulation atmosphérique. Le climat se réchauffe et une élévation importante du niveau des mers amène des eaux peu ou pas oxygénées sur les plateaux continentaux.

5. Ordovicien-Silurien (**extinction de l'Ordovicien**): - 440 millions d'années

Cette crise aurait causé la disparition d'environ 85% des espèces.

Un refroidissement global s'est produit, avec formation d'un inlandsis (immense calotte glaciaire) sur les continents. En conséquence, le niveau marin a fortement baissé et la teneur des eaux en dioxygène aussi. Lors de la déglaciation qui suivit, les plates-formes continentales furent inondées d'eaux mal oxygénées. Un sursaut gamma relativement proche pourrait être à l'origine de cette grande extinction, qui a surtout touché les espèces proches de la surface.

1 Embranchement d'invertébrés, comprenant notamment les insectes, les crustacés, et les arachnides.

Une question importante se pose, suite au constat de ces événements:

« **Quelle est l'origine de ces Grandes Extinctions?** »

On peut déjà distinguer deux grandes catégories de causes: *les causes terrestres* et *les causes extra-terrestres*. Pour les premières, on pourrait parler notamment du volcanisme, dont l'activité importante à ces époques a pu occasionner des bouleversements climatiques de grande envergure, susceptibles d'être fatals à de nombreuses espèces. Toutefois, il sera question ici d'un exposé relatif aux causes extra-terrestres d'extinction de masse: **des événements astronomiques violents, destructeurs, et suffisamment puissants pour affecter l'écosystème planétaire dans sa totalité.**

3. Les événements astronomiques importants

A ce jour, on pense que certaines grandes extinctions pourraient avoir une origine astronomique. Ces causes sont évidemment toujours controversées. En résumé, ils s'agit des extinctions de masse suivantes, associées aux catastrophes astronomiques indiquées:

- **l'extinction KT** : *impact météoritique* (cratère de Chicxulub, au Mexique)
- **l'extinction du Norien** : *impact météoritique* (cratère de Manicouagan, au Québec)
- **l'extinction PT** : *impact météoritique* (cratère de Bedout, en Australie)
- **l'extinction de l'Ordovicien** : *sursaut gamma*

Ce constat nous amène à la question suivante:

« **En quoi consistent ces événements astronomiques?** »

Ci-dessous, nous allons discuter d'événements susceptibles d'affecter significativement la vie sur Terre, en insistant sur ceux qui sont supposés à l'origine d'extinctions de masse. Nous aborderons aussi les autres causes plausibles de grande extinction d'origine astronomique, en faisant le point sur les risques encourus par notre planète de connaître de telles crises à l'avenir.

3.1. Les grands impacts

On pourrait d'abord discuter du cas de l'**impact météoritique**², à savoir la collision entre la Terre et un astéroïde. Dans le cadre de ce scénario, l'astéroïde entre dans l'atmosphère terrestre, animé d'une grande vitesse, et sa taille est telle qu'il n'est pas totalement consumé avant d'atteindre le sol. La collision avec la croûte terrestre libère alors une quantité prodigieuse d'énergie, qui soulève des masses de matière énormes dans l'atmosphère. Si l'impact a lieu sur un continent, il en résulte alors un cratère, dont le diamètre et la profondeur dépendent de la taille et de la composition

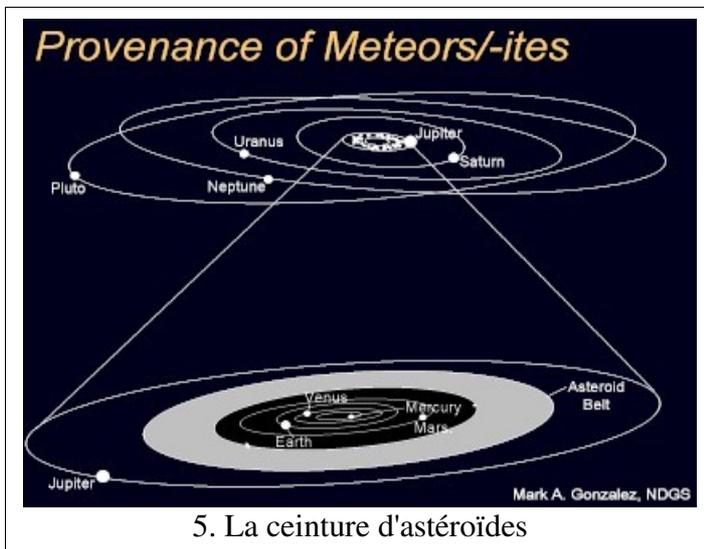
2 Quelques notions de vocabulaire: les **astéroïdes** sont des fragments de roche interplanétaire, parmi lesquels certains sont susceptibles d'entrer en collision avec la Terre: on les appelle **géocroiseurs** s'ils passent à proximité de notre planète. La **météorite** est le fragment qui atteint le sol, si l'astéroïde n'a pas été pulvérisé et consumé dans l'atmosphère, et le **météore** est le nom donné au phénomène lumineux qui accompagne la combustion d'un astéroïde dans l'atmosphère. Par exemple, les étoiles filantes sont en fait des petits météores engendrés par l'incursion dans l'atmosphère de petits grains interplanétaires, dont la taille est de l'ordre d'une tête d'épingle.

de l'astéroïde. Si l'impact a lieu dans l'océan, un gigantesque raz-de-marée se développe et est susceptible d'ensevelir des zones continentales importantes en fonction de la taille de l'objet, de la profondeur océanique, et de la distance de l'impact par rapport aux côtes.

Il s'agit incontestablement du plus évident des scénarios de catastrophe céleste, popularisé notamment par des films tels que « Meteor » (1979), ou encore « Armageddon » (1998). L'origine de sa popularité réside également dans le fait qu'il s'agit de l'idée la plus en vogue pour expliquer la disparition des dinosaures, il y a environ 65 millions d'années. L'image ci-contre illustre ce qu'aurait pu être l'impact de la météorite responsable du cratère de Chicxulub, à proximité de la péninsule du Yucatan au Mexique. Cet événement constitue à l'heure actuelle un très bon candidat pour expliquer l'extinction KT.



4. Impact météoritique (vue d'artiste).



5. La ceinture d'astéroïdes

D'où proviennent les astéroïdes qui ont percuté la Terre, et ceux qui éventuellement menacent d'en faire autant à l'avenir? Ces roches interplanétaires sont principalement en orbite autour du Soleil, et peuplent ce que l'on appelle généralement la ceinture d'astéroïdes (voir figure ci-contre). Cette ceinture se situe entre les orbites des planètes Mars et Jupiter. Elle résulterait des premiers âges de notre système solaire, alors que l'influence déstabilisatrice de Jupiter aurait inhibé la formation d'une planète supplémentaire sur cette orbite. Sous l'influence de la force de gravitation qui

s'exerce mutuellement entre les astéroïdes qui peuplent cette ceinture, leur trajectoires sont perturbées et certains d'entre eux sont susceptibles d'adopter des orbites qui les amènent à proximité du Soleil. Lors de leur traversée de la partie interne du système solaire, la trajectoire de ces corps (dont la taille peut varier de quelques centimètres à plusieurs kilomètres) croise les orbites planétaires, dont celle de la Terre. Une telle situation conduit alors à un risque de collision.

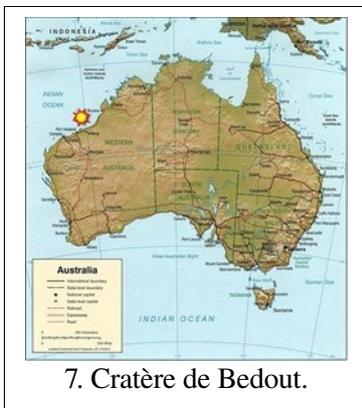
Dans le cas de l'extinction KT, on estime que la taille de l'objet entré en collision avec la Terre au nord de la péninsule du Yucatan était d'une dizaine de kilomètres. Lors de la désintégration de la météorite suite à l'impact, des fragments de croûte terrestre et de la vapeur d'eau se sont subitement élevés dans l'atmosphère pour former un gigantesque panache, qui a enflé jusqu'à un diamètre de 100 à 200 kilomètres. Ce panache



6. Cratère de Chicxulub.

a atteint la haute atmosphère, pour finir par envelopper la planète entière. Les particules soulevées ont fini par retomber sur le sol, avec des vitesses allant de 7000 à 40000 kilomètres par heure, élevant la température de vastes zones de l'atmosphère à des centaines de degrés. La couche de cendres qui en a résulté est encore observable aujourd'hui, en sondant des couches profondes du sous-sol. La végétation a été enflammée par cette pluie de cendres sur une très grande superficie du globe. L'onde de choc consécutive à l'impact a fait le tour de la Terre en quelques heures, produisant ainsi un immense séisme à l'échelle planétaire. Les matériaux soulevés dans l'atmosphère ont, par ailleurs, plongé la planète dans une obscurité profonde, qui rappelle ce qu'on pourrait attendre d'un hiver nucléaire. En l'absence de lumière, la photosynthèse a été interrompue, ce qui a été fatal à la plupart des êtres vivants qui avaient jusque là échappé au cataclysme. Le cratère de Chicxulub qui a résulté de cet impact a un diamètre d'environ 180 kilomètres, et sa profondeur est de 10 kilomètres.

Bien que cet exemple soit le plus populaire, d'autres extinctions de masse ont peut-être été causées par un impact de



7. Cratère de Bedout.

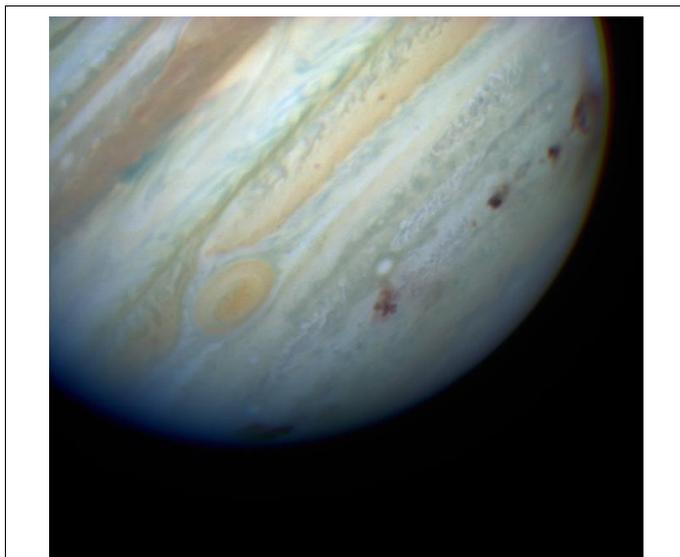
même type que celui de l'extinction KT. Par exemple, on notera le **cratère de Bedout**, dont le diamètre est d'environ 200 kilomètres. Situé au large de la côte nord-ouest de l'Australie, il pourrait être à l'origine de l'**extinction PT** il y a environ 250 millions d'années, qui fut la plus dévastatrice des extinctions de masse recensées à ce jour. Quant à l'**extinction du Norien**, il y a



8. Cratère de Manicouagan.

environ 214 millions d'années, elle pourrait être liée au **cratère de**

Manicouagan, au Québec, à 200 kilomètres au nord du fleuve Saint-Laurent. Ce cratère a un diamètre d'environ 100 kilomètres.



9. Impacts des fragments principaux de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter observés par le télescope spatial Hubble.

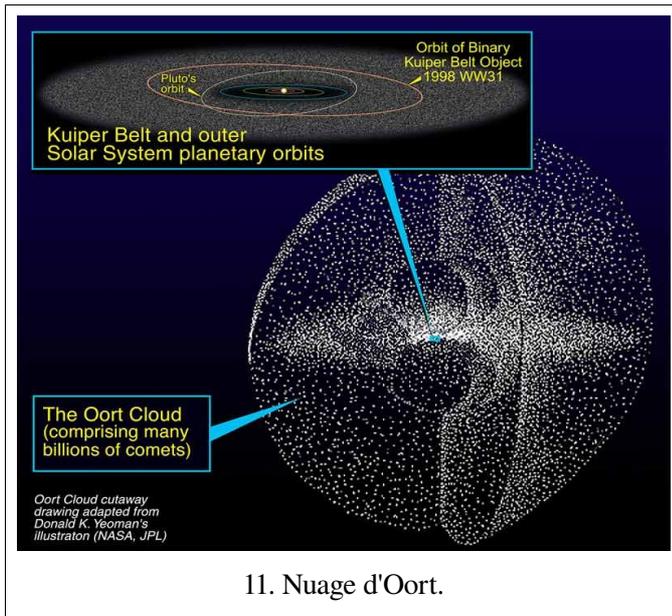
On pourrait également parler d'impact, non plus météoritique, mais d'**impact cométaire**. En effet, en tant que petit corps du système solaire, les comètes adoptent également des trajectoires qui frôlent parfois de très près l'orbite terrestre. Le risque de collision n'est donc pas écarté. Pour en attester, deux faits sont à mentionner. D'abord, on est convaincu à l'heure actuelle que dans sa jeunesse, la Terre a connu un épisode d'intense bombardement cométaire qui pourrait notamment avoir apporté de grandes quantités d'eau, alimentant ses océans. Ensuite, un tel impact a été observé il y a quelques années, non pas avec la Terre, mais avec Jupiter. Cela s'est produit en juillet 1994, et il s'agissait de la comète Shoemaker-

Levy 9. Cette comète s'était fragmentée lors de son précédent passage en 1992, et l'impact de ses fragments principaux a pu être observé tant par le télescope spatial Hubble que par des télescopes au sol, sur Terre. Dans l'illustration présentée à la page précédente, on distingue les impacts des plus gros fragments de la comète. Un tel scénario catastrophe, où cette fois la Terre serait la cible de l'impact cométaire, a d'ailleurs été mis en scène dans le film « Deep Impact » (1998).

Le réservoir de comètes, dans notre système solaire, porte le nom de *Nuage d'Oort*. Il s'agit d'une zone située à la périphérie du système solaire. Les



10. Comète Hale-Bopp.



11. Nuage d'Oort.

corps qui peuplent ce Nuage d'Oort sont essentiellement constitués de glaces contenant de l'eau, mais aussi d'autres molécules telles que le monoxyde de carbone (CO), l'ammoniaque (NH₃), ou encore du cyanogène (CN). Les comètes se résument donc essentiellement à des boules de glaces, évoluant en grand nombre à la périphérie du

système solaire. Au gré des interactions gravitationnelles entre corps célestes, il arrive fréquemment que des comètes adoptent des orbites très excentriques les amenant à proximité du Soleil. C'est en passant à proximité de l'Astre du Jour, sous l'effet de son rayonnement et de son vent solaire, que les couches extérieures des comètes se subliment en leur donnant leur apparence populaire, comme illustré dans le cas de la comète Hale-Bopp lors de son passage en avril 1997. Étant donné leur température très basse, la plupart des comètes passent inaperçues, et ne sont détectées que lors de leur passage à proximité du Soleil. C'est au cours de ces passages dans la partie interne du système solaire qu'un impact cométaire pourrait être envisagé.

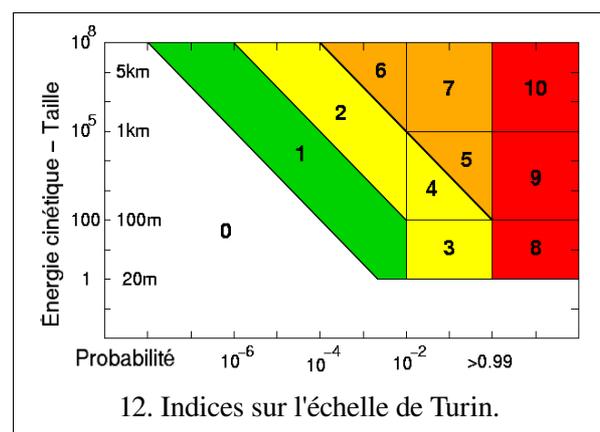
Il n'existe à ce jour aucune preuve sérieuse qu'une des extinctions de masse dont il est question ici ait été provoquée par un impact cométaire. Par contre, il a été suggéré que l'extinction des mammouths, il y a environ 12900 ans, pourrait avoir été provoquée par un tel événement. Cette comète se serait fragmentée au-dessus du continent nord-américain. Comme dans le cas de l'impact météoritique, la matière soulevée dans l'atmosphère aurait bloqué les rayons solaires, et provoqué ainsi un brutal refroidissement de la planète pendant environ 1300 ans. Par ailleurs, l'énergie libérée par l'impact aurait temporairement accéléré la fonte de certains glaciers, qui auraient alors déversé de grandes quantités d'eau douce dans les océans, perturbant ainsi la circulation marine qui joue un rôle important dans la distribution de chaleur à travers la planète. Cet impact aurait donc provoqué un brusque changement climatique, fatal à de nombreuses espèces. Cette idée est toutefois très controversée, et des origines purement terrestres sont souvent retenues.

3.1.1. Qu'en est-il des risques pour l'avenir?

Il n'y a, a priori, pas de raison de considérer que la Terre soit à l'abri de tels événements. Il n'est d'ailleurs pas rare que la presse annonce l'approche d'un astéroïde susceptible de percuter notre planète d'ici 10, 20 ou 30 ans. Si les scientifiques sont assez d'accord pour dire qu'un impact majeur³ aura lieu tôt ou tard, qu'il soit météoritique ou cométaire, il est par contre impossible de prédire quand cela se produira à nouveau.

En vue de répondre à la question posée ci-dessus, la **Spaceguard Foundation** a été créée en 1996, à l'initiative de l'*Union Astronomique Internationale (UAI)*. Cette fondation gère un réseau de surveillance du ciel pour détecter les objets géocroiseurs⁴, étudier leur trajectoire, et évaluer les risques pour la Terre. On notera aussi le projet **Spacewatch**, piloté par un groupe de l'Université d'Arizona (USA), qui consacre l'usage de deux télescopes (1,8 et 0,9 mètres de diamètre) à la surveillance du ciel et au suivi des géocroiseurs. Quant à la NASA (National Aeronautics and Space Administration), elle met également en place son propre programme, intitulé **Near Earth Object Program**, qui mobilise de nombreux moyens (techniques, financiers et humains) pour la surveillance de ces corps du système solaire qui pourraient un jour menacer notre planète, à partir d'observatoires au sol. Indépendamment des initiatives collectives menées par de grandes institutions, il faut aussi savoir que de multiples observatoires isolés, amateurs ou semi-professionnels, guettent le ciel et les menaces qu'il recèle. Actuellement, le voisinage de la Terre est surveillé avec une telle redondance que les risques de rater un astéroïde géocroiseur menaçant sont extrêmement faibles. Il faut aussi noter que tous ces programmes de surveillance communiquent continuellement leurs résultats à la communauté scientifique, ce qui permet de rehausser de manière significative le degré de fiabilité de cette surveillance. D'ici quelques années, on estime que tous les astéroïdes d'une taille supérieure à 100 mètres auront été répertoriés, et l'inventaire des objets de plus petite taille continuera à suivre son cours. Le plus gros problème concerne en fait les comètes, dont le réservoir est beaucoup plus lointain (périphérie du système solaire), et donc moins accessible à nos observatoires. Il n'est donc pas exclu que l'une d'elles puisse nous surprendre!

La Spaceguard Foundation a élaboré une échelle de classification des risques, appelée *échelle de Turin*, graduée de 0 à 10. Sur le diagramme ci-contre, les indices sur cette échelle sont indiqués en fonction de l'*énergie cinétique* de l'objet (notamment fonction de sa taille), et de la *probabilité de collision*, estimée sur base de l'étude de sa trajectoire. Cette trajectoire est influencée considérablement par les interactions gravitationnelles entre l'objet considéré et les astres du système solaire.



³ Typiquement, on considère qu'un impact est majeur si le diamètre du bolide est d'au moins 300 mètres.

⁴ On parlera ici essentiellement d'*objets géocroiseurs* (astéroïdes et comètes passant à proximité de la Terre; en anglais: NEO, Near-Earth Object), parmi lesquels on insistera sur les *astéroïdes géocroiseurs* (en anglais: ECA, Earth-Crossing Asteroid).

Les différents indices de cette échelle correspondent aux situations suivantes:

- 0 L'objet est trop petit pour atteindre la surface de la Terre ou bien la probabilité de collision est près de zéro.
- 1 La probabilité de collision est très faible, du même ordre que celle d'une collision avec un objet non détecté.
- 2 La probabilité de collision est très faible mais pas nulle avec des dégâts très limités en cas de collision.
- 3 La probabilité de collision est de l'ordre de 1% avec des dégâts qui restent très localisés.
- 4 La probabilité de collision est de l'ordre de 1% avec dégâts importants mais localisés.
- 5 Probabilité importante de destructions restant localisées.
- 6 La probabilité de catastrophe générale est grande.
- 7 La probabilité de catastrophe générale est très grande.
- 8 Collision avec destructions localisées. Probabilité: tous les 50 à 1000 ans.
- 9 Collision capable de détruire une partie de la surface terrestre. Probabilité: tous les 1000 à 100000 ans.
- 10 Collision capable de provoquer une catastrophe climatique pour toute la Terre. Probabilité: tous les 100000 ans.

Parmi les géocroiseurs récemment suivis de près par les astronomes, on notera par exemple *Apophis*. Il s'agit d'un astéroïde d'environ 250 mètres de long qui devrait passer à proximité de la Terre le 13 avril 2029. Alors que lors de sa détection il constituait un candidat à risque pour la Terre (son niveau d'alerte avait été porté à 4, ce qui était sans précédent), les dernières révisions de sa trajectoire interdisent toute collision avec notre planète, et il a donc été rétrogradé à un niveau d'alerte de 0.

3.1.2. **Comment pouvons-nous intervenir pour éliminer cette menace d'impact?**

Une telle menace est jugée suffisamment sérieuse par de nombreuses instances dirigeantes pour que de véritables solutions soient à l'étude. Jusqu'à présent, le niveau d'alerte sur l'échelle de Turin n'a pas dépassé 4, dans le cas de l'astéroïde Apophis. Mais si nous détectons une véritable menace pour la Terre, serions-nous en mesure d'y faire face pour éviter le pire?

A priori, trois approches ont donné lieu à de nombreuses réflexions:

- la *destruction*,
- la *dévi*ation,
- le *dé*lai.

Dans le premier cas, la stratégie consisterait à **détruire** la menace, en utilisant une charge nucléaire de grande puissance, afin de pulvériser le bolide et d'éviter la chute d'un fragment énorme sur notre planète. Cette solution, en fait, n'en est pas vraiment une. On déplorerait en effet de nombreux problèmes. D'abord, une charge explosive de puissance phénoménale serait nécessaire. Une telle arme serait difficile à mettre en œuvre. De plus, il ne faut pas perdre de vue que le lancement de véhicules dans l'espace n'est pas encore suffisamment fiable pour prendre un tel risque: n'oublions pas qu'en cas d'accident au lancement, cette charge explosive mettrait elle-même en péril notre planète! Ensuite, l'explosion de la charge sur le géocroiseur pourrait conduire à sa

fragmentation: on se retrouverait, non plus avec un immense objet provoquant un impact dévastateur, mais éventuellement avec une multitude de projectiles susceptibles de conduire à des impacts, d'ampleur certes plus modeste, mais tout de même redoutables. De plus, selon la structure de l'objet, il pourrait même ne pas se produire grand chose au moment de l'explosion. Considérant ces inconvénients majeurs, *l'option de la destruction est a priori écartée.*

La stratégie de **dévi**ation, quant à elle, semble nettement plus prometteuse. Une première approche envisage un impact cinétique avec le bolide: un objet serait lancé à toute vitesse sur l'astéroïde, en vue de lui communiquer une impulsion, un peu à la manière d'un jeu de billard à l'échelle astronomique. Le projectile serait soit un vaisseau terrestre, soit un autre astéroïde passant à proximité, lui-même dévié initialement par un vaisseau terrestre. Dans le cas de l'astéroïde Apophis, il a été établi qu'un vaisseau d'une masse inférieure à une tonne aurait pu dévier le bolide de manière satisfaisante, afin d'éviter un impact avec la Terre. Ce principe est celui qui est exploité dans le projet de mission de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) *Don Quichotte*. Ce projet de mission spatiale consiste en deux vaisseaux. Un premier vaisseau est conçu pour étudier un astéroïde, pendant plusieurs mois. Après cette période d'étude, ce premier vaisseau prend ses distance vis-à-vis de l'objet, et le second vaisseau est propulsé afin d'entrer en collision avec l'astéroïde, avec une vitesse



13. Mission Don Quichotte de l'ESA
(vue d'artiste).

d'environ 10 kilomètres par seconde. Après cette collision, une seconde phase d'étude de l'astéroïde est entamée par le premier vaisseau, afin de mesurer notamment l'effet de l'impact sur sa trajectoire.

Une seconde approche de déviation consiste à déplacer doucement l'astéroïde durant la période nécessaire pour changer significativement sa trajectoire et éviter la collision avec la Terre: c'est la solution du *tracteur gravitationnel*. Ici, on peut notamment utiliser un vaisseau massif équipé de puissants moteurs. Une attraction gravitationnelle mutuelle s'exerce, et la poussée des moteurs peut alors provoquer une légère déviation de la trajectoire de l'astéroïde. Etant donné les grandes distances qui entrent en jeu, une très légère déviation pourrait suffire à forcer le bolide à éviter la Terre.

Enfin, en ce qui concerne l'approche du **dé**lai, l'idée consiste à retarder l'astéroïde afin d'interdire la collision. En effet, pour qu'il y ait impact, il faut que les positions de la Terre de l'astéroïde coïncident à un moment précis. S'il était possible de retarder ne serait-ce qu'un peu le géocroiseur, cette coïncidence serait compromise et la collision n'aurait pas lieu: la trajectoire de l'astéroïde intersecterait l'orbite terrestre alors que la Terre aurait déjà dépassé ce point d'intersection. A priori la plupart des approches de déviation pourraient être exploitées en vue de ralentir légèrement, mais suffisamment, le géocroiseur. La différence entre la déviation et le délai réside dans le fait que la première approche change la trajectoire du bolide, alors que la seconde se contente de réduire légèrement sa vitesse sans modification de trajectoire.

Il apparaît donc que des pistes sérieuses sont envisagées en vue d'agir si une telle menace se concrétisait. A ce jour, aucun système n'est prêt au lancement pour intervenir. Toutefois, grâce à l'efficacité du réseau de surveillance, nous devrions être informés d'une telle menace de nombreuses années à l'avance (du moins pour les astéroïdes), ce qui devrait nous permettre de mettre en oeuvre

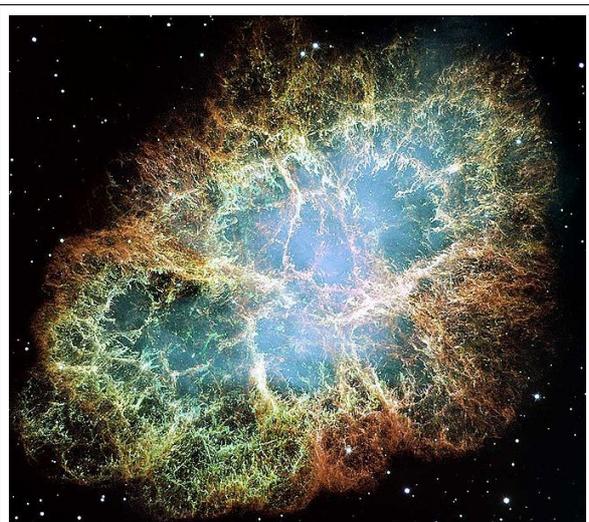
une stratégie de protection efficace en temps opportun.

Pour terminer sur ce sujet, notons que la première conférence mondiale sur la défense planétaire, et en particulier sur la protection vis-à-vis des astéroïdes, a eu lieu à Grenade (Espagne) en avril 2009. D'autres conférences du même type seront organisées à l'avenir, afin de rassembler scientifiques et décideurs politiques, en vue de nous préparer aux menaces d'impact qui nous guetteront dans le futur.

3.2. Les explosions stellaires

Si nous devons dresser un inventaire des phénomènes astronomiques violents, susceptibles d'exercer une influence irrémédiable et spectaculaire sur leur environnement, nous ne pourrions pas négliger les explosions stellaires, parmi lesquelles figurent évidemment les célèbres supernovae. Pour situer ces phénomènes dans leur contexte, quelques notions d'astrophysique stellaire s'imposent.

Les étoiles sont des astres qui ont la particularité de donner lieu, en leur sein, à des réactions de fusion nucléaire. Ces réactions ont essentiellement deux conséquences. Tout d'abord, elles affectent la composition des étoiles, les éléments les plus légers fusionnant pour donner naissance aux éléments plus lourds du tableau périodique. Ensuite, ces réactions nucléaires libèrent de grandes quantités d'énergie, grâce auxquelles elles nous apparaissent si brillantes. Ces étoiles ne sont pas des objets figés. Elles évoluent, et leur évolution est différente selon leur masse. Le Soleil, en tant qu'étoile de masse modeste, évolue différemment des étoiles les plus massives (10 à 100 fois la masse du Soleil). Ces dernières sont celles qui donnent lieu aux réactions nucléaires les plus avancées: leur noyau se transforme jusqu'à former du fer (et dans une certaine mesure du nickel). Au-delà, les réactions de fusion nucléaire ne peuvent se prolonger sans apport d'énergie extérieure, et l'étoile subit alors de lourdes transformations qui la conduisent à sa fin. En effet, le noyau de cette étoile massive se contracte, alors que ses couches extérieures sont violemment expulsées: c'est l'**explosion en supernova!** Dans ce cas spécifique, on parlera même plus précisément de **supernova à effondrement de coeur.**



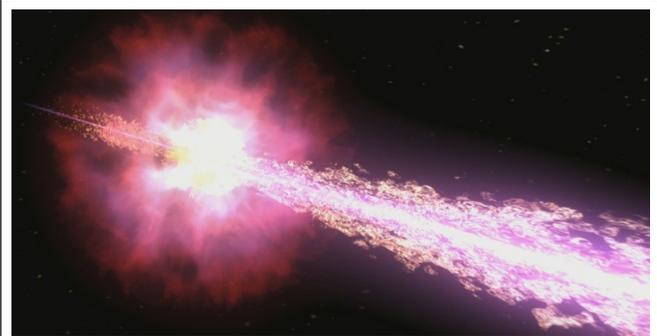
14. Nébuleuse du Crabe.

Ce phénomène s'accompagne toujours d'une libération d'énergie très importante qui se manifeste notamment par un flash lumineux très brillant. Par le passé, plusieurs de ces phénomènes ont été recensés. Par exemple, la supernova SN1054A résulte de l'explosion d'une étoile massive située à environ 6500 années-lumière. L'explosion lumineuse resta visible depuis la Terre, en plein jour, pendant près de 23 jours. Elle demeura visible à l'œil nu en pleine nuit pendant environ 650 jours. Cet événement astronomique a été relaté par de nombreuses civilisations (chinois, japonais, perses...). Le résidu de cette explosion est maintenant connu sous le nom de Nébuleuse du Crabe (voir illustration ci-contre). Indépendamment de la lumière dite *visible* libérée par cette explosion, il faut savoir que d'autres

rayonnements sont émis par une supernova: ultraviolets, rayons X, rayons gamma... Ces derniers sont capables d'influencer considérablement l'écosystème planétaire, s'ils sont suffisamment abondants, mais les estimations actuelles suggèrent que cela ne puisse pas atteindre une ampleur suffisante pour provoquer des cataclysmes du type des extinctions de masse.

Il a été aussi suggéré que le bombardement de la Terre par le flux de neutrinos produits lors de l'explosion puisse occasionner des dégâts à la biodiversité. Mais à l'heure actuelle, il s'agit seulement d'une piste d'étude, qui a priori ne concerne pas les grandes extinctions de masse discutées ici.

Parmi les explosions d'étoiles massives, on distingue une catégorie particulière de phénomène découverte il y a plusieurs années, mais dont le mécanisme n'est pas encore totalement élucidé: il s'agit des **sursauts gamma**. Ce phénomène se manifeste par une soudaine émission de rayonnement très énergétique (rayons gamma), pendant un intervalle de temps très court (rarement plus de quelques secondes), mais avec une intensité prodigieuse. Ce phénomène spectaculaire accompagne vraisemblablement l'effondrement



15. Émission axiale d'un sursaut-gamma (vue d'artiste).

du cœur d'une étoile extrêmement massive. Actuellement, on considère que cette émission très intense de haute énergie se manifeste sous la forme de jets (voir illustration ci-contre), dans la direction de l'axe de rotation de l'étoile. Par exemple, le satellite d'observation Integral (ESA), sensible aux rayons gamma, à lui seul en détecte en moyenne un par jour. Jusqu'à présent, les événements de ce type détectés par les observatoires spatiaux sont extra-galactiques, mais *un tel événement au sein de notre Galaxie n'est pas à exclure*.

Etant donné la violence de ce phénomène, on pourrait se demander *ce qu'il adviendrait de la Terre si elle se trouvait à portée du faisceau destructeur d'un sursaut gamma*. Des études récentes montrent qu'un tel événement survenant à une distance de moins de 10000 années-lumière aurait un effet dévastateur sur la biosphère. L'effet direct du bombardement de l'atmosphère terrestre par les rayonnements de haute énergie (rayons X et gamma) issus de ces explosions est la dissociation et l'ionisation de molécules. De plus, alors que ce rayonnement de haute énergie interagit avec l'atmosphère, il perd de l'énergie, et atteint le sol sous forme de rayonnement ultraviolet. *La face de la Terre orientée vers le sursaut gamma se retrouve donc exposée de façon directe à une grande quantité de rayonnement ultraviolet*. Cette exposition directe est très dangereuse pour les êtres vivants, et ce même si l'événement est de très courte durée.



16. Exposition de la Terre à un sursaut gamma (vue d'artiste).

Toutefois, cet effet n'est pas le plus destructeur, du moins sur le long terme. Comme cela a été dit plus haut, cette interaction du rayonnement de haute énergie avec l'atmosphère conduit à la dissociation des molécules: il s'agit

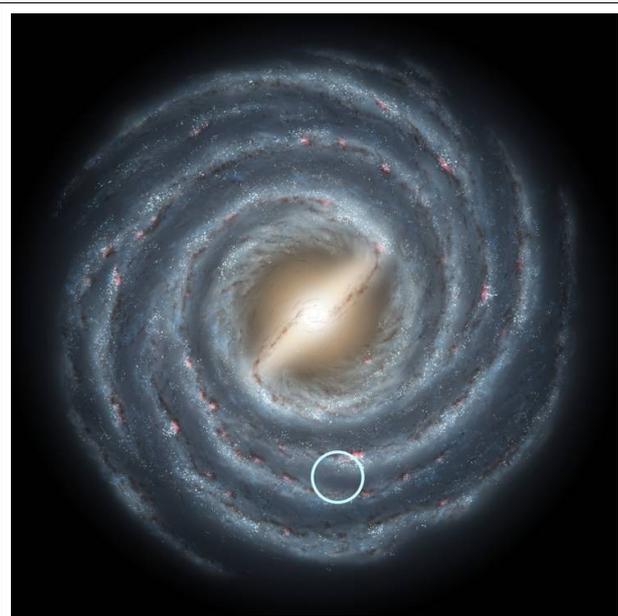
essentiellement de diazote et de dioxygène. Les atomes d'azote réagissent dans l'atmosphère avec les molécules d'oxygène, pour former des oxydes d'azote, souvent désignés par la formule générale NO_x (regroupant NO et NO₂). Ces oxydes sont des catalyseurs pour la destruction de l'ozone. *Un effet important est donc la destruction de la couche d'ozone. En l'absence de cette barrière protectrice d'ozone, la surface de la planète est particulièrement vulnérable au rayonnement ultraviolet issu, cette fois, du Soleil.* Ici, l'effet est nettement plus prolongé, car les NO_x persisteront plusieurs années: ce qui amplifie le caractère destructeur de la catastrophe. Il faut de nombreuses années pour que la couche d'ozone soit restaurée, ce qui laisse aux rayonnement ultraviolet le temps de faire son œuvre. *Sur une telle durée, les vents dominants et la diffusion vont propager les effets atmosphériques du sursaut gamma à la totalité de la planète.* De plus, les oxydes d'azote présents en abondance dans l'atmosphère provoqueront des pluies acides également nuisibles aux espèces tant animales que végétales.

Enfin, un dernier effet, et non des moindres, est à considérer. Le dioxyde d'azote, sous forme d'un gaz brunâtre, absorbe très efficacement le rayonnement visible. Par conséquent, cette couche de molécules opacifiera l'atmosphère vis-à-vis de la lumière du Soleil, mais sans pour autant bloquer le rayonnement ultraviolet. **La Terre sera donc plongée dans l'obscurité, tout en étant irradiée par les UV! Cette obscurité conduira inévitablement à un refroidissement global de la Terre, avec tout ce que cela peut impliquer pour les espèces vivantes.**

L'extinction de l'Ordovicien qui a eu lieu il y a environ 440 millions d'années pourrait avoir été causée par un sursaut gamma. Les relevés géologiques attestent en effet d'un refroidissement global du climat à cette époque. Il existe aussi des indices qui suggèrent que de nombreuses extinctions d'espèces ont eu lieu avant que le refroidissement global de la fin de l'Ordovicien se mette en place. Ceci suggère clairement qu'un événement précurseur au refroidissement s'était produit, et l'irradiation UV consécutive au sursaut gamma est un bon candidat. On note aussi que les espèces qui ont été les plus touchées sont celles qui a priori auraient pu être les plus exposées au rayonnement UV, alors que des espèces occupant des habitats protégés (profondeurs océaniques, par exemple) ont davantage été préservées. Des études supplémentaires sont toutefois en cours afin de préciser cet argument, car d'autres causes d'extinction pourraient également conduire à un résultat similaire, du moins jusqu'à un certain point.

3.2.1. Quel est le risque qu'une explosion stellaire dévaste notre planète?

Tout d'abord, il faut savoir qu'une explosion de l'ampleur d'un **sursaut gamma** ne peut se produire qu'à partir d'une étoile suffisamment massive, et ces étoiles sont aussi les plus rares. Par conséquent, la probabilité qu'une telle étoile se situe à proximité du système solaire est relativement faible. Pour donner une idée, on estime que dans le cas des sursauts gamma, la distance de sécurité est d'environ 8 à 10 mille années-lumière. Cette échelle de distance est illustrée dans la figure ci-dessous, dans laquelle un cercle d'un rayon d'environ 8000 années-lumière représente la zone de danger des sursauts-gamma, centrée sur la position du Soleil. Pour fixer les idées, le diamètre du disque galactique est d'environ 50000 années-lumière.



18. La Voie Lactée, et la zone de danger des sursauts gamma centrée sur le Soleil (vue d'artiste).

Cette grande zone de danger englobe a priori de nombreuses candidates: a priori, des centaines! Mais encore faut-il que ces étoiles donnent lieu à un sursaut gamma, ce qui n'est pas le cas de toutes les étoiles massives. On connaît encore trop peu ce phénomène pour déterminer avec précision si une étoile donnera lieu à ce phénomène ou non. De plus, étant donné que le danger réside essentiellement dans le faisceau relativement étroit de ces explosions, un tel événement dans notre voisinage galactique ne garantit pas qu'une catastrophe aura lieu sur Terre.

On pourrait par contre parler de fréquence de sursaut gamma: autrement dit, discuter de l'intervalle de temps qui, en moyenne, sépare deux sursauts gamma, dans un volume donné de la galaxie. Selon les estimations actuelles, et en fonction des hypothèses adoptées, *cette fréquence pourrait être de l'ordre d'un événement toutes les*

quelques centaines de millions d'années au sein de la zone de danger. Non seulement ce chiffre admet que cela se soit produit dans la zone de danger durant la période où les extinctions de masse ont eu lieu, mais cela suggère également que cela puisse à nouveau se produire. **Et si cela arrivait, nous ne disposerions a priori d'aucun moyen d'action pour nous protéger!**

En ce qui concerne les **supernovae à effondrement de coeur** (donc liées aux étoiles massives), les candidates les plus proches pour une future explosion sont également situées à une distance qui dépasse le rayon de la zone de danger, dont le rayon vaut au plus une centaine d'années-lumière (dans le cas le plus pessimiste). En effet, les étoiles suffisamment massives les plus proches sont à quelques centaines d'années-lumière de la Terre, donc trop loin pour nous menacer.

3.3. L'activité solaire

Même si on ne considère pas à l'heure actuelle que des fluctuations dans l'activité solaire puissent avoir été responsables d'une extinction de masse, ce scénario mérite d'être mentionné. On sait en effet que les espèces vivantes sont particulièrement sensibles au climat. Toute perturbation significative du climat est donc susceptible de perturber la biodiversité. En tant que source d'énergie prépondérante de notre planète, le Soleil est un élément déterminant pour notre climat. Les températures régnant à la surface de la Terre résultent en effet d'un bilan d'énergie, dont la source principale est le Soleil. Toute fluctuation importante de son activité pourra dès lors se répercuter sur le climat, et donc sur les conditions de vie des espèces animales et végétales peuplant la planète.

A titre d'exemple, la période située entre les années 1645 et 1715 a été marquée par un minimum de l'activité solaire, connu sous le nom de « *Minimum de Maunder* », ou encore « petite glaciation ». Ce minimum se serait notamment manifesté par une disparition quasi complète des taches solaires (taches sombres en surface, voir illustration ci-dessus). Cette diminution de l'activité solaire a surtout eu pour effet une diminution du flux de chaleur perçu par la Terre. On appelle *constante solaire* la quantité d'énergie apportée par le Soleil par unité de surface, à une distance correspondant à la distance Terre-Soleil. Cette quantité, en moyenne, vaut 1367 Watts par mètre carré.



19. Soleil avec taches solaires.

Il se pourrait que des variations de l'activité solaire, et donc de la constante solaire, aient contribué au déclenchement de période de glaciation par le passé, conduisant ainsi à une altération du climat susceptible d'influencer la diversité. Toutefois, d'autres facteurs semblent impliqués de manière plus décisive dans l'apparition de ces périodes de glaciation. **A ce jour, l'activité solaire ne semble pas à l'origine d'extinctions significatives d'espèces vivantes par le passé.**

4. Conclusions

A l'heure actuelle, les connaissances que nous avons réunies nous permettent d'affirmer que ***des cataclysmes d'origine astronomique peuvent jouer un rôle prépondérant dans l'évolution de la diversité des espèces sur notre planète.*** Par le passé, des événements bouleversants pour le monde du vivant, à savoir les extinction de masse, ont jalonné l'évolution des espèces. Dans la plupart des cas, même si des incertitudes subsistent, des faits astronomiques identifiés constituent des bons candidats quand à la cause de ces grandes extinctions. Ces cataclysmes sont en effet responsables de la disparition de nombreuses familles d'espèces, ce qui constitue des pertes irréversibles pour la biodiversité. En revanche, ces disparition massives ont permis à d'autres familles de se développer, et ainsi de coloniser la Terre. Par exemple, on parle beaucoup de la disparition des dinosaures en raison d'un impact de météorite, mais on parle moins de l'extinction précédente qui a permis notamment à ces mêmes dinosaures de se développer suite à la disparition d'autres espèces, ou encore de l'opportunité engendrée par la disparition des dinosaures pour la domination de notre planète par les mammifères, parmi lesquels on trouve les ancêtres de l'espèce humaine.

**« La question de la biodiversité est donc une question scientifique complexe,
qui doit être abordée en tenant compte d'une multitude de facteurs, y compris des éléments extérieurs à notre Terre. »**

Jusqu'à présent, *les impacts de météorites massives semblent être les candidats les plus fréquemment évoqués, et dans au moins un cas le faisceau très énergétique associé à une explosion stellaire (sursaut gamma) est considéré avec le plus grand sérieux.* Si de telles catastrophes ont ponctué l'évolution de l'écosystème planétaire, il ne faut pas exclure que de tels événements se produisent encore à l'avenir, provoquant ainsi la disparition de nombreuses espèces, mais aussi

l'émergence de nouvelles familles. Toutefois, il ne faut pas s'effrayer à outrance, et réaliser que les probabilités que cela se produise de notre vivant sont infimes. Et *en ce qui concerne les géocroiseurs, une surveillance acharnée est en cours, et des pistes d'intervention sont sérieusement à l'étude.*

Finalement, même s'il est question ici des origines de grandes extinctions, il ne faut pas négliger les causes purement terrestres et leur rôle majeur dans l'évolution future de la biodiversité. Pour s'en convaincre, il faut réaliser que notre planète est vraisemblablement en train de connaître un nouvel épisode d'extinction de masse, une **Sixième Grande Extinction**. Et dans ce cas précis, ce ne sont ni les géocroiseurs ni les étoiles qui sont à montrer du doigt. Le responsable est bien identifié... c'est l'*Homme*.

Références

Ci-dessous, une liste non-exhaustive de sources d'information est proposée. Ces sources constituent des débuts de piste de recherche d'informations complémentaires, utiles pour prolonger la discussion.

Internet:

Extinctions:

- http://en.wikipedia.org/wiki/Mass_extinction
- http://jcboulay.free.fr/astro/sommaire/astronomie/univers/galaxie/etoile/systeme_solaire/terre/extinction/page_extinction.htm

Grands impacts:

- http://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid_mitigation_strategies
- http://en.wikipedia.org/wiki/Comet_Shoemaker-Levy_9

Explosions stellaires:

- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Supernova>
- http://fr.wikipedia.org/wiki/Sursaut_gamma

Activité solaire:

- <http://en.wikipedia.org/wiki/Sunspot>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Maunder_minimum

Articles:

- « Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction? », A.L. Melott et al., International Journal of Astrobiology, vol.3, 55-61 (2004): <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0309415>
- « Gamma-ray bursts and the Earth: exploration of atmospheric, biological, climatic and biogeochemical effects. », B.C. Thomas et al., The Astrophysical Journal, vol.634, 509-533 (2005): <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0505472>

Livre:

- « La Sixième Extinction », Richard E. Leakey et Roger Lewin, Flammarion (1999)

Droits des illustrations:

1. © <http://www.ggl.ulaval.ca/>
2. © <http://www.ggl.ulaval.ca/>
3. © <http://c.coupin.free.fr>
4. © <http://fr.wikipedia.org>
5. © Mark A. Gonzalez, NDGS
6. © <http://en.wikipedia.org>
7. © Roen Kelly & the University of Texas
8. © NASA
9. © Hubble Space Telescope Comet Team and NASA
10. © Nicolas Biver
11. © NASA, JPL
12. © <http://fr.wikipedia.org>
13. © ESA
14. © NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University)
15. © <http://svs.gsfc.nasa.gov/>
16. © <http://www.techno-science.net>
17. © STScI
18. © PASP
19. © <http://commons.wikimedia.org>