

Georges-Louis Leclerc, le comte de Buffon : des forges à l'astrophysique de laboratoire

Émeric Falize¹, Lionel Markus², Loraine Gallet², Charlotte Teyssier², Emmanuelle Vernhet²

¹CEA-DAM-DIF, F-91297, Arpajon, FRANCE

²Musée Buffon, Place Jacques Garcia – 21500 MONTBARD

Le village de Buffon abrite un lieu fascinant dont les pierres renferment l'histoire d'une révolution scientifique. Ce lieu, la Grande Forge, a été érigé au milieu du XVIII^e siècle par Georges-Louis Leclerc, le comte de Buffon (1707-1788). Le « Pline de Montbard », tel qu'il était surnommé, est surtout connu pour avoir composé une œuvre encyclopédique, « l'Histoire naturelle générale et particulière ». Par sa plume précise et rigoureuse, Buffon décrit tout ce qui compose la Nature et qui s'offre aux regards contemplatifs. Pendant que Buffon écrit son Histoire de la Nature, il se laisse distraire, pendant plusieurs centaines de pages, par le chant d'Uranie. Ceci l'amène, malgré lui, à s'intéresser à l'astronomie et à réaliser des expériences mystérieuses dans des forges. C'est dans le refroidissement de boulets de différentes compositions chimiques qu'il détermine le passé, le présent et le futur du Système solaire. Ce travail est un trait d'union entre son texte « De la formation des planètes » de 1749 et son très fameux « Des époques de la Nature » de 1778. Les séries d'expériences des boulets constituent une véritable révolution scientifique. En effet, pour les concevoir, Buffon a utilisé, pour la première fois, tous les concepts qui fondent notre astrophysique expérimentale moderne.

Introduction

Buffon (voir figure 1) a marqué l'histoire des sciences grâce à la rédaction de son œuvre monumentale *l'Histoire naturelle générale et particulière* dont l'écriture l'aura occupé une quarantaine d'années de sa vie. Lorsqu'il se lance dans cette entreprise, l'âge de la Terre est estimé à environ 6 000 ans.



Fig.1. Portrait de Georges-Louis Leclerc, le comte de Buffon par François-Hubert Drouais (1761), Musée Buffon.

Ceci l'amène dès l'ouverture de son texte *De la formation des planètes* de 1749, à traiter quelques

questions d'astronomie afin de définir dans quel décor et sur quelle durée vont progresser les différents acteurs de la nature. Même s'il ne souhaite introduire que des propos généraux, son raisonnement l'amènera à bâtir un nouveau modèle de formation du Système solaire. Le fondement de ce dernier est fortement influencé par les travaux de Newton sur les comètes. Le savant anglais s'est beaucoup intéressé à la physique de la comète de 1680. Il faut dire que celle-ci avait fait couler beaucoup d'encre, tant sur le folklore¹ que pouvait encore provoquer le passage d'une comète au XVII^e siècle, que sur la physique de ces visiteuses occasionnelles. Dans cette période, on s'interroge beaucoup sur la capacité des comètes à emmagasiner la chaleur ardente du Soleil lors de leur passage à leur périhélie. Buffon connaît parfaitement les conclusions de Newton sur ces questions. Elles le guideront dans la justification de ses expériences qui ont pour objectif de déterminer l'âge de la Terre.

Dans la première partie de cet article, nous décrivons le modèle de formation du Système solaire de Buffon.

¹ Dans le palais de Maximis à Rome, la Reine de Suède vit un prodige le 4 décembre 1680. En effet, elle rapporte qu'en ce jour d'hiver 1680, une poule pondit un œuf marqué par la figure de la comète. Ces observations sont envoyées aux curieux de Paris sous la forme d'une note accompagnée d'une représentation de l'œuf en question. Dans un genre différent, W. Whiston pense que la comète de 1680 est responsable du Déluge. En utilisant la périodicité de cet objet, il date cet événement biblique du 28 novembre 2349 avant J. C.

Nous montrerons alors comment celui-ci l'a guidé dans l'élaboration d'une expérience pour déterminer l'âge de la Terre ainsi que l'âge du Système solaire. Nous décrivons, dans la seconde partie, la première série d'expériences réalisée sur les boulets de fer. Puis, dans la troisième partie, nous détaillerons la deuxième série d'expériences qui lui permettra de préciser ses résultats. Dans la dernière partie, nous montrerons la modernité du raisonnement de Buffon et comment il a posé toutes les bases de l'astrophysique de laboratoire. En réalisant la première expérience d'astrophysique de laboratoire de l'histoire des sciences Buffon a fait de sa Grande Forge le premier laboratoire de planétologie expérimental.

Le système du monde de Buffon : l'origine du Système solaire

En ce milieu du XVIII^e siècle, l'astronomie cherche à répondre à plusieurs questions concernant le Système solaire : l'origine de l'impulsion primitive des six planètes connues² et la raison qui explique que toutes les planètes tournent dans le même sens et dans un même plan (à 7,5° près). Sur ces deux derniers points, Buffon se convainc, à la suite d'un calcul de probabilité, que ces propriétés dynamiques ne peuvent pas être le fruit du hasard et qu'elles doivent avoir une origine commune. Il propose alors un modèle cosmogonique unificateur. Dans celui-ci les planètes du Système solaire résulteraient de l'impact d'une comète avec le Soleil. La violence de la collision aurait mené au détachement de 1/650^e de la masse du Soleil. Les planètes prendraient naissance de ce torrent solaire par gravitation. La chaleur intérieure des planètes devient un résidu de la chaleur originelle du Soleil. Si on sait, aujourd'hui, que ce modèle ne décrit pas la formation des systèmes planétaires, notons qu'il inspirait encore certains astronomes au début du XX^e siècle. En effet, le *Tidal model*, proposé par J. H. Jeans en 1920 s'inspirait fortement du scénario de Buffon. À la place de la collision de la comète, J. H. Jeans propose que ce soit un effet de marée provoqué par le passage d'une étoile à proximité du Soleil qui arrache de la matière à ce dernier. Pour justifier la collision, Buffon utilise des travaux de Newton sur l'origine de la perte d'impulsion des comètes au passage de leur périhélie.

Afin de s'éviter la censure et les foudres de la Sorbonne, Buffon ouvre son texte *De la formation des planètes* par une gravure allégorique (voir la

² Rappelons qu'Uranus sera découverte en 1781. Par conséquent, lorsque Buffon écrit son texte, le Système solaire s'arrête à Saturne et à ses cinq satellites.



Fig.2. Allégorie de la formation des planètes ouvrant le chapitre de la formation des planètes de l'Histoire naturelle de Buffon, tome I, 1749.

figure 2) sur laquelle on retrouve tous les éléments de son modèle scientifique (comète, collision, mouvement et formation des planètes) auxquels se superposent une lecture plus religieuse.

Le modèle de Buffon est immortalisé dans *l'ode à M. de Buffon* écrit par Ponce-Denis Ecouhard Le Brun en 1779 dans laquelle on peut lire :

O Génie ! [...]

Ton œil vit s'élancer la Comète brûlante

Qui de la Sphère ardente

A détaché ce Globe autrefois radieux.

Buffon comprend que s'il est capable de déterminer le temps qu'a mis la Terre pour passer de la température du Soleil à sa température actuelle alors il accèdera à son âge. Si Newton a réalisé des travaux théoriques sur le refroidissement de sphères de fer de la taille de la Terre et des comètes, Buffon souhaite étudier expérimentalement ce problème. Pour cela il doit accéder à des systèmes qui permettent de soumettre la matière à des températures extrêmes. L'installation technologique qui permet une telle prouesse existe. C'est le début de l'aventure des forges pour Buffon.

L'aventure de la Grande Forge de Buffon et les expériences sur les boulets de fer

C'est dans une lettre datée du 8 octobre 1767 adressée à Guéneau de Montbeillard que Buffon fait mention de « forges » pour la première fois. En tant que structures stratégiques pour l'État, la construction d'une forge nécessite l'autorisation du Roi. C'est chose faite pour Buffon au début de 1768. Il compte bien rendre rentable sa Grande Forge (figure 3), mais aussi l'utiliser comme un laboratoire qui nourrira ses travaux sur les minéraux.



Fig.3. La grande Forge de Buffon.

Buffon travaille alors à son expérience visant à mimer le refroidissement de la Terre et qui permettra de déterminer l'âge de celle-ci. Si de nombreuses expériences ont été réalisées dans la Grande Forge, il est difficile de savoir où a eu lieu la toute première d'entre elles. Un faisceau d'indices (quelques lettres, des correspondances, la date de l'édition du tome de l'*Histoire naturelle* contenant les résultats d'expériences) nous poussent à penser que la première expérience a eu lieu en 1767, un an avant que le Roi ne permette à Buffon de construire sa propre forge. Plusieurs pistes peuvent être envisagées : la forge d'Aisy-sur-Armençon à quelques kilomètres du village de Buffon, une autre à Montbard en place du Petit Fontenet, en face de son hôtel particulier... Nous poursuivons nos recherches.

Buffon nous livre un descriptif très précis du protocole expérimental qu'il a élaboré. Il a fait fabriquer une série de dix boulets de fer forgé et battu de différentes tailles allant de $\frac{1}{2}$ pouces (1,35 cm) à 5 pouces (13,5 cm). Les masses de ces boulets varient entre 190 grains (10 g) pour le plus petit et 190211 grains (10 kg) pour le plus grand. Ces boulets sont plongés dans le feu ardent d'un haut-fourneau pendant un temps dûment rapporté.

Une fois sortis du haut-fourneau, il laisse refroidir les boulets et deux durées sont relevées : celle à partir de laquelle le boulet chaud est supportable

pendant une demi-seconde sans se brûler et celle à partir de laquelle le boulet refroidi est à la température d'un boulet de référence maintenu à la température des caves de l'Observatoire de Paris, c'est-à-dire à dix degrés de Réaumur au-dessus de la congélation (environ 12,5 °C). L'impossibilité d'utiliser un thermomètre pour mesurer les degrés de refroidissement des boulets mène Buffon à utiliser un outil de mesure thermométrique très personnel, ses propres mains³.

Les deux durées sont méticuleusement rapportées dans le premier tome des *Suppléments*. La première durée lui permettra de déterminer l'époque à partir de laquelle la vie peut exister, la seconde lui donnera directement accès à l'âge de la Terre. Sur la figure 4, nous avons reporté graphiquement les résultats publiés par Buffon.

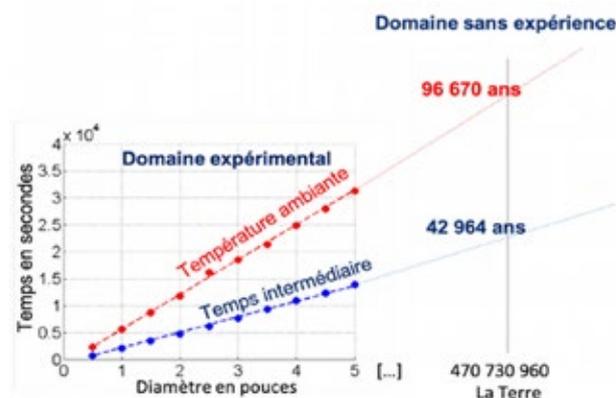


Fig.4. Les résultats de Buffon.

La courbe bleue correspond à la première durée et la courbe rouge à celle de la seconde durée. À cette première expérience il en adjoindra une seconde qui a pour but de déterminer le temps de solidification du fer liquide. Celle-ci consiste en l'étude de la solidification d'une barre de fer initialement liquide.

Dans son esprit, à l'origine, la Terre est sous forme liquide. Elle doit donc se solidifier lors de son refroidissement avant d'atteindre sa température actuelle. La première expérience ne lui permettait que d'accéder au temps de refroidissement de la Terre une fois solidifiée. Ainsi à la durée de refroidissement des boulets, il doit ajouter la durée de solidification (voir figure 5).

³ La légende veut que Buffon n'ait pas réalisé seul les expériences. Dans *Vie privée du comte de Buffon* publié en 1788, le Chevalier d'Aude écrira que pour deviner l'époque de la formation des planètes et calculer le refroidissement du globe terrestre, il employait le ministère de quatre ou cinq jolies femmes à la peau douce.

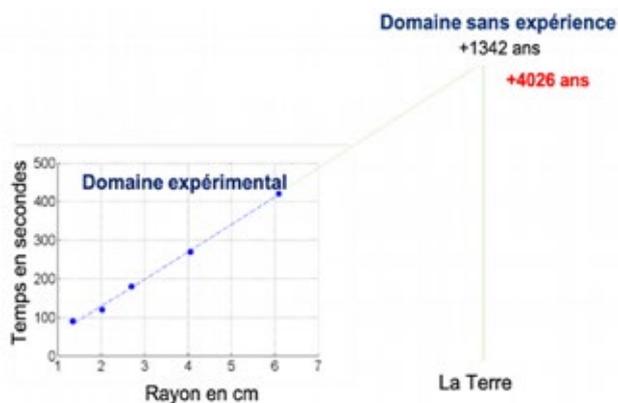


Fig.5. Temps de solidification d'une gueuse de fer et extrapolation au rayon de la Terre. La figure de droite représente les deux durées de refroidissement mesurées par Buffon et leur extrapolation aux dimensions de la Terre.

On peut noter que l'ensemble des mesures expérimentales montre des relations linéaires entre temps et dimension de l'objet étudié. L'extrapolation aux dimensions de la Terre donne les résultats suivants : un temps de solidification de 4026 ans⁴ pour que le cœur de la Terre passe de l'état liquide au solide, 46 990 ans (42 964 + 4 026) pour que la surface de la Terre puisse être supportable une demi-seconde, et 100 696 ans (96 670 + 4 026) pour qu'elle atteigne sa température actuelle.

Ainsi si la Terre n'était constituée que de fer, elle aurait un âge de 100 696 années. Buffon sait que sa maquette de fer n'est pas tout à fait représentative de la composition réelle de la Terre. C'est à cet instant qu'il imagine une deuxième série d'expériences.

Les expériences sur les boulets de différentes natures

Pour créer une Terre miniature plus représentative, Buffon réalise une seconde série d'expériences. Celle-ci est rarement citée dans les écrits sur les expériences de Buffon. Pourtant elle est tout aussi importante que celle sur les boulets de fer. Cette deuxième série consiste en l'étude du refroidissement de boulets de composition chimique différente, tous d'un pouce de diamètre. Ces travaux l'occuperont pendant six années au cours desquelles il réalisera 67 expériences toutes répétées trois fois. Pour chacune d'elles, il relèvera de nouveau les deux durées présentées dans la précédente partie. Plusieurs dizaines de pages de calculs lui permettront de publier le tableau de synthèse présenté sur la figure 6

⁴ La valeur de cette durée a fait l'objet de nombreuses estimations de la part de Buffon. Si les résultats expérimentaux lui donnent 1342 ans comme on peut le voir sur la figure 5, il aboutira à une durée de 4026 ans en prenant en compte différentes perturbations extérieures (rotation de la Terre ...).

qui consiste en un tableau de proportionnalité dans lequel les deux durées mesurées pour chaque matériau sont rapportées à celui du fer, qui est renormalisé à 10 000 en unité (de temps) arbitraire.

F E R		
	Petites solidifications.	Extrapolation.
Émeril.....	10000 à 9117	9020.
Cuivre.....	10000 à 8512	8702.
Or.....	10000 à 8160	8148.
Zinc.....	10000 à 7614	6020.
Argent.....	10000 à 7619	7423.
Marbre blanc.....	10000 à 6774	6704.
Marbre commun.....	10000 à 6636	6746.
Pierre calcaire dure.....	10000 à 6617	6274.
Grès.....	10000 à 5796	6926.
FER &	10000 à 5576	5805.
Plomb.....	10000 à 5143	6482.
Étain.....	10000 à 4898	4921.
Pierre calcaire tendre.....	10000 à 4194	4659.
Glaife.....	10000 à 4198	4490.
Bismuth.....	10000 à 3580	4081.
Craie.....	10000 à 3086	3878.
Gyps.....	10000 à 2325	2817.
Bois.....	10000 à 1860	1549.
Pierre ponce.....	10000 à 1627	1268.

Fig.6. Tableau de synthèse des résultats.

Pour construire sa Terre miniature, Buffon ne gardera que sept éléments qu'il considère majoritaires sur Terre : l'émérid, le marbre blanc, le marbre commun, la pierre calcaire dure, le grès, le verre et le fer. Pour passer d'une Terre constituée de fer à sa Terre réelle (composée des sept éléments), il corrigera les durées obtenues de la première série d'expériences par un coefficient multiplicatif résultant de la somme arithmétique des durées renormalisées obtenues pour les sept éléments conservés. Ainsi, il conclura que le globe terrestre s'est consolidé en 2 905 ans, qu'il s'est refroidi au point de pouvoir le toucher en 33 911 ans (au lieu des 46 990 années dans le cas d'une Terre de fer) et à la température actuelle en 74 047 ans (au lieu de 100 696 ans). Il corrigera ces durées de la chaleur apportée par Le Soleil (+ 770 ans) et de celle de la Lune (+15 ans). Ce qui l'amène à publier un âge de la Terre et du Système solaire de 74 817 ans. Malgré un âge supérieur à celui de la Bible, celui-ci ne lui paraît pas suffisamment élevé pour expliquer toutes les évolutions géologiques qu'il a observées dans la Nature. Il conclura alors : « Quoiqu'il soit très vrai que plus nous étendrons le temps et plus nous nous rapprocherons de la vérité et de la réalité de l'emploi qu'en fait la Nature, néanmoins il faut le raccourcir autant qu'il est possible pour se conformer à la puissance limitée de notre intelligence. » La voie de la détermination expérimentale de l'âge de la Terre est lancée. Dans la version manuscrite de la deuxième Époque de la nature, on peut relever l'hésitation de

Buffon quant à la pertinence des résultats obtenus. En effet, sous les ratures du document, on peut lire des millions d'années à la place des milliers d'années publiées. Entre l'intuition qu'il pouvait avoir et le résultat de l'expérience de physique, en homme des Lumières, il préférera le résultat de l'expérience à celui de l'intuition. Ce sont les milliers d'années de l'expérience qui composeront la version imprimée des Époques de la nature.

Buffon et les fondements de l'astrophysique de laboratoire

Même si nous savons aujourd'hui que le modèle de formation du Système solaire de Buffon n'est pas correct, que la taille des boulets ne lui permettait pas d'obtenir les bonnes lois d'extrapolation pour la Terre, que le mécanisme de refroidissement des planètes n'est pas le bon ou encore que ses terres miniatures chauffées dans les forges n'étaient pas représentatives des planètes, on peut tout de même être admiratif face à l'audace et à l'extraordinaire modernité du raisonnement du savant des Lumières. En effet, l'ensemble du cheminement intellectuel que nous utilisons aujourd'hui pour concevoir nos expériences d'astrophysique de laboratoire est le même que celui du Seigneur de Montbard. Rappelons que l'astrophysique de laboratoire est née en tant que discipline autonome à la fin du XX^e siècle avec le développement des nouvelles installations technoscientifiques telles que les lasers de puissance (figure 7).

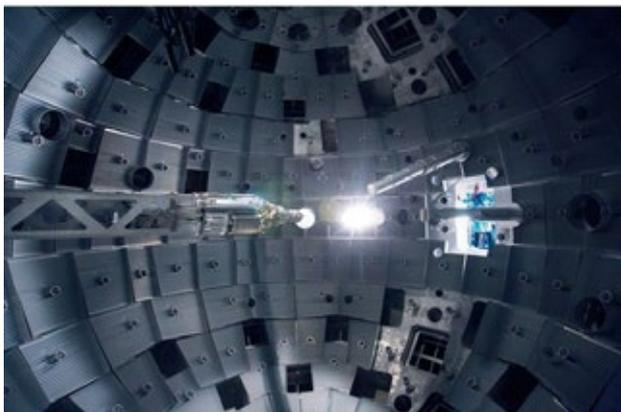


Fig. 7. Chambre d'expériences du laser mégajoule.

Autour de ces installations s'est développé tout un ensemble de projets *astro-inspirés* ou d'*astromimétisme* dans lesquels on cherche respectivement à s'inspirer des phénomènes astrophysiques à des fins technologiques ou à en reproduire des miniatures pour mieux les comprendre. Une fois les lois d'échelle élaborées et

les cibles fabriquées, nous les soumettons non pas à la chaleur des forges mais aux hautes densités d'énergie extrêmes générées au cœur des installations de puissance. C'est ainsi qu'aujourd'hui, nous étudions l'intérieur des planètes géantes pour en comprendre la structure ou encore que nous reproduisons les conditions thermodynamiques qui règnent au cœur des étoiles. Sans le savoir et uniquement par un raisonnement logique, Buffon a posé toutes les briques élémentaires qui permettent de construire une astrophysique expérimentale. Même si l'expérience de Buffon nous paraît, aujourd'hui, naïve, elle nous apprend que pour qu'une expérience réponde à une véritable problématique astrophysique et qu'elle ne soit pas une *illusion liliputienne*, il faut maîtriser parfaitement la physique de base du phénomène que l'on cherche à reproduire. C'est dans ce sens que l'astrophysicien est bachelardien (G. Bachelard, *la Poétique de l'espace*) puisqu' « il possédera d'autant mieux le monde qu'il sera habile à le miniaturiser. »

Conclusion

L'histoire de l'âge de la Terre est aujourd'hui au programme des lycées. Il y est enseigné que l'expérience de Buffon est marquante dans l'histoire des sciences car il s'agit de la première visant à déduire d'un raisonnement scientifique l'âge de la Terre. Buffon a ouvert la longue histoire qui a permis de déterminer l'âge moderne de la Terre que l'on estime aujourd'hui à un peu plus de 4,5 milliards d'années.

À travers cet article nous avons souhaité montrer que les conséquences épistémologiques de cette expérience dépassent celles associées à l'histoire de l'âge de la Terre. En effet à travers l'élaboration de son expérience, Buffon a été le premier savant à poser le raisonnement rigoureux qui permet de faire de l'astrophysique de laboratoire. Cette découverte a motivé les auteurs de cet article à tenter de reproduire en 2022 les expériences de Buffon dans le cadre du projet BUFFON2022 au Musée et Parc Buffon (<http://www.musee-parc-buffon.fr>), avec le soutien de la ville de Montbard.

En attendant les résultats de cette expérience, lorsque vous pousserez les grilles de la Grande Forge de Buffon, n'oubliez pas que vous entrez dans le premier laboratoire d'astrophysique expérimentale de toute l'Histoire des sciences.

■