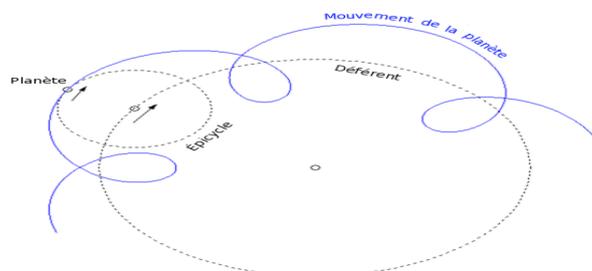


Présentation de quelques théories et expériences scientifiques

Il s'agit de présenter sous une forme délibérément simplifiée quelques théories, découvertes et expériences relevant des sciences de la nature. Car il n'est pas possible de réfléchir sur la science sans avoir en tête un certain nombre de cas pouvant servir à illustrer des débats sur la manière dont la science procède. Ces exemples reprennent parfois et complètent ceux que vous aurez pu déjà rencontrer dans votre lecture du livre d'Hemple, *Eléments d'épistémologie*.

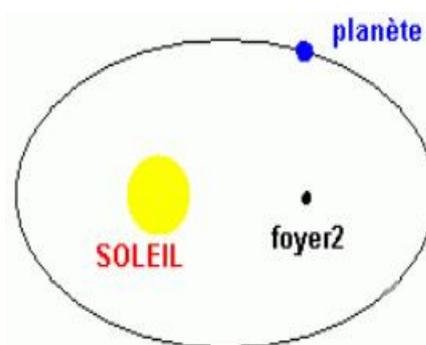
1) Astronomie : le mouvement des astres (géocentrisme et héliocentrisme)

La presque totalité des astronomes de l'Antiquité pensaient que la Terre était fixe et que les autres astres, y compris le soleil, tournaient autour de la Terre : on parle de théorie *géocentriste*. Ils essayaient d'expliquer le mouvement apparent des planètes en faisant l'hypothèse qu'elles avaient des mouvements circulaires. Pour que leurs hypothèses permettent de justes prédictions, ils devaient combiner de façon complexe plusieurs mouvements circulaires (épicycle et déferent) pour une seule et même planète (cf. figure ci-contre).



À l'époque moderne, c'est-à-dire à partir des XVI^e et XVII^e siècles, les astronomes commencent à penser, peu à peu en majorité, que les planètes tournent autour du soleil : on parle de théorie *héliocentriste*. Le premier à défendre cette position à l'époque moderne est Copernic (1473-1543), un astronome polonais. Cependant, Osiander, le prêtre qui a rédigé la préface de son célèbre ouvrage *De la révolution des orbés célestes*, a soutenu que la théorie de Képler devait simplement être comprise comme proposant un système hypothèses permettant de simplifier la théorie et de réaliser des prédictions plus exactes. C'est un point de départ de l'opposition entre des interprétations réalistes et instrumentalistes de la science.

En outre, à partir de Képler, astronome allemand, ils soutiennent que les planètes suivent des orbites *elliptiques* et que le soleil est l'un des foyers de ces ellipses (cf. figure ci-contre).



2) Mécanique : la loi de la chute des corps

De l'Antiquité jusqu'à la fin du Moyen-Âge, c'est la physique élaborée par Aristote (philosophe grec ayant vécu de – 384 à – 322) et ses successeurs qui a dominé. En mécanique, partie de la physique qui traite du mouvement des corps, les aristotéliens (les partisans de la doctrine d'Aristote) soutenaient, entre autres, comme le suggère l'expérience immédiate, que la vitesse de la chute d'un corps dépend de sa masse (ou de son poids). Autrement dit, selon eux, un boulet de canon en plomb devrait tomber plus vite qu'une petite bille de plomb.

Galilée (physicien, mathématicien et philosophe italien, 1564-1642) a montré que cette conception est erronée. En réalité, *dans le vide*, la vitesse de la chute d'un corps est indépendante de sa masse : la vitesse ne dépend que du temps de la chute et varie en fonction du carré du temps (t^2).

Pour essayer de confirmer sa théorie, Galilée a conçu une expérience. Il a pensé à faire rouler des boules de plomb de différentes masses sur des glissières soigneusement polies ayant une inclinaison variable (sortes de toboggans) et à mesurer leur vitesse après un certain temps de chute. Le but de l'expérience est de se rapprocher le plus possible des conditions du vide, en évitant au maximum les frottements qui faussent les mesures. Ses résultats, quoiqu'imparfaits, ont semblé confirmer son hypothèse. L'accélération progressive des boules qui tombent se révèlent être proportionnelle au carré du temps de chute (t^2). Autrement dit, au bout de 2 secondes, la boule va 4 (= 2×2) fois plus vite ; au bout de 8 seconde, elle va 64 (= 8×8) fois plus vite, etc.

Si, dans la réalité, un boulet de canon en plomb tombe plus vite qu'une bille en plomb, c'est parce que les frottements de l'air ralentissent davantage la bille que le boulet.

3) Mécanique : la découverte du principe d'inertie et son enjeu, le mouvement de rotation de la Terre sur elle-même

a) L'explication du mouvement selon les aristotéliens

Les aristotéliens soutenaient tout d'abord qu'il fallait distinguer entre les corps dit « graves » (c'est-à-dire lourds) et les corps « légers ». L'expérience suggère que les uns tombent vers la terre, tandis que les autres, comme la fumée, s'élèvent vers le ciel.

Cependant, même des corps graves peuvent prendre un mouvement qui les fait monter vers le ciel, par exemple lorsqu'on lance un objet quelconque en l'air. C'est pourquoi ils affirmaient qu'il fallait distinguer pour les corps graves entre leur mouvement « naturel », c'est-à-dire conforme à la tendance inscrite en eux, qui est de tomber vers le centre de la terre et les mouvements « violents », où ils peuvent s'éloigner du centre de la terre pour un temps sous l'effet d'une cause quelconque.

Enfin, les aristotéliens croyaient qu'un corps ne pouvait se mettre en mouvement et y rester que s'il était mû, c'est-à-dire poussé par un autre corps, qualifié pour cette raison de « moteur ». Là aussi, à première vue, leur théorie semble bien s'accorder avec l'expérience. Par exemple, une balle peut être mise en mouvement parce que notre main la jette ; selon eux, si la balle retombe au bout d'un moment, c'est parce que, n'étant plus en contact avec la main, elle perd le mouvement violent initial et reprend son mouvement naturel, c'est-à-dire tend vers son lieu naturel, le centre de la Terre.

b) Le principe d'inertie

À l'époque moderne, les physiciens, comme Galilée ont découvert que c'était une erreur. Selon eux, dans un référentiel donné, un corps ponctuel qui est en mouvement rectiligne uniforme (c'est-à-dire un mouvement en ligne droite et à vitesse constante) reste en mouvement rectiligne uniforme, aussi longtemps qu'une force ne vient pas perturber ce mouvement. C'est une première formulation du principe d'inertie.

Ainsi, si la balle retombe, c'est parce que l'équilibre des forces a été rompu. Avant le lancé, la balle est soumise à deux forces égales qui s'annulent entre elles : le poids (résultant de la masse du corps et de la force gravitation de la Terre) et la « réaction » de la main empêchant l'objet de tomber. Lorsqu'elle est lancée, cet équilibre est rompu, car le mouvement de la main vers le haut vient exercer une force nouvelle. De même, lorsque la balle se met à chuter, elle n'est plus soumise à la force de la main qui la retenait, mais à d'autres forces, comme la gravitation terrestre et les frottements de l'air. Autre exemple : si un ballon de football dans lequel on a tapé ne roule pas indéfiniment, c'est parce que des forces de frottements s'exercent sur lui qui, peu à peu le ralentissent.

c) L'expérience de l'objet lâché du haut du mât d'un bateau en mouvement

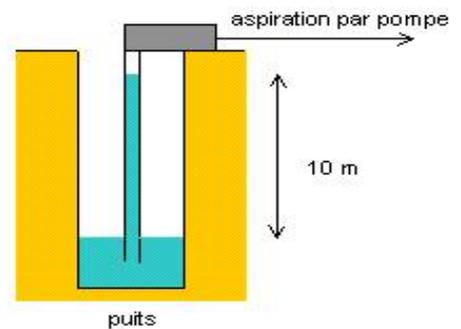
Quelle expérience a permis aux partisans de Galilée de falsifier la théorie aristotélienne sur ce point ? Ils ont fait lancer un objet du haut du mât d'un bateau. Selon leurs hypothèses, les aristotéliens prédisaient que l'objet devait tomber loin du pied du mât, c'est-à-dire éventuellement dans l'eau et non sur le bateau, si celui-ci avance vite. Selon leurs hypothèses, les partisans de Galilée prédisaient que l'objet devait tomber au pied du mât, quoi qu'il arrive. En effet, par rapport à la rive du fleuve (référentiel ici choisi pour définir le mouvement), le bateau et l'objet tenu dans une main en haut du mât ont le même mouvement rectiligne uniforme. Aucune force ne vient stopper ou ralentir ce mouvement lorsque l'objet est lâché (sinon les frottements de l'air qui peuvent être considérés comme négligeables si l'objet est d'une masse suffisante et d'une surface réduite). En vertu du principe d'inertie, il doit donc continuer à se déplacer à la même vitesse que le bateau par rapport à la rive et donc tomber au pied du mât.

d) Réfutation d'une preuve contre l'idée que la Terre tourne sur elle-même

Cette expérience a été très importante, car elle a permis de réfuter un des principaux arguments contre l'idée que la Terre tourne sur elle-même. En effet, les aristotéliens faisaient un raisonnement analogue à celui du bateau sur le cas de la terre : ils affirmaient que l'expérience permettait de constater que, si on lâchait un objet du haut d'une tour élevée, celui-ci tombait à son pied ; or, selon eux, si la terre tournait sur elle-même (à environ 1600 km/h), l'objet devrait tomber à certaine distance du pied (environ à 500 mètres si l'objet mettait 1 seconde à tomber). Cet argument semblait fournir une preuve très solide. Mais, suite à l'expérience de l'objet lâché du haut d'un mât d'un bateau en mouvement qui tombe au pied du mât, les partisans de Galilée n'ont pas eu de mal à réfuter cette « preuve » en apparence si forte. Le principe d'inertie permet de comprendre que l'objet lâché du haut de la tour continue d'avoir le même mouvement de rotation uniforme que celui de la terre, bien qu'il ait été lâché par la personne qui le tenait en haut de la tour.

4) La découverte de la pression atmosphérique : l'hypothèse et l'expérience de Torricelli

Lorsque Kant dit que « *Torricelli fit supporter à l'air un poids qu'il avait d'avance conçu comme égal à celui d'une colonne d'eau connue de lui* », il fait référence aux travaux de Torricelli (mathématicien et physicien italien, 1608-1647) sur la pression atmosphérique. À Florence, dans les années 1640, les fontainiers ont une unique préoccupation : réussir à aspirer l'eau à plus de 10,33m au-dessus du niveau du fleuve, l'Arno. Malgré les efforts conjugués des grands ingénieurs de l'époque, ils n'y parvenaient pas. Ils n'arrivent guère à en comprendre la raison. En effet, Aristote enseignait que « la nature a horreur du vide ». C'est pourquoi ils pensaient qu'il suffisait d'aspirer pour faire monter l'eau dans une colonne. Galilée, puis son élève Torricelli, ont été consultés.

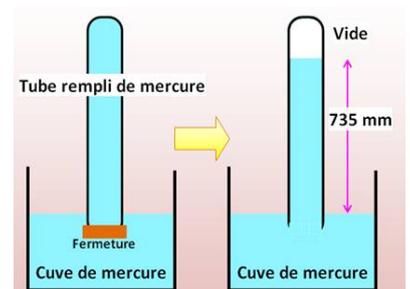


L'hypothèse.

Torricelli fait l'hypothèse que l'air exerce sur l'eau une force égale à celle exercée par le poids de la colonne d'eau de 10,33m.

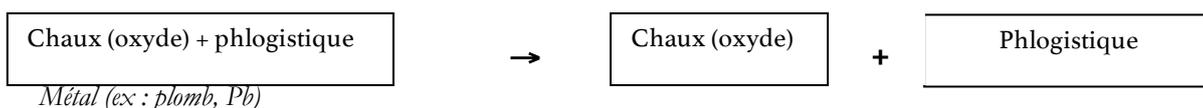
L'expérimentation.

Pour le prouver, il imagine l'expérimentation suivante. Il s'agit de remplir de mercure un ballon à col long, de le boucher avec le pouce, puis de le renverser sur une cuve remplie de mercure. Le mercure est un métal liquide à température ambiante d'une densité 13,6 fois supérieure à celle de l'eau (c'est-à-dire dont la masse, à volume égal, est 13,6 fois supérieure à celle de l'eau). Si son hypothèse est juste, une colonne de mercure de $10,003/13,6 = 0,76m$, qui a le même poids qu'une colonne d'eau de 10,003 m devrait rester dans le tube sans pouvoir s'écouler dans la cuve. C'est effectivement ce qu'il observe. Cette force qu'exerce l'air par unité de surface, c'est la pression atmosphérique.

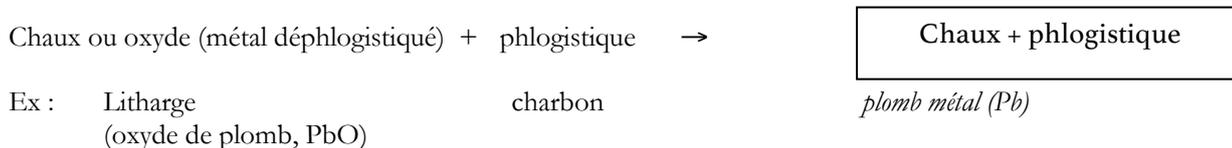


5) Chimie : la découverte de l'oxygène et la critique de la théorie du phlogistique

Hypothèse. Stahl, un médecin et chimiste allemand (1660-1734), fait l'hypothèse que les corps inflammables se caractérisent par la présence en eux d'une **substance inflammable, le phlogistique** (du mot grec « *phlos* » qui signifie « flamme »). La combustion d'un métal produit une flamme, qui selon Stahl représente le phlogistique entrain de s'échapper, et une chaux (en vocabulaire moderne, un oxyde), qui est selon lui le métal « déphlogistiqué ». Stahl représente son hypothèse par l'équation chimique suivante¹ :



Cette hypothèse implique réciproquement que le chauffage d'un métal, par exemple la litharge (oxyde de plomb, PbO), en présence de phlogistique contenu dans du charbon, doit permettre au métal déphlogistiqué (ici, la litharge) de retrouver sa constitution initiale en récupérant son phlogistique. Stahl représente ce processus par l'équation chimique suivante :



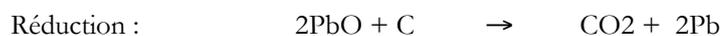
L'expérimentation semble concluante. On peut déphlogistiquer le métal puis le recomposer.

Mais, en réalité, une expérimentation qui considère non plus simplement les qualités, mais aussi les quantités permet de montrer que **cette théorie est fautive**. En effet, on constate que la chaux produite dans la réaction (ici, PbO) a une masse supérieure à celle du métal d'origine (Pb). Cela contredit l'hypothèse d'après laquelle la chaux est le métal d'origine moins le phlogistique. On fera ensuite l'hypothèse que la réaction d'oxydation consiste en la fixation d'oxygène sur le métal.

¹ La représentation proposée ici est un peu inexacte, car Stahl ignorait précisément l'existence même du gaz appelé oxygène (noté ici O) et ne comprenait pas qu'il venait se fixer sur le métal pour former un oxyde (PbO).

C'est **Lavoisier** (chimiste français, 1743-1794, souvent considéré comme le père de la chimie moderne) qui a permis la rupture avec la chimie du phlogistique sur la base d'expériences *quantitatives* (mesure des masses des produits avant et après la combustion). Il a constaté que le morceau d'oxyde obtenu avait une masse supérieure à celle du métal avant combustion. Il a ainsi compris qu'un corps venait se fixer sur le métal par la combustion. C'est ce qui l'a conduit à la découverte de l'oxygène.

On pourra représenter les deux réactions (oxydation, puis réduction) par les équations chimiques suivantes :



Zn : zinc
Pb : plomb
O : oxygène

6) Théorie de l'évolution

Pendant une longue période, on a pensé que les espèces vivantes existaient telles qu'elles avaient été au moment de la création du monde ou, plus exactement, telles qu'elles étaient sorties de l'Arche de Noé, à la fin du déluge, selon le récit de l'Ancien Testament.

Cependant les premiers pas de la science dans ce domaine, marqués par la découverte de fossiles, ont commencé à changer la façon de concevoir cette question. En effet, ceux-ci ont été interprétés comme prouvant que des espèces animales ayant existé autrefois avaient depuis disparues, en contradiction avec la représentation acceptée à l'époque. Pour répondre à cette difficulté, les hommes de science ont d'abord fait l'hypothèse que des catastrophes naturelles, comparables au déluge, avaient pu faire disparaître ces espèces. Mais la multiplication de ces découvertes a conduit à supposer un nombre de catastrophes si important que cela fragilisa ces hypothèses, car elles semblaient ne servir qu'à expliquer ces disparitions ponctuelles et non un ensemble de phénomènes (on parle dans ce cas d'hypothèse ad hoc, c'est-à-dire avancée seulement pour expliquer un phénomène isolé et non un ensemble de phénomènes). Parallèlement les progrès de l'anatomie comparée avaient permis de se rendre compte d'importantes similitudes anatomiques entre certaines espèces et de réaliser de premières classifications des animaux.

Au XIXe siècle, Lamarck (1744-1829), un naturaliste français, a le premier formulé une hypothèse dite « transformiste », c'est-à-dire consistant à supposer qu'il y avait une évolution progressive des formes vivantes. Il pensait que peu à peu les caractères acquis s'intégraient aux caractères de l'espèce et se transmettaient de génération en génération.

En parallèle, Charles Lyell (1797-1875), un géologue, avait lui aussi proposé une explication *gradualiste* de la formation du relief terrestre par une succession de modification à partir d'un état originel.

C'est dans ce contexte que Charles Darwin (1809-1883) et son collègue Wallace en parallèle ont élaboré une théorie globale pour expliquer l'évolution et apporté un ensemble de preuves empiriques solides. Les travaux de Darwin ont commencé dans les années 1830, mais son ouvrage majeur sur le sujet, intitulé *L'origine des espèces par le moyen de la sélection naturelle ou la préservation des races plus adaptées dans la lutte pour la vie* a été publié en 1859. Cette théorie, largement contestée au départ, a depuis reçu de nombreuses modifications et développements et admise par la science contemporaine.

Voici les principaux éléments ayant conduit Darwin à formuler et à confirmer sa théorie :

- a) Il a observé **les pratiques des horticulteurs et des éleveurs, parvenant à modifier peu à peu les espèces** pour mieux satisfaire les besoins de l'homme. Darwin a estimé qu'on pouvait raisonnablement faire l'hypothèse que si les espèces vivantes varient sous l'effet de l'intervention d'une sélection opérée par l'homme, c'est qu'elles sont naturellement variables ; autrement dit, il y a *une variabilité naturelle* des espèces.
- b) **Il a réalisé de nombreuses observations du relief, de la flore et de la faune, notamment en Amérique Latine**, à l'occasion d'un très long voyage autour du monde réalisé par Darwin dans le cadre d'une expédition scientifique sur un navire nommé le *Beagle* (entre 1831 et 1836) :
 - Il remarque que dans la plaine de Patagonie (sud de l'Argentine et du Chili), on retrouve des *galets* et des *coquillages*, comme si cette région avait été autrefois submergée par les flots. Après un tremblement de terre au Chili, il remarque des *bancs de moule au dessus du niveau de la pleine mer*, ce qui suggère que le niveau de la terre peut se modifier graduellement sous l'effet de phénomènes naturels.
 - Il découvre de *nombreux fossiles* attestant de l'existence de nombreuses espèces disparues.
 - Il remarque *qu'il existe plusieurs « variétés » d'un même animal* sur des territoires différents, mais relativement proches. Par exemple, il existe deux espèces différentes de nandous (oiseaux d'Amérique Latine) . Il existe des tortues assez semblables, mais d'espèce différentes, dont on est capable d'indiquer l'origine géographique par un simple examen attentif de leur corps ; etc.)
 - Il constate *des variations entre les individus* au sein d'une même espèce ;

- c) Il lit la théorie de Malthus (pasteur anglican, membre de l'école des économistes anglais classiques, 1766-1834) sur l'évolution de la population formulée en 1797 dans son *Essai sur le principe de population, en tant qu'il affecte l'amélioration future de la société*. De façon schématique, Malthus soutient que la population humaine croît en proportion géométrique (ax), tandis que les ressources naturelles croissent seulement en proportion arithmétique (+a) ; si cela se poursuit, on ne pourrait donc pas nourrir et assurer les conditions de survie à tous les hommes ; Malthus en conclut qu'il faut limiter le nombre de naissance, en particulier dans les classes pauvres.

Darwin n'est pas du tout séduit par les conclusions politiques de Malthus. Mais il y trouve une inspiration *en transposant ce modèle à la nature*, car il le rapproche d'une d'observation. L'introduction par les Espagnols sur l'île Juan Fernandez de chiens, prédateurs des chèvres, animaux herbivores, n'avait pas conduit à la disparition des chèvres ; il s'était un équilibre entre espèces au bout d'un certain temps ; en effet, la réduction de la population de chèvres tendaient à réduire la nourriture à disposition des chiens, réduisant à son tour l'accroissement de leur population.

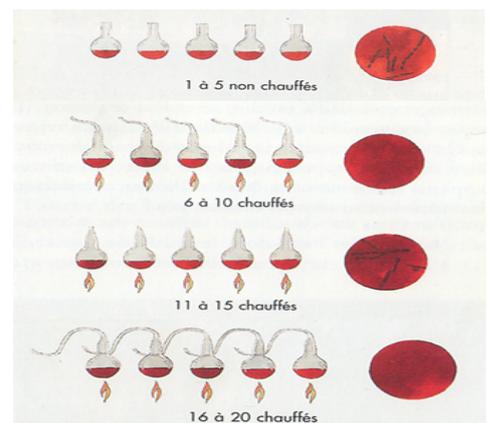
A partir de cela, Darwin pense pouvoir formuler à peu près l'hypothèse suivante : si les espèces animales se multiplient plus rapidement que les conditions du milieu le permettent, à la fois parce que plusieurs espèces dépendent les unes les autres d'un même milieu et parce qu'il existe des variations individuelles au sein de chaque espèce, alors il doit se produire une forme de « lutte pour la vie » au sein de laquelle seuls les plus survivent. Il ne s'agit pas de « plus aptes » en un sens absolu, mais de ceux qui sont *les plus adaptés aux conditions du milieu et à leur variation*. Les plus aptes vivent plus vieux et ont donc davantage de possibilité de se reproduire et à partir de là de répandre leur espèce ou bien leurs caractéristiques propres au sein de l'espèce, au point qu'ils puissent à un moment donné se produire, après une série de petites modifications, un saut, c'est-à-dire la formation d'une nouvelle espèce.

7) Biologie : Pasteur falsifie (réfute) la théorie de la génération spontanée

La théorie de la génération spontanée consiste à dire que, dans certains cas, des êtres vivants pourraient se former sans le concours d'organismes vivants de la même espèce (hétérogénie), donc à partir de matière inanimée. C'est l'expérience courante qui avait conduit Aristote à une telle conception. En effet, si les hommes avaient constaté depuis longtemps que, pour la plupart des espèces animales, un petit naît d'autres animaux de la même espèce suite à un accouplement, ils avaient aussi remarqué l'apparition de moisissures sur les aliments au bout d'un certain temps, d'asticots dans le riz ou sur des morceaux de viande, de mites sur des vêtements de laine, etc., qui semblaient ne pas naître d'un animal adulte.

En réalité, il y a des micro-organismes déjà présents, mais de trop petite taille pour être visible à l'œil nu. C'est pourquoi, avant l'invention du microscope (à la fin du XVI^e siècle et au début du XVII^e), on ne pouvait pas les voir et on croyait qu'il n'y avait rien. On n'apercevait ces être vivants qu'à partir du moment où ils étaient devenus suffisamment grands pour être visibles à l'œil nu. Après de premières réfutations au cours du XVII^e et XVIII^e siècles, la théorie s'est cependant maintenue et même parmi des brillants biologistes, comme Geoffroy Saint-Hilaire ou Lamarck. Elle a été réfutée, d'une façon qui n'a depuis pas été remise en question, par Pasteur (physicien, chimiste et biologiste français, 1822-1895) dans les années 1860, dans le cadre d'une controverse scientifique qui l'a opposé à Pouchet.

Pasteur avait préalablement étudié la fermentation alcoolique. Il s'était rendu compte que la fermentation était produite par un organisme vivant, une levure, c'est-à-dire un champignon unicellulaire. Il avait aussi appris dans ce contexte à produire un milieu stérile pour étudier la fermentation. Pouchet soutenait sa thèse de l'hétérogénie en s'appuyant sur de nombreuses expériences. Pasteur a donc d'abord dû la critique de ces expériences qui semblaient prouver que la vie pouvait apparaître sans être engendré par un être vivant de la même espèce. Il soutient que la cuve à mercure utilisée par Pouchet n'est pas un milieu stérile, ce qui faussait ses travaux. Il a ensuite conçu un dispositif expérimental complexe à partir de son hypothèse qu'il ne pouvait pas y avoir de génération spontanée et que la formation de microorganismes dans un milieu stérile ne pouvait s'expliquer que par l'apport par l'air de microorganismes invisibles à l'œil nu.



Pour cela, il forme un milieu composé d'eau et d'éléments nutritifs permettant aux germes de se développer au cas où ils seraient présents. Il place cette solution dans 4 types de ballons (récipients). Il constitue un premier groupe de ballons qui servent de témoins : il y laisse la solution exposée à l'air et sans la chauffer ; il s'agit de prouver que le milieu permet le développement de microorganismes. Il constitue un deuxième groupe de ballons qui sont chauffés et fermés de façon hermétique : il ne peut s'y former selon l'hypothèse de Pasteur aucun microorganisme. Il constitue un troisième groupe de ballons qui sont chauffés, mais non fermés, si bien que l'air peut y apporter des microorganismes. Il constitue un quatrième groupe de ballons où la solution est chauffée et qu'il laisse ouverts, mais avec un bec dit à col de cygne permettant que les microorganismes portés par l'air se déposent sur les parois et n'arrivent pas jusqu'à la solution. Il contrôle ensuite la présence ou l'absence de microorganismes dans chaque solution par une observation au microscope. On en trouve dans les cas 1 et 3, mais pas dans les cas 2 et 4. Les hypothèses de Pasteur sont ainsi confirmées.