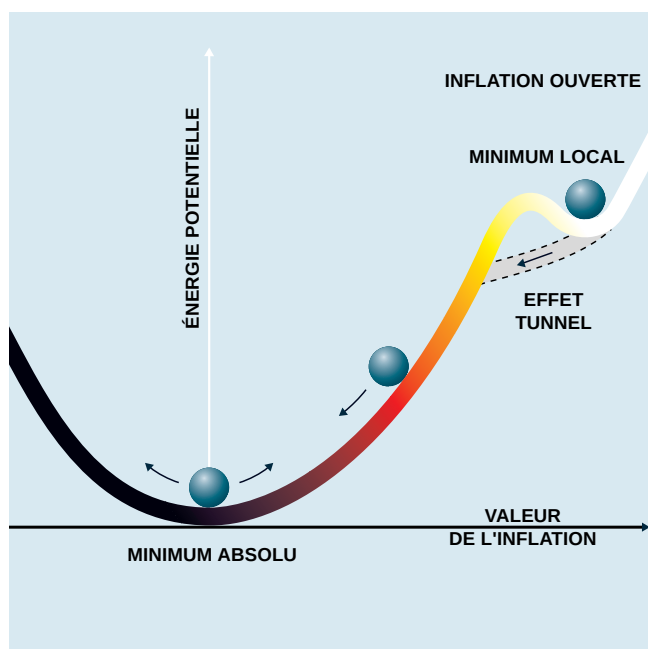
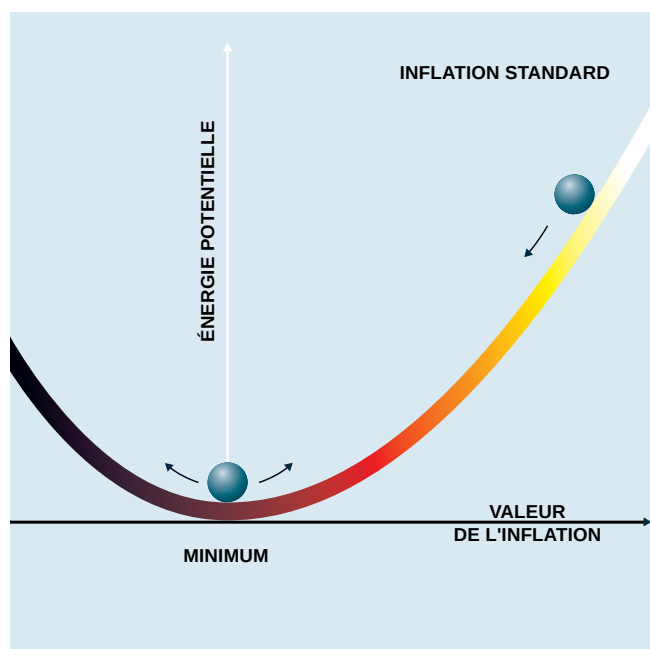




Dmitry Krasny

2. LE CHAMP D'INFLATION, OU INFLATON, serait à l'origine de la force qui aurait provoqué l'expansion de l'espace. Ce champ se comporterait comme une bille roulant sur une pente : il tendrait à minimiser son énergie potentielle (axe vertical) en changeant sa valeur (axe horizontal). Les processus quantiques à l'aube du temps auraient communiqué à l'Univers une forte énergie potentielle. Selon la théorie de l'inflation (à gauche), l'inflaton roulerait vers sa valeur minimale, mais, selon la théorie de l'inflation ouverte (à droite), il se

serait arrêté dans un minimum local. Dans la plus grande partie de l'Univers, l'inflaton serait toujours dans ce minimum local, et l'inflation n'aurait jamais cessé. Dans quelques régions, le champ serait sorti du minimum local par «effet tunnel», et il aurait continué sa descente. L'une de ces régions serait la bulle d'Univers où nous vivons. Dans les deux modèles d'inflation, l'inflaton oscille dès qu'il approche de son point final, emplissant l'espace de matière et de rayonnement : c'est le Big Bang.

l'espace et du temps dont les oscillations sont interprétées comme des particules. Les champs sont responsables de la transmission des forces. L'inflaton est associé à une force «anti-gravitationnelle» qui étire l'espace.

À une certaine valeur de l'inflaton correspond une énergie potentielle. Comme une bille roulant le long d'une colline, l'inflaton roule vers le fond de son puits de potentiel (voir la figure 2, à gauche), mais l'expansion de l'Univers introduit ce que l'on peut décrire comme un frottement cosmique, qui s'oppose à la décroissance de l'énergie potentielle. Tant que ce frottement domine, l'énergie potentielle diminue très lentement, et la valeur de l'inflaton aussi : l'intensité de la force d'antigravitation augmente par rapport à celle de la gravitation, car la densité de l'Univers décroît. L'expansion de l'Univers est alors de plus en plus rapide. Finalement l'inflaton faiblit, et son énergie résiduelle se transforme en rayonnement et en particules (la matière que nous connaissons aujourd'hui). Ensuite l'expansion de l'Univers se poursuit conformément à la théorie du Big Bang.

Les cosmologistes étudient les conséquences des différentes théories sur la forme de l'Univers. Selon la

théorie de la relativité générale, la gravitation est en effet un phénomène géométrique : la matière et l'énergie déforment le tissu de l'espace-temps, tordant les trajectoires des objets qui se déplacent. L'expansion de l'Univers, qui est elle-même une forme de courbure de l'espace-temps, est commandée par la valeur de Ω (voir l'encadré page 55). Si Ω est plus grand que un, l'Univers a une courbure positive, comme la surface d'une orange, mais en trois dimensions spatiales : c'est la géométrie sphérique, ou «fermée». Si Ω est inférieur à un, la courbure de l'Univers est négative, comme une selle : c'est la géométrie hyperbolique, ou «ouverte». Si Ω est égal à un, l'Univers est plat, comme une crêpe : c'est la géométrie euclidienne habituelle.

L'inflation aplatit l'Univers observable. Quelle que soit la forme initiale de l'Univers, ce dernier se dilate si vite que nous n'en voyons plus qu'une petite partie, qui peut paraître plate pour les mêmes raisons que la surface terrestre qui nous entoure nous semble plate. L'inflation rapproche donc de un la valeur observée de Ω , tandis que les irrégularités initiales, dans les densités de matière et de rayonnement, sont effacées.

Ainsi, la théorie de l'inflation standard associe la géométrie euclidienne de l'espace et son homogénéité. Pour que l'Univers ait l'homogénéité actuelle, la théorie prévoit qu'il doit être très, très plat, avec Ω égal à un, à un cent millièmes près. Tout écart de Ω par rapport à un doit être indécidable par les astronomes. Depuis 20 ans, la planète effectivement observée a été considérée comme une prévision bien vérifiée de la théorie.

L'Univers hyperbolique

Là est aujourd'hui le problème. De nombreuses observations astronomiques d'amas de galaxies et de supernovae lointaines montrent que la gravitation est trop faible pour vaincre l'expansion. La densité de matière doit être inférieure aux prévisions, et Ω semble être égal à environ 0,3 : l'Univers serait courbé et ouvert. Ce résultat peut s'interpréter de trois manières. Premièrement, la théorie de l'inflation pourrait être complètement fautive. Dans cette hypothèse, les cosmologistes devraient trouver une autre théorie qui résoudrait la question de l'homogénéité et qui expliquerait la valeur de Ω .

L'expansion accélérée que l'on déduit des observations des supernovae

lointaines suggère une deuxième hypothèse : l'existence d'une énergie supplémentaire qui agirait comme de la matière étrange, courbant l'espace comme le fait la matière ordinaire. Elle aplatiserait l'espace, et la théorie de l'inflation n'aurait rien à craindre (voir *L'antigravité*, par Lawrence Krauss, page 42). Pour l'instant, les calculs sont imprécis parce qu'on connaît mal les poussières de l'Univers et la nature des étoiles qui explosent, et ils ne permettent pas de clore (si l'on peut dire) le débat.

Une troisième approche consiste à dissocier la géométrie de l'Univers du processus d'inflation, en incluant dans la théorie la description d'étapes antérieures à l'inflation. Ces idées, explorées au début des années 1980, ont été reprises et développées récemment.

On peut trouver un potentiel associé à l'inflaton tel que l'Univers soit légèrement courbé au lieu d'être complètement plat. Supposons ainsi que la

fonction énergie potentielle possède deux minima : un minimum local et un minimum absolu (voir la figure 2, à droite). Quand l'inflaton roule le long de la pente, l'Univers se dilate en restant uniforme (comme dans la théorie exposée précédemment). Puis l'inflaton reste bloqué dans le minimum local. Les physiciens nomment cet état un « faux vide » : toute la matière et tout le rayonnement du cosmos y sont presque totalement sous la forme de l'énergie de l'inflaton. Les fluctuations inhérentes à la mécanique quantique font osciller l'inflaton et lui permettent de s'échapper du minimum local, par effet tunnel (comme on libère une bille coincée dans un flipper en secouant l'appareil).

La sortie du minimum local, ou désintégration du faux vide, ne s'est pas produite partout en même temps. Elle a d'abord eu lieu en un point quelconque, puis elle s'est propagée. Le

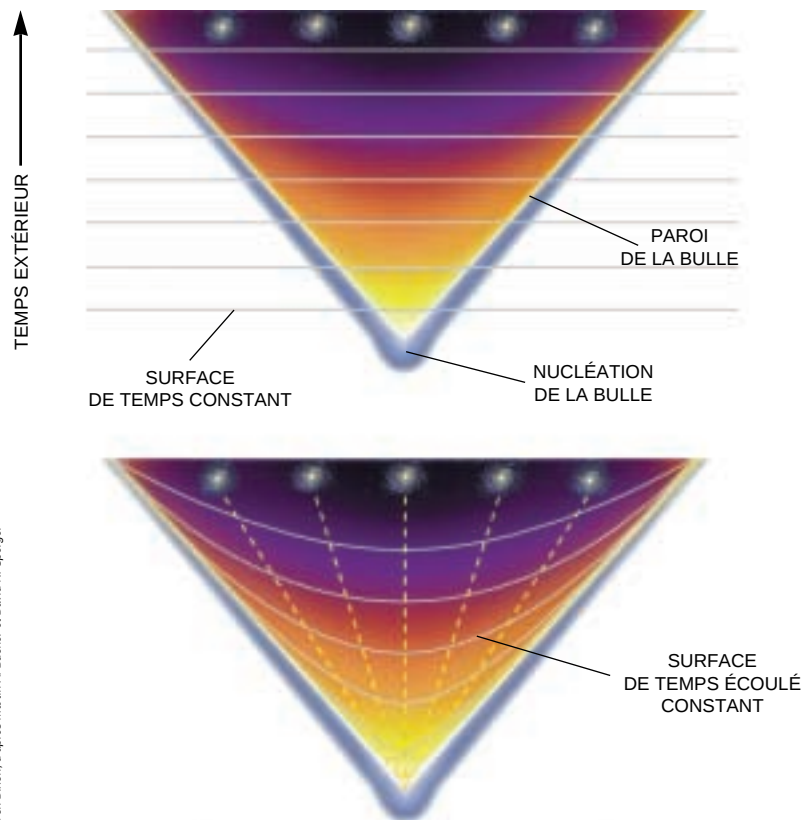
processus est comparable à l'ébullition d'une casserole d'eau : l'eau ne se transforme pas partout instantanément en vapeur. En raison du mouvement aléatoire des molécules, des bulles éparses se forment dans le liquide ; lorsque leur taille est inférieure à une taille critique, elles s'effondrent parce que la tension superficielle est supérieure à leur pression interne ; dans les bulles plus grosses, la pression à l'intérieur surmonte la tension superficielle, et ces bulles croissent.

Notre Univers est une bulle

Dans la désintégration du faux vide, les fluctuations quantiques ont joué le rôle du mouvement moléculaire aléatoire, provoquant la nucléation de bulles de vrai vide. Une force analogue à la tension superficielle a détruit la plupart des bulles, mais quelques-unes ont tant grossi que les effets quantiques sont devenus négligeables. Rien ne s'y opposant, le rayon de ces bulles a continué de croître à la vitesse de la lumière. Quand la paroi externe d'une bulle passe par un point de l'espace, l'inflaton en ce point est délogé du minimum local et il reprend sa descente vers le minimum absolu d'énergie potentielle : au sein de la bulle, l'espace se dilate comme dans la théorie de l'inflation. L'intérieur de cette bulle correspond à notre Univers. Le moment où l'inflaton a quitté le minimum local correspond au Big Bang.

Ce dernier s'est donc produit à des instants différents aux points situés à des distances différentes du centre de nucléation de la bulle. L'inflaton peut alors être utilisé comme un chronomètre : sa valeur en un point de l'espace indique le temps écoulé depuis le Big Bang en ce point. L'inflaton est maximal sur la paroi de la bulle et décroît régulièrement vers le centre. Mathématiquement, la valeur de l'inflaton reste constante sur des surfaces tridimensionnelles de forme hyperbolique (voir la figure 3).

La valeur de l'inflaton n'est pas qu'une grandeur mathématique. Elle a déterminé les propriétés fondamentales de l'Univers au sein de la bulle : sa densité moyenne et la température du rayonnement cosmologique diffus (aujourd'hui égale à 2,7 kelvins). Sur une surface hyperbolique, la densité, la température et le temps écoulé sont constants. Ces surfaces sont ce que les observateurs



Don Dixon, d'après Martin A. Bucher et David N. Spergel

3. UN UNIVERS OUVERT DANS UN ESPACE FERMÉ ? Ce serait possible si l'espace et le temps étaient perçus différemment en dehors (*en haut*) et à l'intérieur (*en bas*) d'une bulle d'Univers. Ici, le temps, mesuré par des observateurs extérieurs, augmente vers le haut de chaque ligne. Par définition, l'espace est n'importe quelle ligne ou surface qui relie des points à un certain temps (*lignes horizontales du schéma supérieur*). La bulle a une courbure sphérique et est donc fermée. Les observateurs intérieurs, toutefois, ne sont conscients que du temps écoulé, l'intervalle depuis que le bord de la bulle a atteint un point donné. Quand le temps écoulé augmente, la température diminue, ce qui entraîne un changement physique (*chaud en jaune ; froid en noir*). Les surfaces de temps écoulé constant sont des hyperboles, qui se courbent vers le haut et ne touchent jamais la paroi de la bulle. Les points internes s'éloignent mutuellement, à cause de l'expansion cosmique (*lignes pointillées*). L'Univers a une courbure hyperbolique et est donc ouvert.