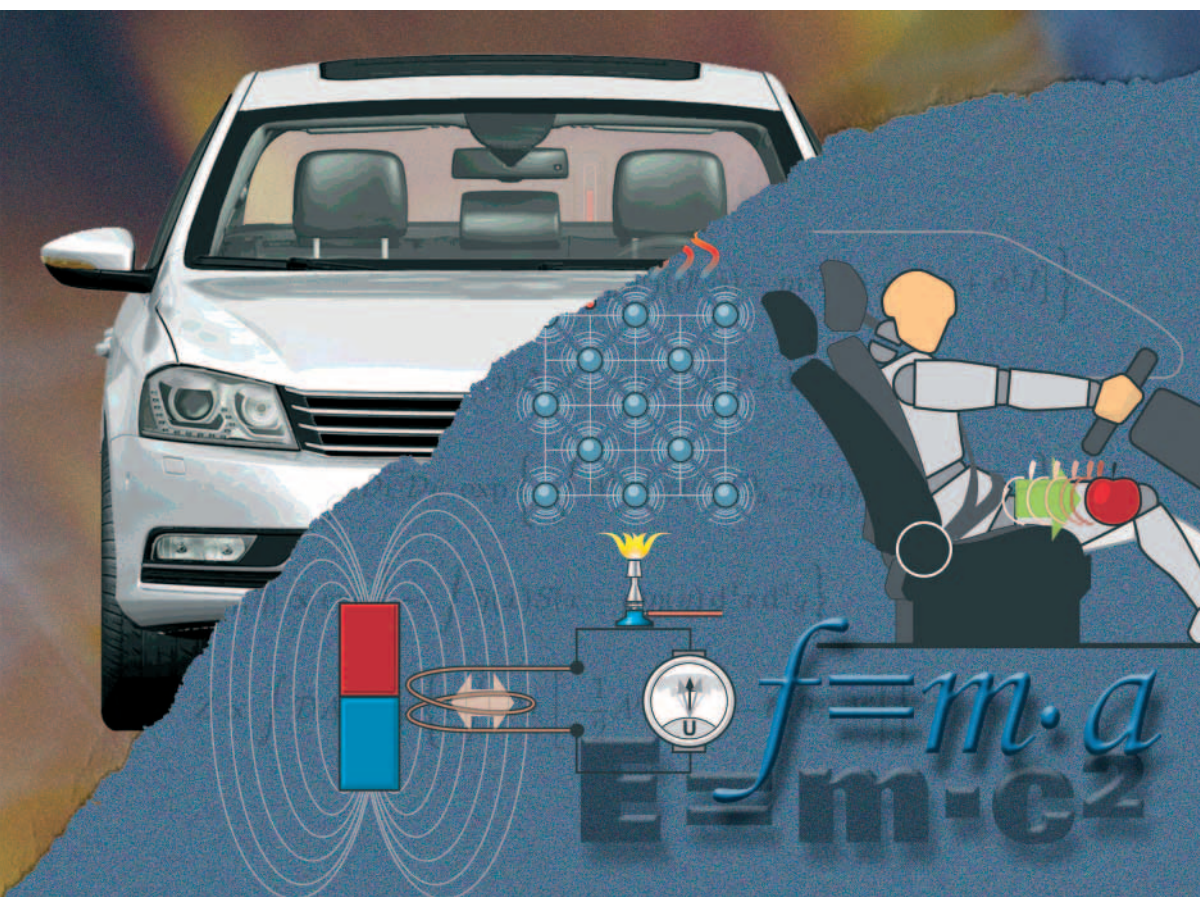




Programme autodidactique technique 501

# Technologie des capteurs automobiles

## Notions fondamentales de physique



Les exigences toujours croissantes en matière de sécurité, de commande et de confort conduisent l'industrie automobile à adopter des systèmes de plus en plus complexes. Selon leur fonction, ces systèmes nécessitent une multitude d'informations, qui leur sont fournies par des capteurs. La conséquence en est une diversité quasi infinie de types et d'appellations de capteurs différents.

Tous ces capteurs, et leurs différents modes de fonctionnement, reposent toutefois sur un nombre limité de concepts et de procédés de mesure physiques.

Les Programmes autodidactiques consacrés à la technologie des capteurs automobiles ont pour objectif de présenter de manière simple et claire ces différents procédés de mesure et les notions fondamentales de physique sur lesquelles ils reposent, et de les mettre en correspondance avec les différents types de capteurs. La logique qui préside à l'organisation de ces Programmes autodidactiques vous aidera à reconnaître les capteurs montés dans les systèmes automobiles et à analyser les informations qu'ils fournissent aux systèmes en question sur la base des différentes lois de la physique. Les Programmes autodidactiques consacrés à la technologie des capteurs automobiles sont donc pensés comme des ouvrages de référence centraux, à même de vous aider à comprendre les systèmes automobiles complexes et de vous assister lors du dépannage.

Le présent Programme autodidactique consacré aux notions fondamentales de physique appliquées à la technologie des capteurs automobiles permet de dépoussiérer certaines connaissances acquises à l'école. Vous y trouverez également, entre autres, des concepts relevant de théories fondamentales de la physique, comme la mécanique quantique ou la relativité, qui sont abordées succinctement, voire pas du tout, durant la scolarité. Il ne s'agit pas ici toutefois de présenter ces théories dans leur exactitude mathématique : cela impliquerait une explosion du nombre de pages et irait au-delà de l'objet du présent Programme autodidactique. Il s'agit plutôt de permettre au lecteur de savoir que ces théories fondamentales existent, et de lui faire découvrir l'importance centrale que ces édifices intellectuels, souvent très abstraits, revêtent pour la technologie qui nous entoure.

---










**Ce Programme autodidactique présente la conception et le fonctionnement d'innovations techniques récentes ! Son contenu n'est pas mis à jour.**

Pour les instructions actuelles de contrôle, de réglage et de réparation, veuillez vous reporter aux ouvrages correspondants du Service après-vente.



**Attention  
Nota**



<b>Introduction .....</b>	<b>4</b>	
<b>Qu'est-ce que le mouvement ? .....</b>	<b>6</b>	
<b>Qu'est-ce que l'énergie ? .....</b>	<b>14</b>	
<b>Qu'est-ce que la matière ? .....</b>	<b>20</b>	
<b>Qu'est-ce que le magnétisme ? .....</b>	<b>26</b>	
<b>Que sont les ondes électromagnétiques ? .....</b>	<b>30</b>	
<b>Qu'est-ce que le son ? .....</b>	<b>34</b>	
<b>Que signifient U, I, R et C ? .....</b>	<b>35</b>	
<b>Glossaire .....</b>	<b>41</b>	



## La structuration de la série sur la technologie des capteurs automobiles

Trois Programmes autodidactiques sont prévus dans la série sur la technologie des capteurs automobiles :

- Technologie des capteurs automobiles – Notions fondamentales de physique
- Technologie des capteurs automobiles – Méthodes de mesure
- Technologie des capteurs automobiles – Principes de fonctionnement

Il y a une progression de l'un à l'autre de ces trois Programmes autodidactiques ; ensemble, ils forment un ouvrage de référence sur le thème de la technologie des capteurs automobiles en général et sur les capteurs automobiles en particulier.

Cette division en trois Programmes autodidactiques a été adoptée pour limiter chaque Programme autodidactique à un nombre de pages raisonnable.

## À propos des contenus de la série sur la technologie des capteurs automobiles

Ce premier Programme autodidactique de la série sur les capteurs automobiles présente des notions fondamentales de physique indispensables à la compréhension des principes de fonctionnement des différents capteurs. L'auteur s'est efforcé d'illustrer le plus possible ces explications et de renoncer dans toute la mesure du possible à exposer les concepts mathématiques qui sous-tendent les notions de physique.

Les modèles utilisés décrivent en grande partie les phénomènes physiques de manière très simplifiée, et donc incomplète. Les personnes disposant de bonnes connaissances en physique peuvent sauter ce premier Programme autodidactique, ou l'utiliser pour rafraîchir leurs connaissances.

Le Programme autodidactique « Technologie des capteurs automobiles – Méthodes de mesure » porte sur les différents procédés de mesure utilisés par les capteurs.

Les descriptions du deuxième Programme autodidactique présupposent la connaissance des notions fondamentales présentées dans le présent Programme autodidactique.

Enfin, le Programme autodidactique « Technologie des capteurs automobiles – Principes de fonctionnement » donne une vue d'ensemble des différents types de capteurs utilisés à l'heure actuelle en construction automobile et les met en correspondance avec les procédés de mesure présentés dans le deuxième Programme autodidactique. Celui-ci décrit, pour chaque capteur, à quelles fins le signal est utilisé, comment le capteur est conçu et comment il fonctionne du point de vue du procédé de mesure.

# Qu'entend-on par technologie des capteurs ?



D'un point de vue technique, la technologie des capteurs est la connaissance et l'utilisation de capteurs pour contrôler et réguler des systèmes techniques. Un capteur est une sonde permettant de détecter certaines propriétés physiques et de les transformer en un signal exploitable électroniquement. Le capteur constitue donc l'interface entre le monde extérieur et l'intérieur du système pour un type de valeur donné.

## Les sens de l'automobile

Pour expliquer l'importance des capteurs techniques en construction automobile, il est pertinent de les comparer aux capteurs physiologiques d'un système biologique comme l'être humain.

Nous sommes dotés de cinq sens et possédons pour chacun de ces sens des éléments sensoriels spécifiques.

Nous possédons pour le sens optique (vue) deux yeux dotés de capteurs photosensibles, qui nous permettent de percevoir les couleurs et la luminosité. La connexion des différents capteurs de l'œil se prête par ailleurs parfaitement à la reconnaissance des formes. En fonction de notre âge et de notre expérience, l'analyse des données optiques dans notre cerveau nous permet d'évaluer grossièrement les distances, les vitesses et les mouvements des objets qui nous entourent.

Notre sens acoustique (ouïe) capte les ondes sonores. Le sens de l'équilibre nous permet entre autres de marcher en nous tenant debout, et, comme effet secondaire, de ressentir les phénomènes d'accélération.

Grâce aux détecteurs de pression de notre sens tactile, nous saisissons notre environnement au sens le plus littéral du terme. Des détecteurs de température à l'intérieur de notre corps ainsi que dans notre peau forment notre sens de la température et nous avertissent de températures trop élevées ou trop basses, susceptibles d'endommager notre organisme.

Nous ne percevons pas les ondes électromagnétiques en dehors de l'infrarouge ou de la lumière visible, et nous ne possédons pas non plus de capteurs pour l'électricité, la radioactivité ou la pression de l'air, pour ne citer que quelques grandeurs physiques. Beaucoup de perceptions de notre environnement nous sont livrées indirectement par l'interprétation de notre cerveau, sans que nous ne puissions les quantifier concrètement. Nous sommes capables de qualifier nos perceptions de fortes, moins fortes ou faibles, mais nous ne disposons pas de données de mesure concrètes, et donc comparables. La valeur significative des capteurs physiologiques d'un système biologique est donc très individuelle, et peut difficilement être comparée à celle d'un autre. Il en va tout autrement pour les capteurs techniques.

Une automobile moderne, avec ses nombreux systèmes de régulation et d'aide à la conduite, dispose de bien plus de sens que nous n'en sommes dotés à la naissance. Les capteurs techniques détectent des températures, des régimes, des distances, des vitesses, des couples, des pressions, des trajets, des quantités, etc., et les transforment en résultats de mesure concrets et comparables. Ils permettent aux systèmes d'analyser des grandeurs de mesure et d'en faire découler des processus de régulation.

# Qu'est-ce que le mouvement ?

Au-delà de la question, qui peut paraître simple, de la définition du mouvement, c'est surtout la raison ou l'origine d'un mouvement qui est importante. Entrent ici en jeu les notions de force, d'accélération et de couple.



## Mouvements absolu et relatif

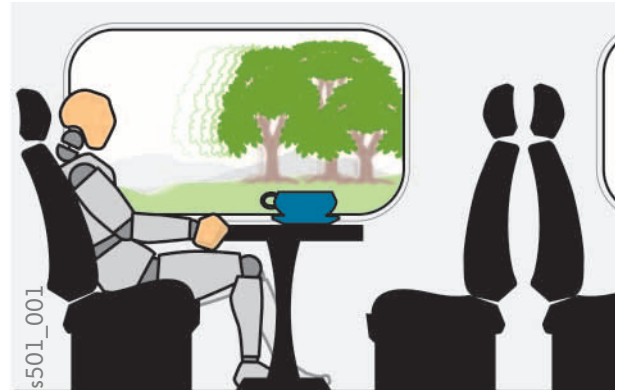
À l'heure actuelle, en physique, on ne parle plus de mouvement absolu.

On entendait autrefois par ce terme le mouvement d'un objet par rapport à l'espace absolu qui l'entoure (univers). Cependant, même cette définition correspond, du point de vue actuel, à un mouvement relatif : celui d'un objet par rapport au référentiel « univers ».

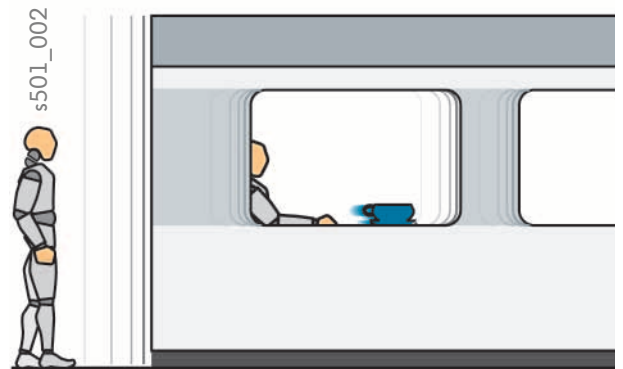
Le mouvement ne peut toutefois pas être décrit uniquement par rapport à l'espace environnant, il peut l'être également par rapport à l'observateur ou par rapport à un autre objet. Selon le référentiel (système inertiel) utilisé, on obtient des observations différentes du mouvement.

Une tasse à café posée sur une table dans un train en marche est immobile pour le passager du train ; pour un observateur situé sur le quai de la gare, elle est en mouvement. Pour un observateur situé au centre de la voie lactée, la tasse, le passager et le premier observateur se déplacent à une allure plutôt soutenue (environ 961 200 km/h) dans notre galaxie. À la question de savoir quelle est la vitesse de la tasse, le premier répondrait 0 km/h, le second par ex. 250 km/h et le troisième environ 961 200 km/h. Ces différentes réponses sont toutes les trois vérifiables et simultanément vraies.

C'est pourquoi il est important, lorsqu'on décrit un mouvement, d'indiquer quel est le référentiel.

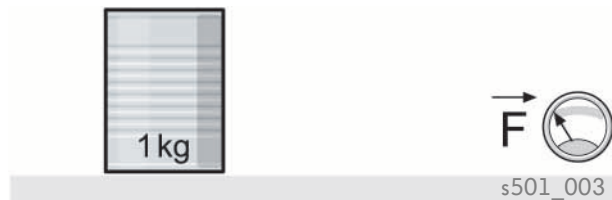


Pour un observateur qui se trouve dans le référentiel « train », la tasse reste immobile par rapport à l'observateur et au référentiel.

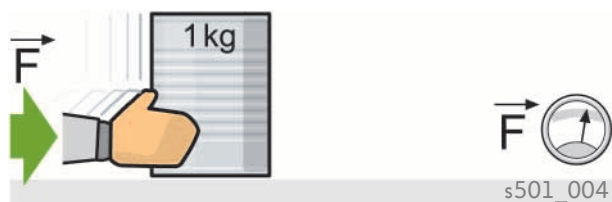


Pour un observateur situé sur le quai de la gare, la tasse ainsi que le train et les passagers sont en mouvement par rapport à lui-même et à un autre référentiel : la gare.

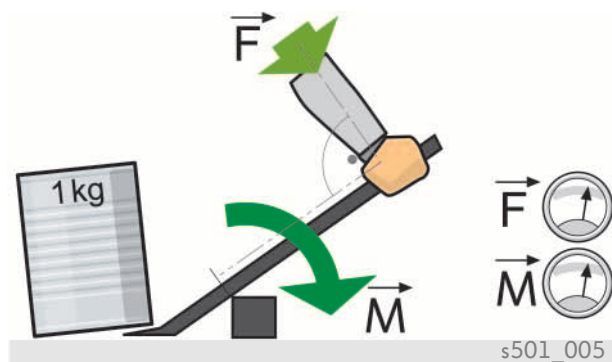
## Force et couple



Le corps est immobile et n'est soumis à aucune force ( $F$ ).



L'action d'une force linéaire ( $F$ ) peut accélérer et/ou déformer le corps.



Lorsqu'une force ( $F$ ) est exercée par l'intermédiaire d'un bras de levier, il apparaît un couple ( $M$ ).

L'origine d'un mouvement peut résider notamment dans une force ou un couple. Une force est une grandeur physique orientée susceptible de déformer ou d'accélérer un corps. Si la force est exercée sur un bras de levier, c'est-à-dire par rapport à un point de rotation, on obtient une autre grandeur physique, le couple.

Si le sens de la force et le bras de levier forment un angle droit, le couple peut être décrit de manière simplifiée comme le produit de la force et de la longueur du bras de levier.

Lorsqu'un objet est accéléré par une force ou un couple, son état de mouvement, c'est-à-dire sa vitesse ou sa direction, change.

En termes mathématiques, une force est définie comme le produit de la masse du corps sur lequel elle agit et de l'accélération que celui-ci subit sous l'effet de la force (2<sup>e</sup> loi de Newton).



Il existe une série de forces qui sont utilisées comme autant de concepts établis et qui jouent un rôle dans la description des capteurs.

Au cours des pages suivantes, nous aborderons brièvement :

- La force gravitationnelle (gravitation)
- La force d'inertie
- La force centrifuge
- La force centripète et
- La force de Coriolis



# Qu'est-ce que le mouvement ?

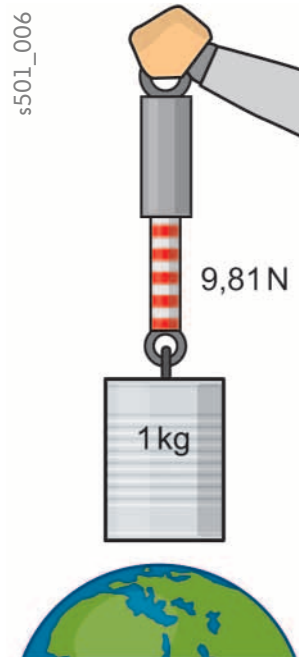
## Gravitation

Pour nous qui nous trouvons sur Terre, la gravitation résulte essentiellement de la masse de notre planète. La gravitation s'exerce en direction du centre de la Terre. Tout objet qui se trouve dans la zone d'influence de la Terre est soumis à cette force. Toutefois, elle est inversement proportionnelle au carré de la distance du corps par rapport à la Terre.

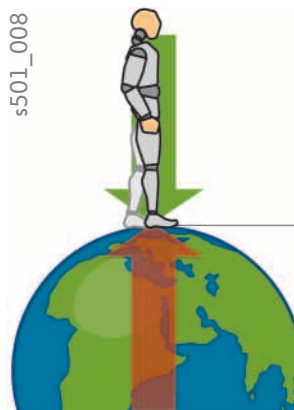
À partir de la gravitation, il est possible de déduire mathématiquement, selon la deuxième loi de Newton, l'accélération subie par un corps qui tombe. Cette accélération est de  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Par conséquent, en situation de chute libre par rapport à la Terre, nous subissons à chaque seconde une accélération de  $9,81 \text{ m/s}$  si l'on fait abstraction d'autres facteurs comme le frottement ou la portance.

Selon Newton, nous sentons la gravitation lorsque nous nous tenons debout parce qu'une force de même intensité agit dans le sens opposé et s'exerce par le bas contre nos pieds. Il a décrit ce phénomène par la formule « actio = reaction » ou « lex tertia » (troisième loi de Newton).

La mécanique newtonienne permet de décrire avec assez de précision la gravitation telle que nous la vivons, et d'en déduire le fondement mathématique. La théorie de Newton n'est en revanche plus assez précise pour décrire le comportement de très grandes masses, comme celles que l'on trouve dans les étoiles à neutrons ou les trous noirs. Newton n'a pas non plus pu expliquer comment la gravitation apparaît et selon quelles règles elle fonctionne.



Selon la théorie newtonienne de la gravitation, un corps d'une masse de 1 kg est soumis sur Terre une force gravitationnelle de 9,81 N.



Selon la 3<sup>e</sup> loi de Newton, les forces apparaissent toujours par paires opposées. Comme (en principe) nous ne commençons pas à nous enfoncer dans le sol ou à flotter sans raison, il faut qu'une force de même intensité (flèche rouge) s'exerce dans le sens opposé de la force gravitationnelle (flèche verte).



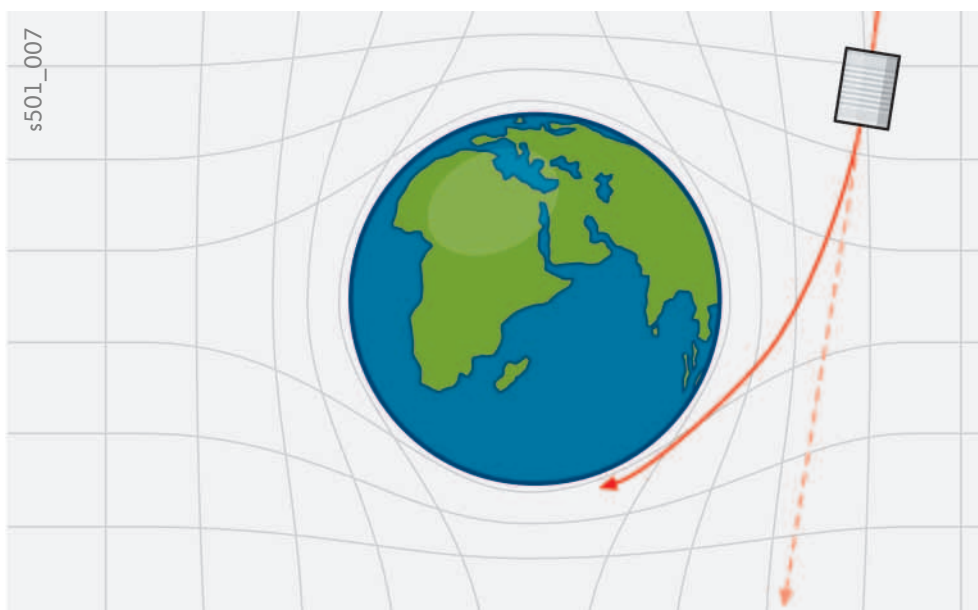
Selon la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, la gravitation n'est plus considérée comme une force agissant sur un corps en chute libre, mais comme une propriété géométrique de l'espace quadridimensionnel (espace-temps). Ce modèle de représentation de la structure fondamentale de l'univers comprend les trois dimensions spatiales et le temps. Ce qui est nouveau dans cette vision, c'est que tous les objets n'interagissent pas sur une scène statique et immuable, c'est-à-dire sur l'espace qui nous entoure, mais que les objets influencent également la scène, comme la scène influence elle-même les objets.

De manière très simplifiée, cela signifie que tous les objets qui possèdent une masse génèrent là où ils se trouvent une perturbation, ou une courbure, de la structure de l'espace-temps. Plus la masse est importante, plus la « torsion » de la structure de l'espace-temps est importante. Si la différence de masse entre deux objets est très importante, l'influence de l'objet léger sur l'objet lourd sera à peine mesurable.

Cela signifie que par rapport à l'influence qu'exerce la Terre sur un avion, celle de l'avion sur la Terre est négligeable.

Si un objet, lors de son parcours à travers l'univers, parvient dans une zone courbée de ce type, il est détourné vers l'objet à forte masse par la courbure de l'espace-temps.

Si la force et la direction du mouvement propre de l'objet sont suffisantes pour franchir la courbure, l'objet peut quitter la zone incurvée. Si la force et la direction du mouvement propre ne sont pas suffisantes, l'objet léger tombe sur l'objet de plus forte masse. Contrairement à la définition newtonienne, aucune force ne s'exerce sur le corps lors de cette chute libre. Ce dernier est en apesanteur.



La « courbure » du continuum espace-temps provoquée par un objet de forte masse amène un objet léger se déplaçant en ligne droite à dévier de sa trajectoire.

# Qu'est-ce que le mouvement ?

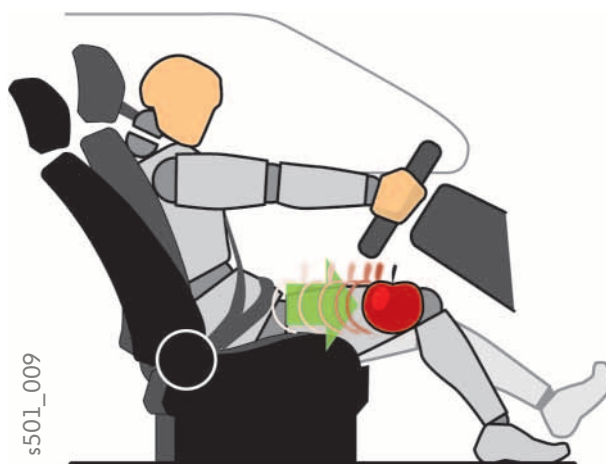
## Force d'inertie

Les forces d'inertie sont également appelées forces fictives. La force centrifuge, la force centripète et la force de Coriolis font également partie des forces d'inerties ou forces fictives. Le terme de force fictive fait référence au fait que la description de l'effet de la force varie selon que l'observateur et l'objet observé se trouvent ou non dans le même référentiel.

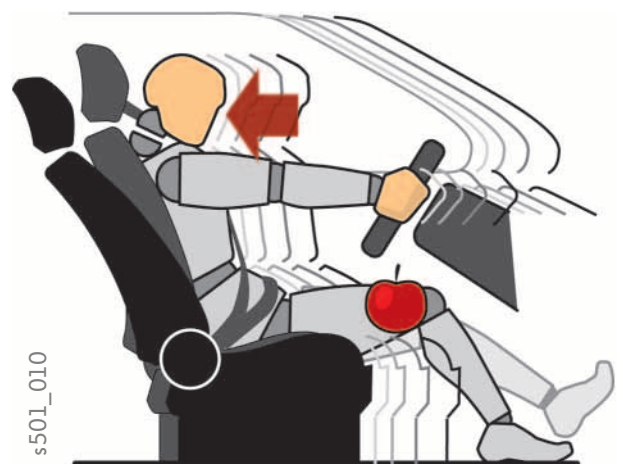
Prenons l'exemple d'une pomme placée à côté de vous dans le véhicule, sur le siège du passager avant. Vous roulez à allure constante et la pomme, tout comme vous, est immobile par rapport à la voiture. Vous voyez que la pomme ne bouge pas sur le siège. À présent, si vous freinez brusquement, la pomme est projetée dans le sens de la marche, alors que vous êtes retenu par la ceinture de sécurité. De votre point de vue, la pomme change d'état de mouvement alors que le vôtre ne change pas.

Il doit donc y avoir une force qui amène la pomme à se déplacer dans le référentiel de l'automobile. Il s'agit de la force d'inertie. On parle également d'inertie, ou de l'effort d'un corps pour conserver son état de mouvement courant.

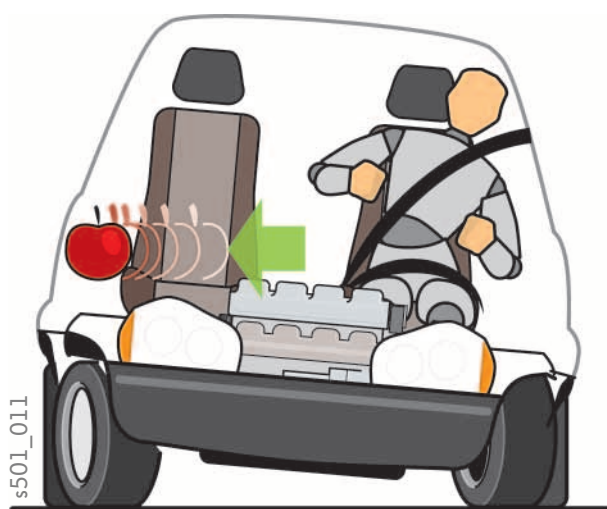
Du point de vue d'un observateur situé dans la rue, devant lequel vous passez au moment du freinage, le processus se présente différemment : vous êtes soumis à une accélération négative sous l'effet d'une force, la force de freinage, parce que vous êtes fermement lié au véhicule qui freine par la ceinture de sécurité. Pendant ce temps, la pomme est projetée à vitesse constante, parce qu'elle n'est soumise à aucune force de freinage. De ce point de vue, vous changez d'état de mouvement, alors que la pomme conserve le sien. L'observateur n'a pas besoin de la force d'inertie pour expliquer le comportement de la pomme.



Du point de vue du conducteur, la pomme est accélérée par sa force d'inertie lors du freinage.



Pour un observateur extérieur, le conducteur et l'automobile décélèrent sous l'effet de la force de freinage (accélération négative) alors que la pomme conserve son état de mouvement en n'étant soumise à quasiment aucune force.



Du point de vue du conducteur, qui se trouve dans le même référentiel que la pomme, il doit y avoir une force dans le virage qui accélère la pomme vers l'extérieur.

## Force centrifuge

Si l'on considère un référentiel en rotation depuis une position située à l'intérieur de ce même référentiel, il semble y avoir une force qui attire vers l'extérieur un objet se trouvant dans le référentiel de l'observateur. Poursuivons avec l'exemple de la pomme posée sur le siège du passager avant dans votre voiture. Dès que vous prenez un virage, la pomme se déplace sur le siège dans la direction allant du centre du virage vers l'extérieur, alors que vous-même agissez contre cette attraction grâce à la ceinture de sécurité et à votre posture. De votre point de vue, la pomme subit une accélération vers l'extérieur sous l'effet de la force centrifuge.



Pour que la pomme puisse rester immobile dans un virage du point de vue de l'observateur, il doit y avoir une force centripète (rouge) de même intensité que la force centrifuge (verte) et agissant dans le sens opposé.

## Force centripète

Selon un principe fondamental de la mécanique newtonienne, un corps est immobile lorsque la somme des forces auxquelles il est soumis est nulle. Pour chaque force exercée, il doit donc exister une force antagoniste.

Lorsqu'un corps se trouve dans un référentiel en rotation, il est soumis à une force centrifuge qui l'accélère vers l'extérieur de sorte qu'il se déplace par rapport au référentiel. Cette force s'exerce tant que le référentiel poursuit sa rotation. Cependant, si le corps reste immobile par rapport à l'observateur, c'est qu'il doit y avoir une force égale qui agit dans le sens opposé à la force centrifuge.

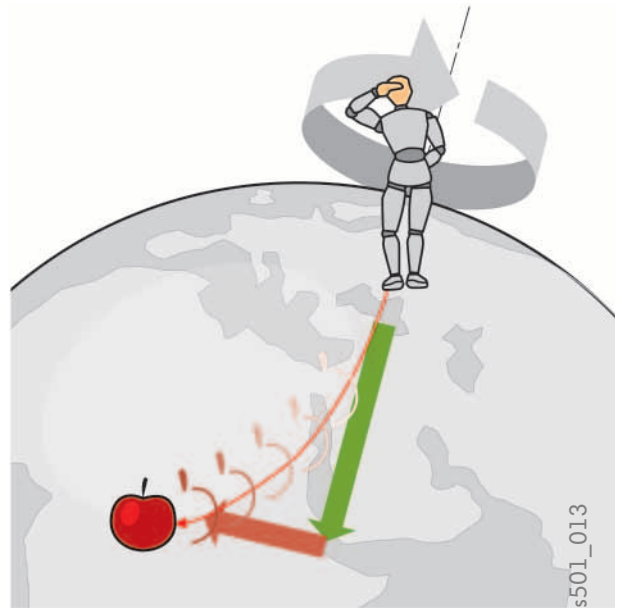
Il s'agit de la force centripète.

# Qu'est-ce que le mouvement ?

## Force de Coriolis

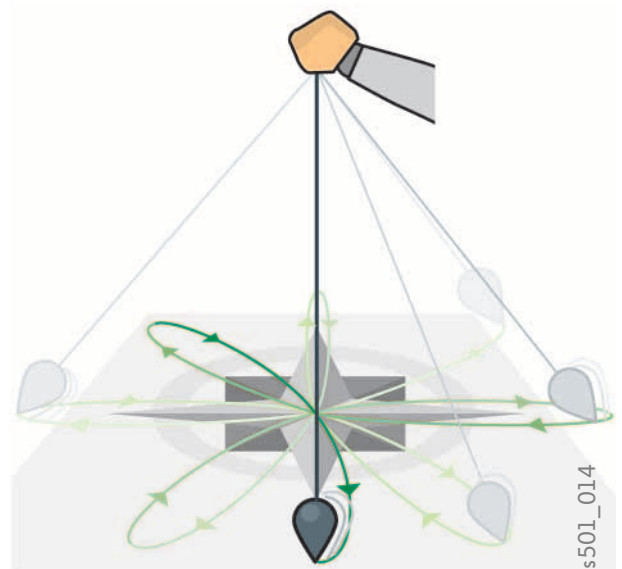
La force de Coriolis constitue également une force d'inertie ou force fictive. Elle entre en jeu pour décrire des mouvements par rapport à un référentiel en rotation. Elle s'exerce sur les mouvements verticaux comme horizontaux d'un corps à l'intérieur de ce référentiel et dépend notamment du sens de rotation du référentiel. Si l'on prend la Terre comme référentiel, la force de Coriolis s'exerce sur tous les objets qui s'y trouvent en mouvement et résulte de la rotation de la planète.

La force de Coriolis joue ainsi un rôle important dans l'évolution des conditions météorologiques.



Pour un observateur situé sur Terre, il doit y avoir une force qui dévie la pomme lancée en ligne droite : c'est la force de Coriolis.

L'effet de la force de Coriolis peut être mis en évidence par les oscillations d'un pendule (pendule de Foucault). Dans l'hémisphère nord, la force de Coriolis entraîne une déviation du mouvement du pendule vers la droite. Le plan d'oscillation du pendule se décale ainsi dans le sens des aiguilles d'une montre, décrivant un mouvement dont le tracé est caractéristique du pendule de Foucault. Dans la technologie des capteurs, la force de Coriolis joue par ex. un rôle dans la mesure de la vitesse de lacet ou des débits massiques.



Le pendule de Foucault permet d'illustrer l'effet de la force de Coriolis. Le plan d'oscillation du pendule effectue une rotation de  $360^\circ$  en 24 heures. Le pendule décrit ainsi un ensemble d'ellipses qui se chevauchent.

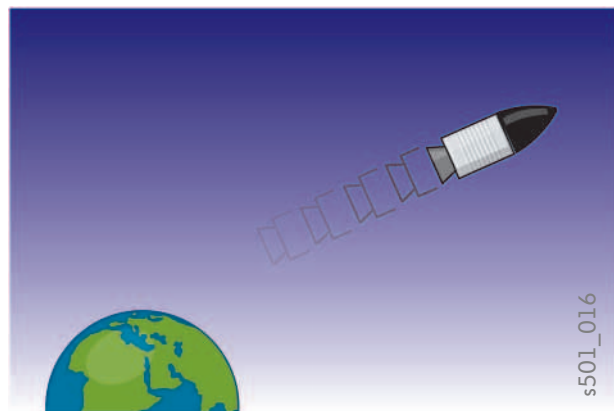
## Mouvements uniforme et non uniforme

On parle de mouvement uniforme lorsqu'un corps se déplace à vitesse constante. Si une nouvelle accélération a lieu, de sorte que la vitesse du corps change, il s'agit d'un mouvement non uniforme. Si l'accélération subie est constante, le mouvement qui en résulte est un mouvement non uniforme à accélération uniforme.



s501\_015

Tant que le moteur de la fusée fonctionne, celle-ci continue d'accélérer. Sa vitesse augmente.  
Il s'agit d'un mouvement non uniforme.



s501\_016

Une fois le moteur coupé, la fusée glisse à travers l'espace sans accélération supplémentaire.  
Elle suit maintenant un mouvement uniforme à accélération constante, si l'on fait abstraction d'autres effets comme l'influence de la gravitation.



Quand il s'agit de décrire tous les phénomènes qui se produisent sur Terre à l'échelle de notre vie quotidienne, la mécanique newtonienne suffit en général à obtenir des résultats suffisamment précis. Ce n'est que lorsqu'on considère des masses très grandes ou très faibles (trous noirs, particules élémentaires) et des vitesses très élevées (proches de la vitesse de la lumière) que l'approche newtonienne n'est plus suffisante pour obtenir des résultats compatibles avec les observations. Pour décrire les grandes masses et les vitesses très élevées, on a recours à la théorie de la relativité générale ou de la relativité restreinte d'Einstein, et pour les très petites masses et les vitesses élevées, on utilise la mécanique quantique.

# Qu'est-ce que l'énergie ?

S'il en fallait la preuve ; ce sont les premiers essais d'armes nucléaires qui ont démontré l'énorme quantité d'énergie contenue dans la matière.

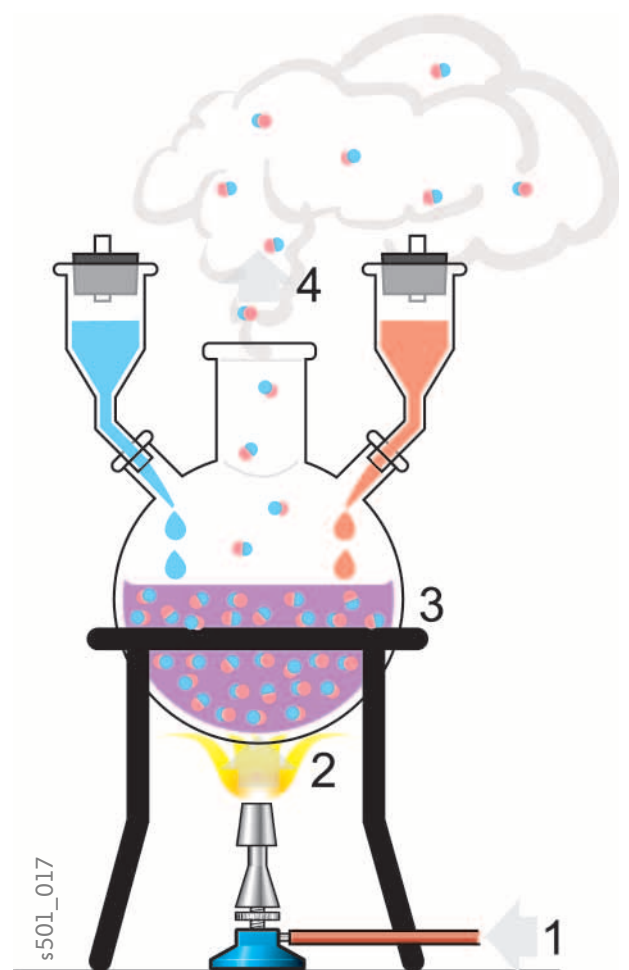
Et c'est également l'équation mondialement célèbre d'Einstein,  $E = mc^2$ , qui formalise pour tout un chacun cette mise en équivalence de la masse et de l'énergie.

En mécanique classique, on entend par énergie une grandeur physique en mesure de produire un travail. Suivant la branche des sciences naturelles dans laquelle on se trouve, on utilisera différentes définitions de l'énergie et des formes d'énergie.



## Formes d'énergie

Les différentes conceptions de l'énergie résultent du fait que la nature des objets étudiés est différente. L'énergie cinétique d'un corps en cours d'accélération nécessite une autre définition ou déduction physique qu'une description de l'énergie à mettre en œuvre pour créer ou pour rompre une liaison chimique. Mais peu importe la définition d'une forme d'énergie donnée : en définitive, toutes les énergies peuvent être converties (au moins mathématiquement) en n'importe quelle autre forme d'énergie. Elles sont donc équivalentes, comme la masse et l'énergie dans la formule d'Einstein. Sur le plan pratique, cette équivalence connaît toutefois certaines limites. En effet, les effets secondaires ou les interactions entraînent en général une « dégradation de l'énergie » (déperditions énergétiques apparentes), et la conversion en une autre forme d'énergie peut être impossible techniquement ou nécessiter l'emploi de moyens trop importants.



Exemples de formes d'énergie différentes :

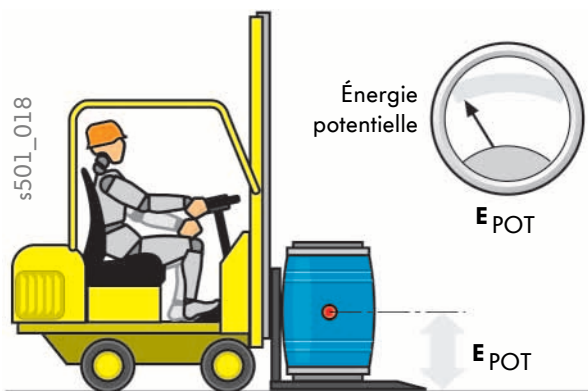
1. Énergie chimique contenue dans le gaz du bec Bunsen
2. Énergie thermique de la flamme du bec Bunsen
3. Énergie cinétique et énergie de liaison dans la réaction chimique des deux réactifs
4. Énergie cinétique des molécules de vapeur



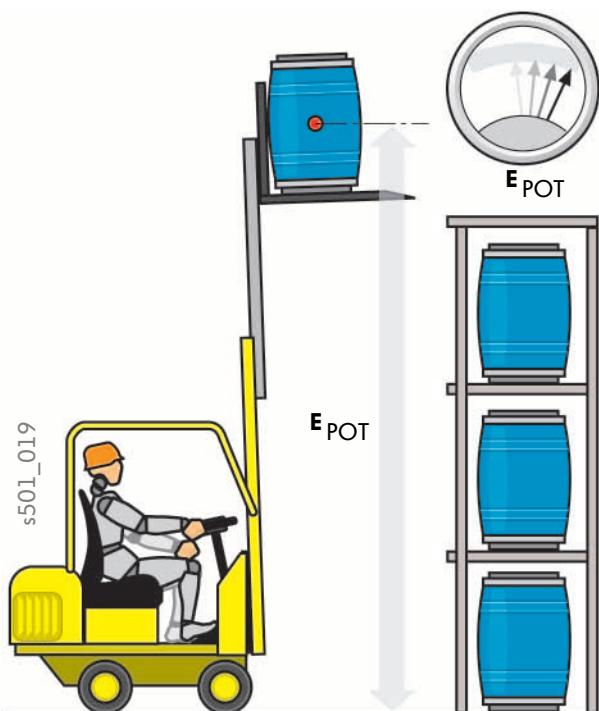
# L'énergie potentielle et ses sœurs

Nous nous contenterons ici d'aborder brièvement quelques types d'énergie utilisés dans la présente série pour décrire des techniques de mesure ou certaines notions fondamentales de physique. Il s'agit de :

- L'énergie potentielle
- L'énergie cinétique
- L'énergie thermique
- L'énergie chimique



L'énergie potentielle ( $E_{POT}$ ) du corps est faible.



Grâce au travail fourni par le chariot élévateur pour soulever le corps, l'énergie potentielle de ce dernier augmente d'une valeur équivalente au travail fourni.

## Énergie potentielle

Lorsqu'on soulève, par ex. à l'aide d'un chariot élévateur, un corps immobile sur le sol et qu'on le range sur une étagère où il demeure de nouveau immobile, la quantité d'énergie potentielle de ce corps a été augmentée de l'énergie mise en œuvre par le chariot élévateur sous forme de travail pour soulever l'objet.

On décrit cette forme d'énergie comme celle que possède un corps en raison de sa situation par rapport à un champ de force environnant (en général le champ de pesanteur / la gravitation terrestre). Si la position du corps change dans le sens de la gravitation, c'est-à-dire s'il tombe, son énergie potentielle diminue. S'il gagne en altitude dans le sens inverse de la pesanteur, son énergie potentielle augmente. Si le corps change de position perpendiculairement à la gravitation, c'est-à-dire en restant à la « même hauteur » par rapport à la surface de la Terre, son énergie potentielle reste constante. Si le corps tombe de l'étagère, son énergie potentielle se transforme au fur et à mesure de sa chute en énergie cinétique.





# Qu'est-ce que l'énergie ?

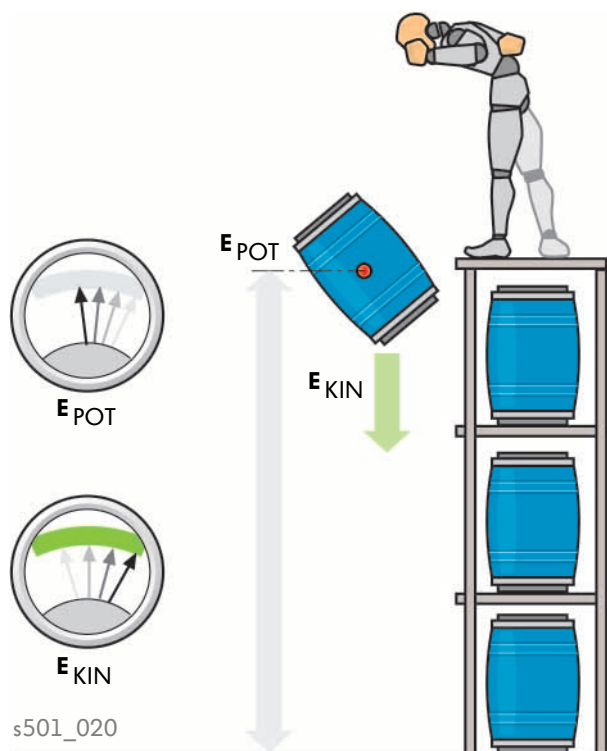
## Énergie cinétique

Il s'agit de l'énergie mise en œuvre dans un état de mouvement. Plus un corps est accéléré, et par conséquent plus sa vitesse augmente, plus son énergie cinétique devient importante. Si le corps n'est soumis à aucune autre force et qu'il n'y a pas de déperdition d'énergie, comme celle causée par le frottement, l'énergie cinétique reste constante.

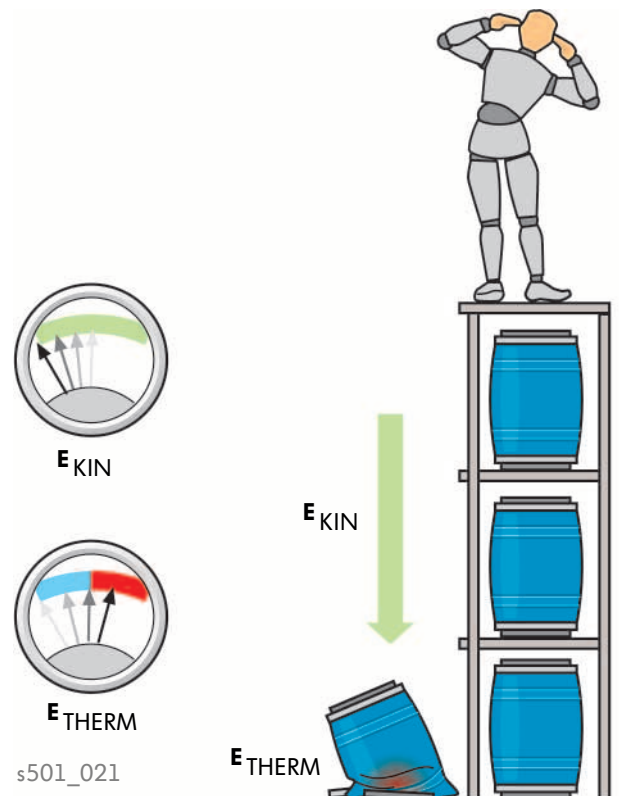


Dans ce cas, le corps poursuit son mouvement sans changer de vitesse.

S'il perd de la vitesse, par ex. sous l'effet d'un frottement, une partie de son énergie cinétique se transforme en énergie thermique.



L'énergie potentielle ( $E_{POT}$ ) du corps diminue à mesure que l'énergie cinétique ( $E_{CIN}$ ) augmente au cours de la chute en raison de l'accélération de la pesanteur.



Une partie de l'énergie cinétique ( $E_{CIN}$ ) se transforme en énergie thermique ( $E_{THERM}$ ) sous l'effet des forces de déformation générées par la collision.

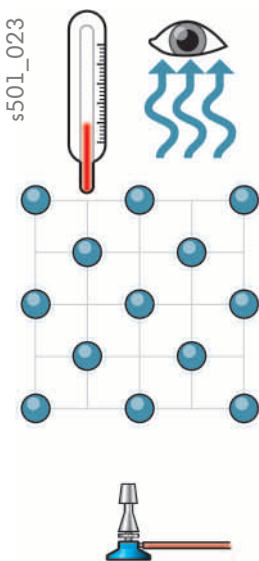
## Énergie thermique

L'énergie thermique, ou énergie calorifique, repose, pour l'exprimer de manière très simplifiée, sur le mouvement des atomes ou des molécules d'un corps. Plus on transmet d'énergie thermique à ce corps, plus les atomes (molécules) se mettent à vibrer sur leur position dans le réseau structurel du corps en question. Tout corps chauffé s'efforce de « se débarrasser » de l'énergie thermique qu'il a reçue afin de revenir à un état plus pauvre en énergie, et donc plus stable sur le plan thermodynamique. Cet objectif est atteint notamment grâce aux atomes, qui dégagent l'énergie excédentaire dans l'environnement sous forme de rayonnement électromagnétique.

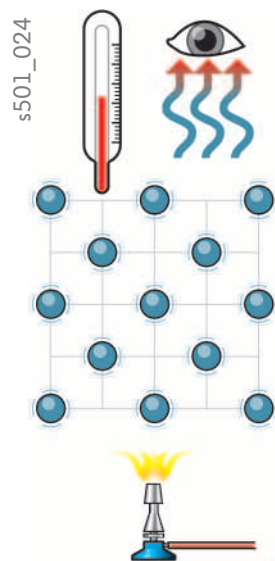
Selon les propriétés de la matière, ce phénomène sera perceptible comme un rayonnement thermique, et éventuellement visible (incandescence).

Si l'énergie apportée dépasse une valeur spécifique au matériau constituant le corps en question, les atomes (molécules) se détachent de la structure dudit corps.

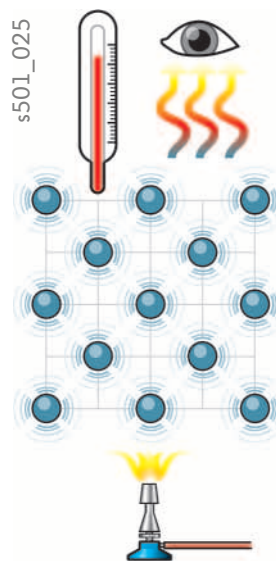
Le matériau fond ou s'évapore. Si, entre autres conditions, on transmet à un mélange d'atomes (ou de molécules) une quantité suffisante d'énergie thermique, les atomes peuvent se lier pour former de nouvelles molécules. L'énergie thermique est alors convertie en énergie de liaison chimique.



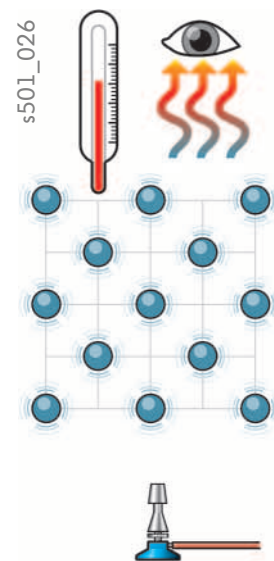
Sans apport d'énergie, le corps est à température ambiante. Les éléments de la structure (molécules/atomes) ne vibrent que modérément à leur emplacement dans le réseau. Les mouvements des éléments de structure ne cessent totalement qu'à une température de 0 K ( $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).



Le corps est chauffé, sa température augmente. Les mouvements des éléments de la structure s'amplifient. Le corps commence à émettre un rayonnement électromagnétique sous forme de rayonnement infrarouge (chaleur) et éventuellement de lumière (incandescence).



Au fur et à mesure que l'apport d'énergie et le mouvement des éléments de la structure augmentent, le rayonnement électromagnétique s'intensifie.



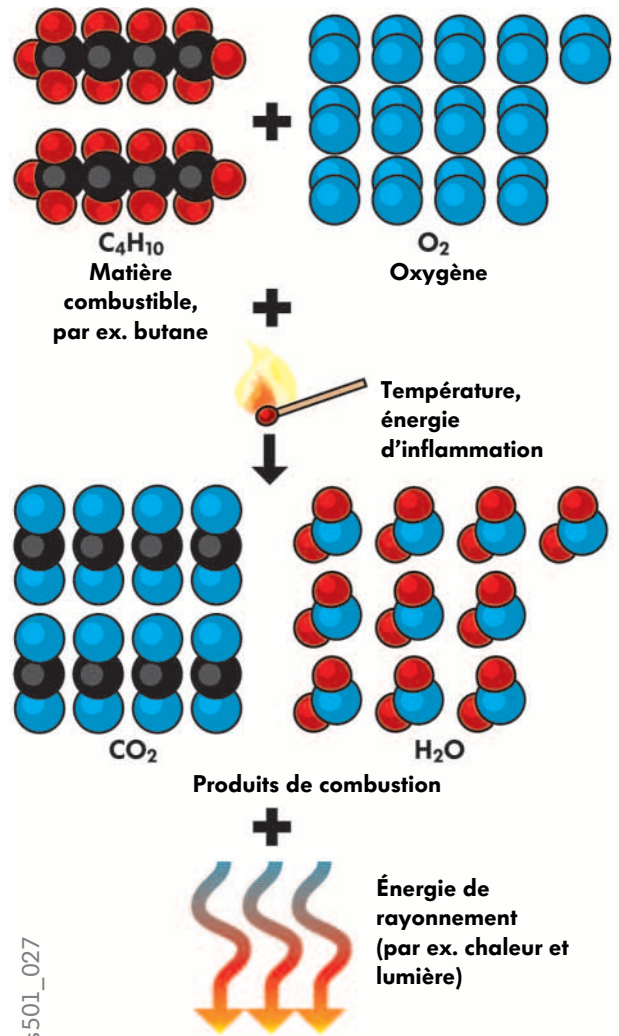
Lorsque l'apport d'énergie est interrompu, le corps continue à émettre un rayonnement électromagnétique jusqu'à ce qu'il ait de nouveau atteint la température ambiante.

# Qu'est-ce que l'énergie ?

## Énergie chimique

L'énergie chimique, ou énergie de liaison, correspond à la quantité d'énergie nécessaire pour lier entre eux les éléments considérés (atomes ou molécules).

Lorsque ces liaisons sont rompues, par ex. lors de la combustion de molécules de carburant, cette énergie de liaison est de nouveau libérée sous forme d'énergie thermique et peut être utilisée pour fournir un travail (par ex. dans un moteur à combustion).



La combustion (oxydation) d'une matière combustible entraîne la libération, sous forme de chaleur, d'une partie de l'énergie de liaison stockée dans cette matière.

## Transformation des énergies et conservation de l'énergie

Comme nous l'avons indiqué plus haut, une énergie peut être transformée plus ou moins complètement en une autre.

Ce qu'il est important de préciser, c'est que le processus n'entraîne aucune perte d'énergie. Si l'on observe le phénomène de manière superficielle, la transformation de l'énergie chimique du carburant en énergie cinétique à l'intérieur du moteur à combustion ne s'effectue pas à 100%. Il semble y avoir une déperdition d'énergie. Mais il ne s'agit que d'une apparence, car une partie de l'énergie chimique libérée est également transformée en énergie thermique et en d'autres formes d'énergie. La somme de toutes ces énergies doit cependant correspondre à la valeur de l'énergie chimique. En règle générale, dans un système fermé, c'est-à-dire un système d'où l'énergie ne peut pas s'échapper sous l'effet d'interactions, la somme de toutes les énergies qu'il contient est constante.

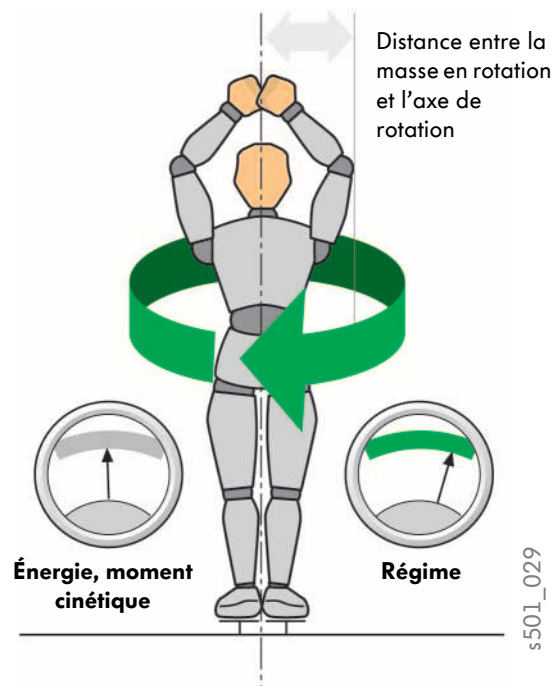
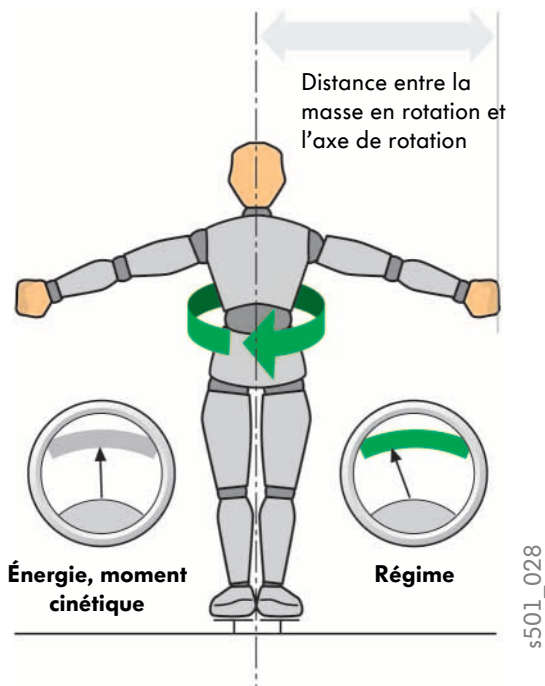
Il n'y a pas de perte d'énergie. Il ne peut toutefois pas non plus y avoir de gain d'énergie supplémentaire (loi de conservation de l'énergie).

## Exemple : moment cinétique

Le principe de conservation de l'énergie peut conduire un corps à changer de comportement ou de mouvement sans influence extérieure. Pour illustrer cette idée, prenons l'exemple d'un patineur artistique qui fait une pirouette. Cet exemple utilise le moment cinétique en tant que forme d'énergie cinétique. Si le patineur commence la pirouette avec les bras écartés, puis les ramène contre son corps, sa vitesse de rotation augmente sans qu'il ne soit soumis à aucune force d'accélération extérieure.

Le patineur se donne un certain moment cinétique lorsqu'il commence la pirouette.

Ce moment cinétique dépend de la masse du patineur, de sa vitesse de rotation et de la distance entre la masse en rotation et l'axe de rotation. Si le patineur réduit la distance par rapport à l'axe de rotation en ramenant les bras, les deux autres facteurs, en vertu du principe de conservation de l'énergie ou plutôt de conservation du moment cinétique total, doivent nécessairement changer. Comme le poids du patineur reste identique, c'est la vitesse de rotation qui doit changer pour compenser la réduction de la distance.



Pour que la loi de conservation de l'énergie soit vérifiée, la vitesse de rotation du patineur doit augmenter lorsque la distance de la masse en rotation par rapport à l'axe de rotation diminue.

# Qu'est-ce que la matière ?

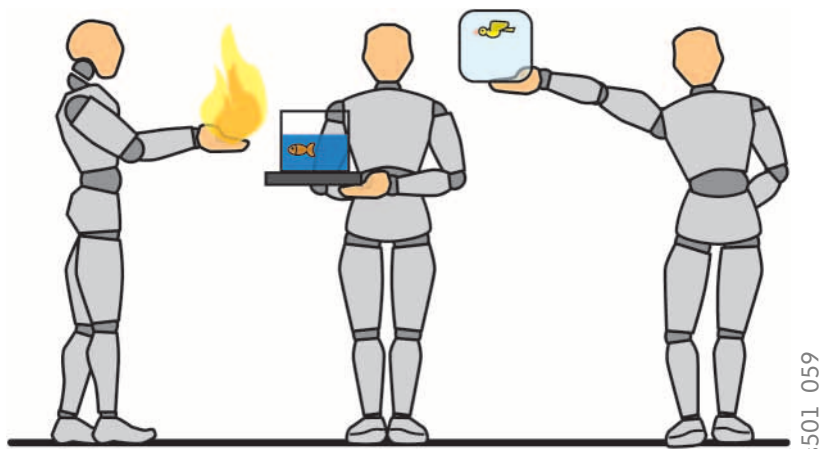
Si l'on se fonde sur l'équation d'Einstein :  $E = mc^2$ , on peut concevoir la matière comme de l'énergie « figée » palpable. Cela n'explique toutefois pas ce qu'est réellement la matière.

Les philosophes de l'Antiquité partaient déjà du principe que tous les objets qui nous entourent étaient composés de certains éléments, tous du même type. En revanche, le doute et la discorde régnaient quant à la nature de ces éléments. Héraclite pensait que tout était né du feu, Thalès s'était prononcé pour l'eau comme matière élémentaire ou originelle, Anaximène ramenait quant à lui tout à du gaz (l'air).

Empédocle proposait une théorie conciliatrice, selon laquelle tous les objets étaient composés de feu, d'eau, de terre et d'air. L'approche d'Empédocle a perduré jusqu'au Bas Moyen-Âge et a conduit notamment aux tentatives des alchimistes d'obtenir de l'or ou la pierre philosophale à partir de ces éléments de base. D'après l'état des connaissances actuelles, c'est Démocrite, lui aussi un philosophe antique, qui était le plus proche de la vérité. Lui et son maître Leucippe pensaient que tout était composé d'atomes, c'est-à-dire d'unités de matière indivisibles, identiques. Cette vision correspond assez exactement à notre conception actuelle de la matière.

Il est apparu que même les atomes de Démocrite pouvaient encore être fractionnés, si bien que les théories actuelles de la structure de la matière descendent bien en deça de l'échelle atomique et définissent de nouvelles particules élémentaires, plus petites.

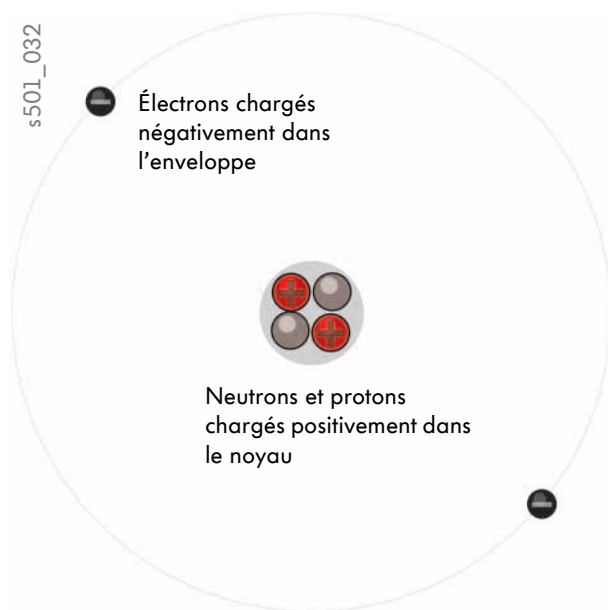
Il n'existe toutefois pas un « type d'atome » unique (élément) dont la matière est constituée sur la base des particules élémentaires, mais on compte désormais 118 éléments, parmi lesquels cependant seuls 83 sont stables. Les 35 autres éléments sont radioactifs, ce qui signifie qu'ils se décomposent en d'autres types d'atomes lorsqu'on les expose à un rayonnement et/ou à des particules subatomiques. Beaucoup de ces éléments radioactifs ne peuvent être créés qu'en laboratoire (accélérateur de particules), et pour un laps de temps très court.



Dans l'Antiquité, les différents philosophes naturalistes faisaient découler les éléments composant la matière de différentes substances premières, comme le feu, l'eau ou l'air.

s501\_059

## Structure de base des éléments



Exemple de structure atomique : l'hélium

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
1.	1 <b>H</b> 1,0079							2 <b>He</b> 4,0026
2.	3 <b>Li</b> 6,941	4 <b>Be</b> 9,0122	5 <b>B</b> 10,811	6 <b>C</b> 12,011	7 <b>N</b> 14,007	8 <b>O</b> 15,999	9 <b>F</b> 18,988	10 <b>Ne</b> 20,180
3.	11 <b>Na</b> 22,990	12 <b>Mg</b> 24,305	13 <b>Al</b> 26,982	14 <b>Si</b> 28,086	15 <b>P</b> 30,974	16 <b>S</b> 32,065	17 <b>Cl</b> 35,453	18 <b>Ar</b> 39,948
4.	19 <b>K</b> 39,098	20 <b>Ca</b> 40,078	31 <b>Ga</b> 69,723	32 <b>Ge</b> 72,64	33 <b>As</b> 74,922	34 <b>Se</b> 78,96	35 <b>Br</b> 79,904	36 <b>Kr</b> 83,798
5.	37 <b>Rb</b> 85,468	38 <b>Sr</b> 87,62	49 <b>In</b> 114,82	50 <b>Sn</b> 118,71	51 <b>Sb</b> 121,76	52 <b>Te</b> 127,60	53 <b>J</b> 126,90	54 <b>Xe</b> 131,29

Extrait du tableau périodique des éléments

La figure représente les éléments des huit blocs principaux jusqu'à la 5e période.

Chaque case contient notamment, selon la version du tableau périodique considérée, l'abréviation utilisée sur le plan international (par ex. Be pour béryllium), le numéro atomique (ici en haut et à gauche de chaque case) et la masse atomique (ici en bas au centre).

Chaque atome est composé des particules

élémentaires que sont les électrons, les protons et les neutrons, et celles-ci sont elles-mêmes constituées de particules encore plus petites (quarks, bosons, muons, etc), dont il ne sera pas question ici.

Les protons et les neutrons forment le noyau, et donc le centre de masse de l'atome, d'une dimension très, très faible par rapport au diamètre de ce dernier. Les électrons, bien plus petits et plus légers, forment l'enveloppe de l'atome. Celle-ci occupe l'essentiel du volume de l'atome. Un atome, c'est donc un noyau minuscule et lourd avec beaucoup de « néant » tout autour.

Les protons sont porteurs d'une charge élémentaire positive, les électrons d'une charge élémentaire négative. Les neutrons ne possèdent pas de charge électrique. Pour qu'un atome puisse être électriquement neutre, il doit posséder le même nombre de protons et d'électrons.

Les atomes d'un élément qui possèdent le même nombre de protons, mais un nombre différent de

neutrons sont appelés isotopes car ils se trouvent au même emplacement du tableau périodique des éléments (iso = même, topos = lieu). Le tableau périodique classe toutes les sortes d'atomes selon le nombre de protons que ceux-ci possèdent dans leur noyau (numéro atomique) et leurs propriétés en matière de liaison chimique, lesquelles sont déterminées par les électrons extérieurs (électrons de valence) de l'atome. Les éléments ne peuvent pas être fractionnés par des processus chimiques, ils répondent donc en grande partie à la définition de Démocrite des atomes comme étant les plus petites particules élémentaires de la matière.





# Qu'est-ce que la matière ?

Il y a eu, et il y a encore actuellement, différents modèles ou théories sur la structure subatomique exacte des éléments. Un modèle très parlant, basé sur les travaux d'Ernest Rutherford et de Niels Bohr, repose sur un modèle planétaire et en couches. Les protons et les neutrons sont ici représentés comme un noyau semblable à un soleil, autour duquel gravitent les électrons, comme des planètes sur leur orbite. Cette représentation ne peut toutefois pas rendre compte d'un effet spécifique, ou plutôt de son absence.



En effet, en électrodynamique classique, un porteur de charge qui décrit une orbite émet un rayonnement électromagnétique, et par conséquent perd de l'énergie. Selon la loi de conservation des moments, cela devrait conduire l'électron à s'écraser sur le noyau, mais ce n'est visiblement pas le cas, puisque dans ce cas nous n'existerions pas.

À partir de cela, Niels Bohr a mis au point un modèle qui prévoit l'existence de niveaux d'énergie particuliers, ou couches, pour les électrons, où ceux-ci n'émettent aucun rayonnement. Cet aspect non linéaire de la structure de la matière a été confirmé à l'aide d'expériences et poussé plus avant par Max Planck, le fondateur de la théorie des quanta.

La théorie des quanta décrit les particules élémentaires, comme les électrons, non plus comme des particules concrètes dont on peut indiquer l'emplacement et la vitesse, mais sous la forme de fonctions de probabilité très complexes, parce qu'à cette échelle, il n'est plus possible de déterminer simultanément le lieu et la vitesse (principe d'incertitude de Heisenberg). On ne peut donc plus dire : « Il y a ici un électron et sa vitesse est de  $x$  », mais « Il y a peut-être ici un électron, et si tel est le cas, je ne peux pas déterminer sa vitesse ».

Même des relations qui nous semblent évidentes, comme celle de cause à effet, perdent de leur clarté à l'échelle quantique. C'est pourquoi cette théorie est hors de portée de l'entendement de presque tous les êtres humains. Niels Bohr, cofondateur de la théorie des quanta, disait à propos de cette dernière : « Quiconque n'est pas choqué par la théorie des quanta ne la comprend pas ». Et Albert Einstein lui-même, dont les recherches sur l'effet photoélectrique ont largement contribué à la formulation de la théorie des quanta, disait à propos de certains aspects de la mécanique quantique : « Dieu ne joue pas aux dés ».



Selon le modèle planétaire, ou modèle en couches, les électrons d'un atome circulent autour du noyau comme des planètes autour de l'astre central.

L'exemple ci-dessus représente le modèle de l'atome de carbone, avec un noyau composé de 6 protons et de 6 neutrons, et d'une enveloppe composée de 6 électrons. Parmi ces électrons, un certain nombre suivent une orbite définie, « stable » (couche électronique), où ils peuvent circuler autour du noyau sans émettre de rayonnement. La couche la plus proche du centre est la couche K, avec au maximum 2 électrons, puis vient la couche L, avec au maximum 8 électrons (dans le cas du carbone, elle comporte 4 électrons sur 8 possibles). Les éléments de périodes plus élevées (par ex. le sodium) comportent des couches supplémentaires.

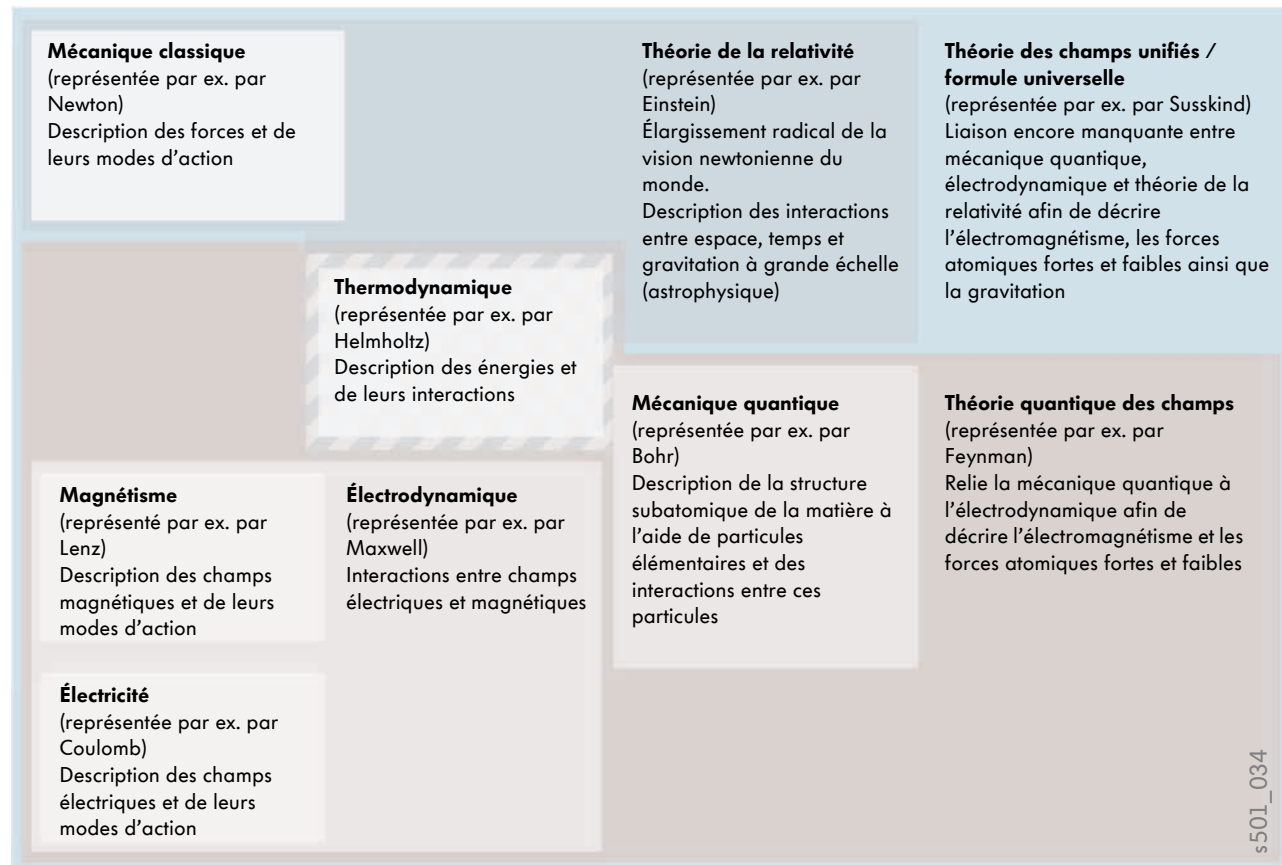


Et pourtant, de très nombreux appareils électriques et électroniques (ordinateurs, capteurs, cartes à puce, etc.), dont l'utilisation au quotidien nous semble aujourd'hui aller de soi et que l'on trouve en construction automobile, fonctionnent à l'échelle subatomique, selon des règles que la théorie des quanta décrit mieux que les théories classiques. C'est pourquoi il faut au moins savoir que cette théorie existe et qu'elle se prête particulièrement bien à l'explication des processus qui ont lieu à l'échelle subatomique.

Bien avant Einstein, l'évolution de la recherche fondamentale en physique tendait à synthétiser toutes les grandeurs élémentaires en une théorie des champs unifiés, ou formule universelle. Peut-être cette aspiration correspond-elle au vieux rêve de la pierre philosophale des alchimistes, qui explique tout et qui donne la vie éternelle.

Aujourd'hui, une amorce prometteuse de la théorie des champs unifiés est à trouver dans la théorie des cordes ou des supercordes (théorie M). Grâce à elle, il sera peut-être possible d'inclure la gravitation dans une nouvelle théorie, et d'asseoir ainsi la mécanique quantique et la théorie de la relativité sur une base mathématique commune.

La question de la structure exacte de la matière et de son origine garde donc tout son intérêt et son actualité.



Synoptique extrêmement simplifié des différentes théories physiques

# Qu'est-ce que la matière ?

## Facteurs d'influence subatomiques dans la technologie des capteurs

Certains procédés de mesure décrits dans la présente série reposent sur les propriétés des éléments subatomiques de la matière : électrons, protons, quarks, etc. On parle alors de propriétés quantiques de la matière, comme le spin de l'électron. Décrire et expliquer ces propriétés sous toutes leurs facettes dépasserait de loin le cadre de cette série. Nous nous contenterons donc ici d'une version extrêmement simplifiée.

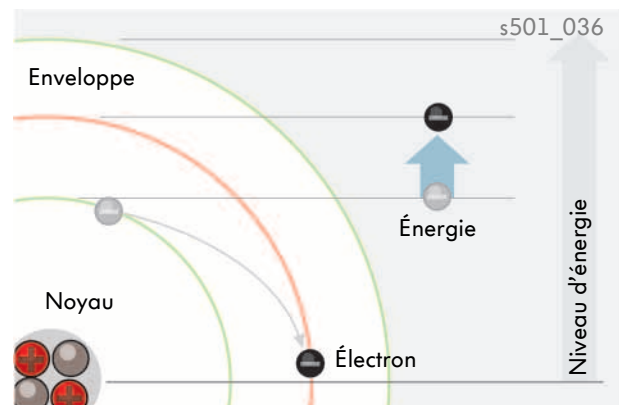
Dans des circonstances normales, tous les systèmes physiques (par ex. les atomes ou leurs constituants) essaient d'atteindre un état énergétique minimal, car celui-ci est plus stable du point de vue thermodynamique qu'un état énergétique plus élevé. Certaines méthodes de mesure, comme la tomographie, exploitent cette propriété : on apporte artificiellement de l'énergie à des particules afin de les faire passer à un état d'excitation énergétiquement plus élevé. Pour revenir à un état plus stable, ces particules essaient alors de se débarrasser de leur énergie « excédentaire » par ex. en émettant un rayonnement ou en modifiant leurs propriétés quantiques.

Cela peut être mesuré à l'aide de capteurs adéquats.

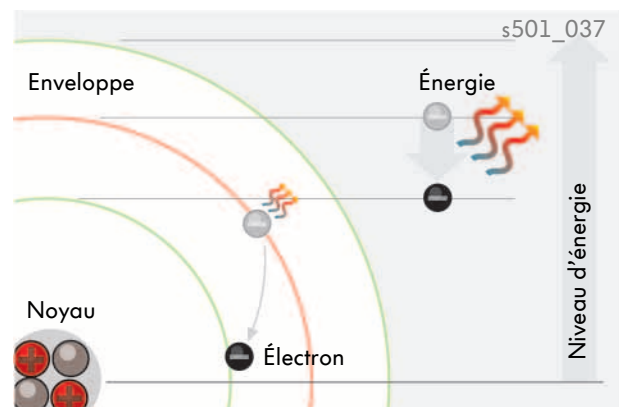


### Exemple de l'électron

Si nous reprenons le modèle en couches de la structure atomique, les électrons d'un atome se répartissent sur certains niveaux d'énergie, ou couches, « stables ». On les appelle également « niveaux d'énergie autorisés » où, selon Bohr, les électrons peuvent circuler sans s'écraser sur le noyau. Grâce à un apport d'énergie approprié, on peut forcer les électrons à passer à un niveau d'énergie « autorisé » plus élevé. Comme ce phénomène, qualifié de « saut quantique », a conduit l'électron dans un état de plus forte énergie et donc thermodynamiquement plus défavorable, l'électron excité essaie de se défaire le plus vite possible de cette énergie, et donc de revenir au niveau d'énergie inférieur plus stable, en émettant un rayonnement électromagnétique. En utilisant des capteurs appropriés, on peut déterminer qualitativement et quantitativement le rayonnement émis et se servir des données recueillies pour tirer des conclusions quant à l'objet mesuré.

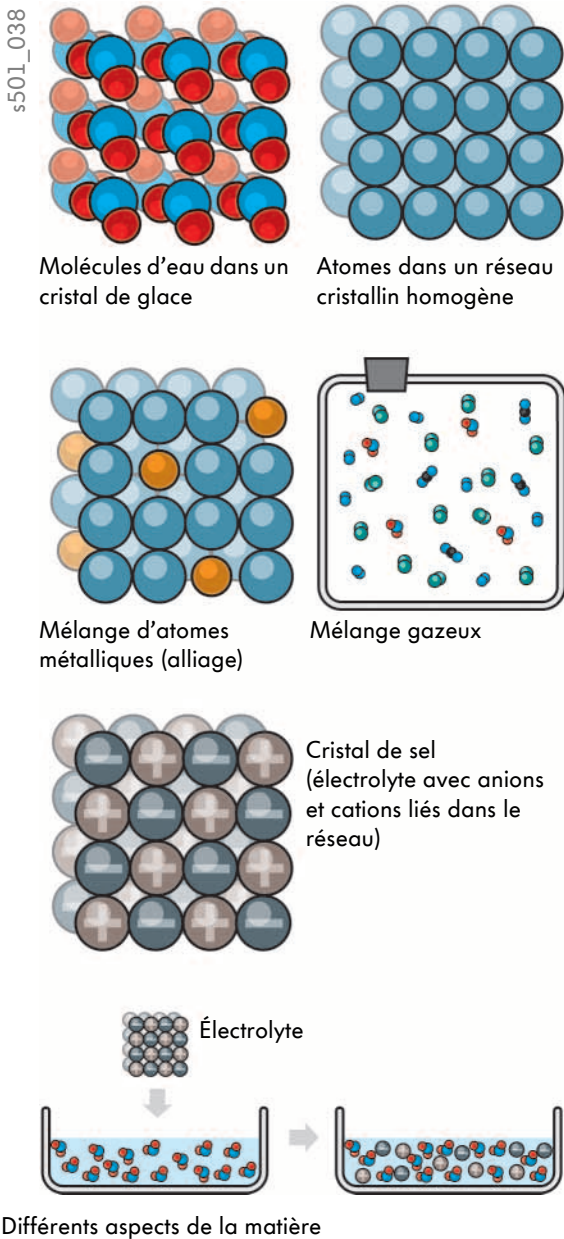


Un apport d'énergie élève l'électron à un niveau d'énergie supérieur (saut quantique).



Pour revenir au niveau d'énergie inférieur, l'électron dégage de l'énergie.

## Composés, liaisons, éléments et ions



Les atomes ou les éléments peuvent se lier de différentes manières pour former la matière. Un fragment de matière peut être homogène, constitué d'une seule sorte d'atomes qui forment, dans des conditions standard (20 °C, 1 bar), un solide présentant une structure en réseau (par ex. le carbone), un gaz (par ex. l'hélium) ou un liquide (par ex. le brome). Les atomes peuvent également se lier chimiquement à d'autres atomes. Ces liaisons sont appelées molécules. Il existe des molécules composées d'un petit nombre d'atomes, comme l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) et d'autres formées d'un très grand nombre d'atomes (par ex. les molécules d'albumine). Un fragment de matière peut également être hétérogène, c'est-à-dire être un composé d'éléments, un composé d'éléments et de molécules ou encore un composé de différentes molécules. Lorsqu'on veut décrire la matière ou son comportement, il est important de ne pas confondre ces trois notions d'élément, de liaison et de composé.

Si un atome ou une molécule perd un ou plusieurs électrons ou qu'il/elle en reçoit en provenance d'autres atomes, les particules chargées électriquement qui résultent du processus sont appelées ions. S'il y a gain d'électrons, l'ion formé est négatif, c'est un anion. Si l'atome ou la molécule perd des électrons, c'est une particule positive qui apparaît, il s'agit d'un cation. De nombreux sels métalliques (électrolyte) peuvent par ex. être scindés en anions et en cations lorsqu'on les dissout dans l'eau.



# Qu'est-ce que le magnétisme ?

Le magnétisme est un sous-domaine de l'électrodynamique. Il décrit un effet dynamique qui peut être observé sur les charges électriques en mouvement, les conducteurs traversés par un courant et entre des objets magnétisés ou magnétisants. Le magnétisme repose sur les propriétés magnétiques des particules élémentaires et/ou sur le mouvement des charges électriques. La présence de magnétisme se manifeste par un champ de forces, le champ magnétique. Selon leur direction et leur force, les champs magnétiques peuvent mutuellement se renforcer, s'affaiblir ou s'annuler.

## Ferromagnétisme & Co

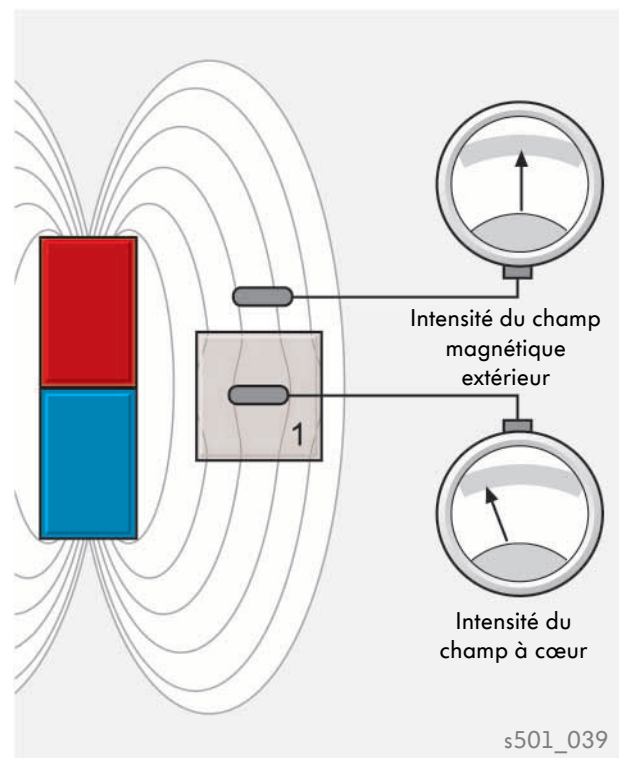
Les solides peuvent présenter cinq types de magnétisme :

- Le diamagnétisme
- Le paramagnétisme
- Le ferromagnétisme
- Le ferrimagnétisme
- L'antiferromagnétisme

Nous nous contenterons ici d'aborder brièvement les trois premiers types uniquement, car les interactions magnétiques jouent un rôle dans certains procédés de mesure utilisés dans les capteurs (par ex. capteur inductif, transmetteur de Hall).

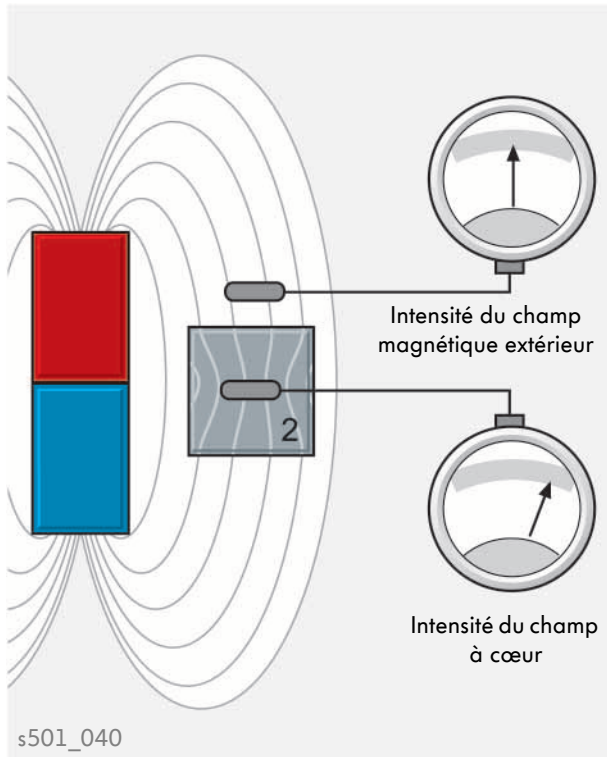
### Diamagnétisme

Un matériau (élément, molécule) est qualifié de diamagnétique lorsqu'il affaiblit en son cœur un champ magnétique qui le traverse. Ce phénomène est basé sur le fait que le champ magnétique induit un courant dans les couches électroniques des atomes du matériau considéré, lequel génère à son tour un champ magnétique. En vertu de la loi de Lenz, ce champ magnétique «interieur» est orienté dans le sens inverse du champ magnétique extérieur. C'est pourquoi l'intensité du champ magnétique extérieur diminue à l'intérieur du matériau. Le diamagnétisme concerne tous les matériaux (atomes, molécules, ions) qui ne possèdent pas d'électrons isolés (non appariés) dans leurs couches atomiques.

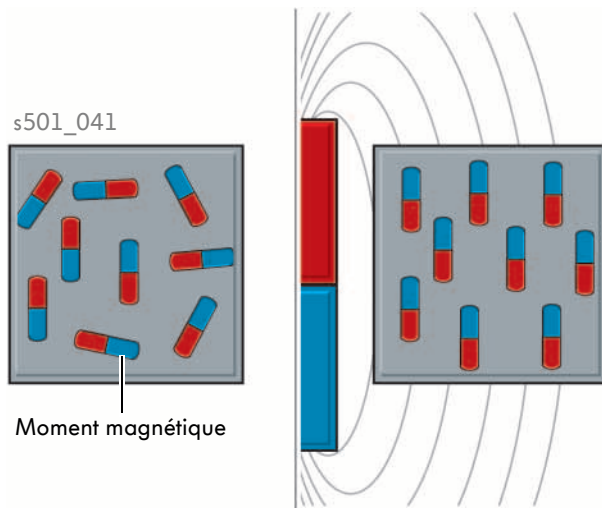


Les matériaux diamagnétiques (1) affaiblissent un champ magnétique extérieur en leur cœur.

## Paramagnétisme



Les matériaux paramagnétiques (2) renforcent un champ magnétique extérieur en leur cœur.



Sous l'effet du champ magnétique extérieur, les moments magnétiques des éléments du matériau paramagnétique s'orientent.

Un matériau est qualifié de paramagnétique lorsqu'il renforce en son cœur un champ magnétique qui le traverse.

Ce phénomène tient au fait que les éléments du matériau (atomes, molécules, etc.) possèdent eux-mêmes un moment magnétique. Le matériau ne présente cependant pas de champ magnétique, parce qu'en l'absence de champ magnétique extérieur, les moments magnétiques des éléments sont désordonnés et se neutralisent statistiquement les uns les autres.

Ce n'est que lorsqu'ils sont exposés à un champ magnétique extérieur que les éléments s'orientent parallèlement à ce dernier. Le champ magnétique extérieur est alors renforcé au cœur du matériau. Lorsqu'on éloigne le champ magnétique extérieur, le champ magnétique intérieur du matériau paramagnétique disparaît de nouveau, car l'orientation des éléments disparaît.

Cette orientation provisoire des éléments du matériau est thermodépendante : le paramagnétisme diminue lorsque la température augmente. Il en est ainsi parce que les éléments (atomes, molécules, ions) se mettent à vibrer de plus en plus fort à leur emplacement de la structure lorsque la température augmente, et qu'il devient alors plus difficile de les orienter en un champ magnétique.



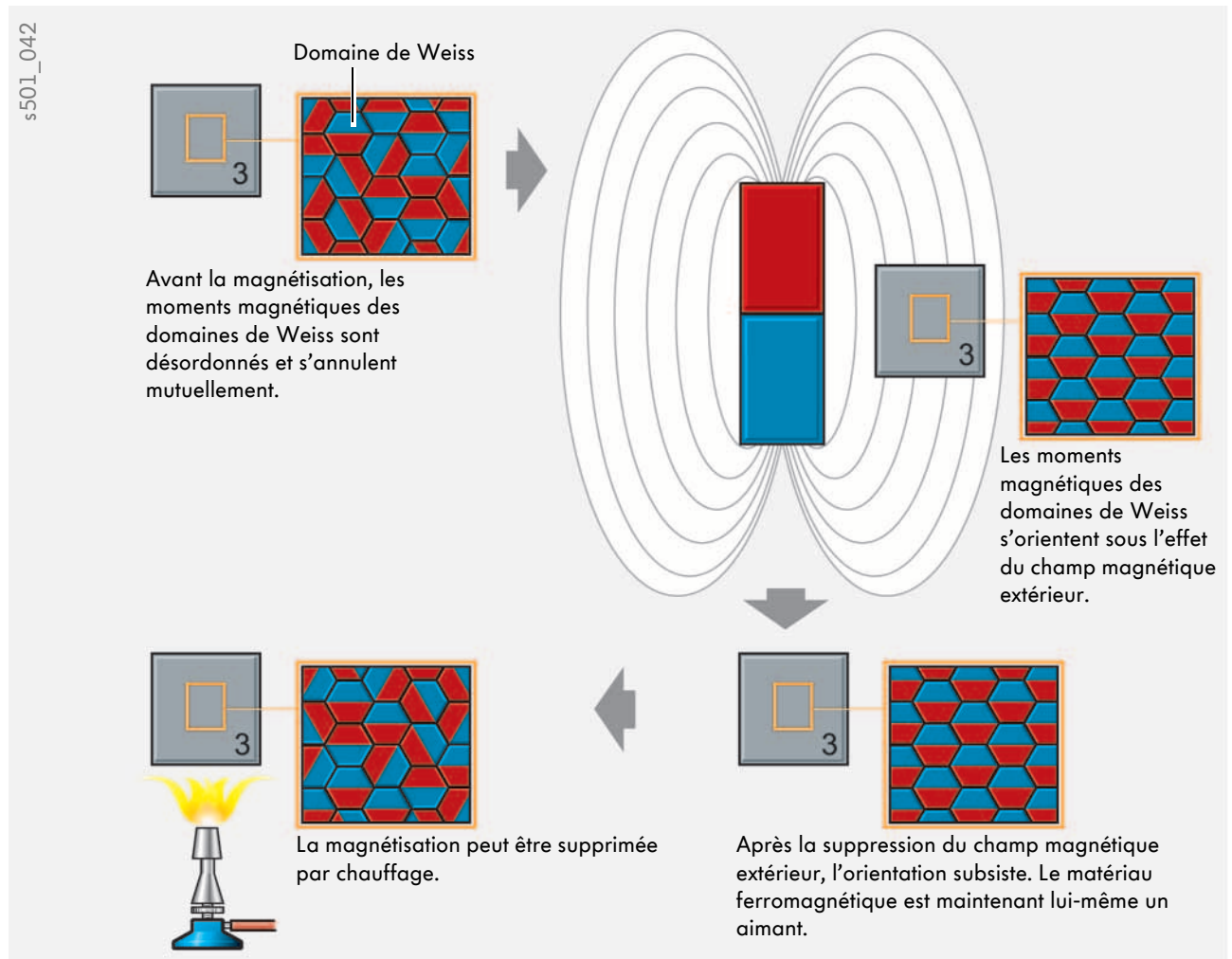
# Qu'est-ce que le magnétisme ?

## Ferromagnétisme

Un matériau est dit ferromagnétique lorsque l'orientation magnétique de ses éléments persiste après la suppression du champ magnétique extérieur. Le matériau est donc magnétisé et présente les propriétés d'un aimant permanent. Comme dans le cas du paramagnétisme, les particules du matériau prises individuellement possèdent leur propre moment magnétique.

Dans le cas des matériaux ferromagnétiques toutefois, ces particules et leurs moments magnétiques se sont déjà orientés de manière parallèle dans de petits secteurs du matériau, appelés domaines de Weiss.

Cependant la somme des moments magnétiques de ces domaines s'annule, de sorte que le matériau paraît de prime abord non magnétique. Mais si l'on applique un champ magnétique extérieur, les domaines de Weiss s'orientent parallèlement à ce champ, si bien que le matériau possède à présent son propre champ magnétique. Ce dernier se maintient même après la suppression du champ magnétique extérieur. Il est possible de démagnétiser de nouveau le matériau en le chauffant ou en le soumettant à des chocs mécaniques.



Les matériaux ferromagnétiques (3) conservent leurs propriétés magnétiques même après la suppression du champ magnétique extérieur.



## Champs, intensités de champ

Un champ magnétique peut être généré par des matériaux magnétiques ou magnétisés, par des courants électriques circulant dans des conducteurs électriques ou par la variation temporelle d'un champ électrique. Il est possible de le visualiser en disposant de la limaille de fer sur une surface. Les points d'entrée et de sortie d'un champ magnétique sur un matériau magnétisé sont appelés pôles et sont situés à l'opposé l'un de l'autre. Ils sont qualifiés de pôle nord et de pôle sud en fonction de leur orientation par rapport au champ magnétique terrestre. Cela signifie que des pôles de même orientation (nord avec nord, sud avec sud) se repoussent et que des pôles d'orientation opposée (nord avec sud) s'attirent.

## Notion de champ et induction

Le champ magnétique d'un corps est la zone où la force magnétique de ce corps agit. Plus on s'éloigne de l'objet qui produit le champ magnétique, plus son intensité, ou son effet, diminue.

La force d'un champ magnétique est définie par deux grandeurs physiques : l'intensité de champ magnétique et l'induction magnétique.

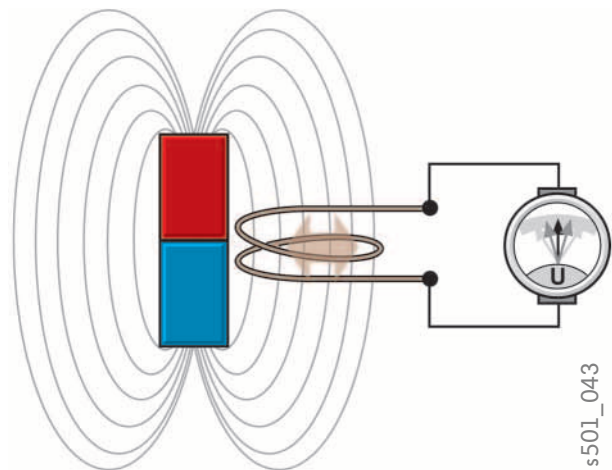
Comme des charges en mouvement génèrent un champ magnétique propre, une interaction a lieu avec un champ magnétique extérieur et expose la charge en mouvement à une force.

Cette force, qu'un champ magnétique exerce sur les charges électriques en mouvement, est appelée force de Lorentz.

Elle agit perpendiculairement à l'orientation des lignes du champ magnétique et perpendiculairement au sens du mouvement des charges électriques.

Lorsque la force de Lorentz agit sur des charges électriques circulant dans un conducteur électrique, un courant est généré dans le conducteur. Ce processus, appelé induction, est à la base du fonctionnement des générateurs.

L'induction est également utilisée dans différentes technologies de capteurs.



Lorsqu'on déplace un conducteur électrique dans un champ magnétique, la force de Lorentz, qui agit sur les électrons libres du conducteur, induit un courant et génère ainsi une tension électrique mesurable.





# Que sont les ondes électromagnétiques ?

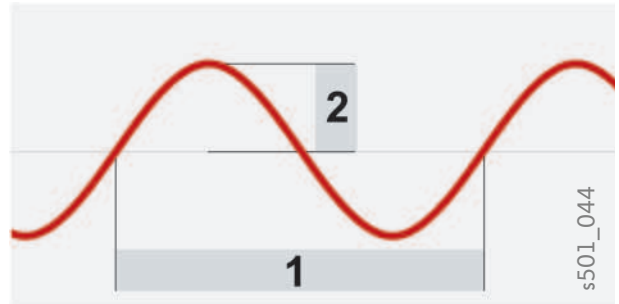
Il n'a pas fallu attendre l'invention du téléphone mobile pour que nous soyons entourés d'ondes et de champs électromagnétiques.

Leur nombre a seulement augmenté depuis cette date. Cette discipline se fonde largement sur les recherches effectuées par James Clerk Maxwell au XIX<sup>e</sup> siècle et a été combinée à la mécanique quantique au XX<sup>e</sup> siècle pour former l'électrodynamique quantique.

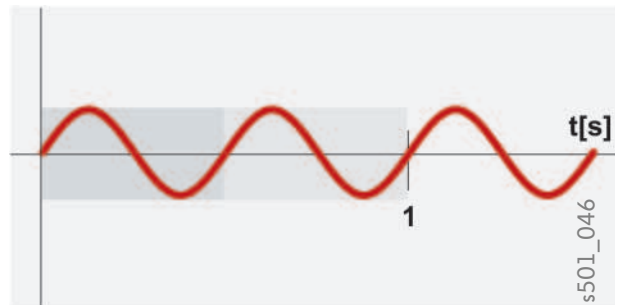
L'électrodynamique étudie et décrit l'interaction entre champs électriques et magnétiques. Les champs électriques (par ex. dans les condensateurs ou les bobines) tout comme les champs magnétiques (par ex. autour des conducteurs et des bobines traversés par un courant) sont stationnaires, ce qui signifie qu'ils ne peuvent être constatés et n'agissent que sur l'objet qui les produit, et non indépendamment de ce dernier. Lorsque des champs électriques et magnétiques interagissent, il apparaît un phénomène qui se répand dans l'espace à une vitesse d'env. 300 000 km par seconde (vitesse de la lumière) indépendamment de l'objet qui le produit.

Il s'agit du rayonnement électromagnétique, qui se propage sous forme d'ondes.

Une onde se définit par sa hauteur (amplitude) et par la succession de ses crêtes et de ses creux (longueur d'onde). Si l'on observe la succession récurrente des longueurs d'onde pendant un intervalle de temps, par ex. une seconde, on obtient la fréquence d'une onde.



Les ondes sont définies par leur longueur (1) et leur amplitude (2).



La fréquence est le nombre de longueurs d'onde parcourues par seconde. Elle est exprimée en hertz. L'onde représentée a une fréquence de 2 hertz, c'est-à-dire de 2 longueurs d'onde (oscillations) parcourues en une seconde.

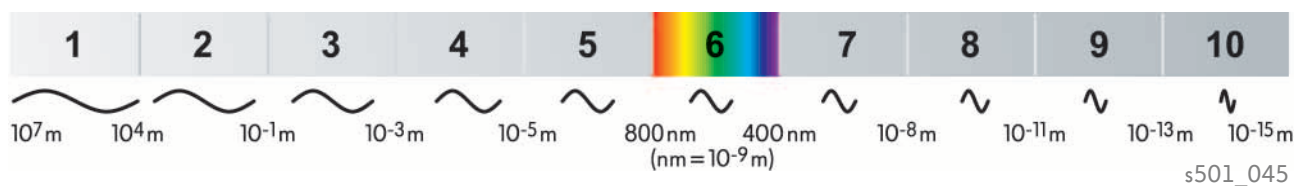
Les ondes électromagnétiques sont présentes sur une plage de longueurs d'onde gigantesque. Celle-ci va d'ondes très courtes, d'une longueur de  $10^{-15}$  m (0,000 000 000 000 001 m) jusqu'à des ondes d'une longueur de  $10^7$  m (10 000 000 m). Plus la longueur d'onde est courte, et par conséquent plus la fréquence est élevée, plus l'énergie de l'onde est importante. Plus la longueur d'onde est longue, et donc plus la fréquence est basse, plus l'énergie de l'onde est faible. Tout ce qui possède une longueur d'onde de moins de 200 nm (0,000 000 2 m) est nocif pour les organismes biologiques.

## Différents et pourtant si semblables : chaleur, lumière et radar

Nous percevons la chaleur et la lumière directement à l'aide de nos sens. Un radar est un système électronique de positionnement qui permet de déterminer la vitesse et la distance d'un objet par rapport à la source du radar, et que nous pouvons visualiser au moyen d'équipements techniques correspondants (installation radar avec moniteur). Bien que la chaleur et la lumière correspondent pour nous à des perceptions complètement différentes, elles constituent deux vecteurs d'ondes électromagnétiques. Le radar utilise lui-aussi les ondes électromagnétiques, mais dans une plage de longueurs d'onde si longues qu'il est hors de portée de nos sens « d'origine ».

La chaleur et le rayonnement infrarouge se trouvent dans une plage de longueurs d'onde allant de 2,5  $\mu\text{m}$  à 1 mm.

Du côté « ondes courtes » de cette plage de longueurs, on trouve la plage de la lumière visible, qui va de 380 nm à 780 nm. Le radar se situe au-delà de la zone « ondes longues » du rayonnement infrarouge, dans une plage allant de 1 mm à 10 m. Ce qui se situe en dessous d'une longueur d'onde de 380 nm n'est plus perceptible par nos sens. Il s'agit des rayonnements UV, X et gamma, qui possèdent une telle énergie qu'ils peuvent détériorer notamment les systèmes biologiques. Nous ne pouvons pas non plus percevoir directement ce qui se situe au-dessus d'une longueur d'onde de 1 mm, c'est-à-dire les bandes de fréquence des térahertz, des micro-ondes, des ondes radio et des basses fréquences.



Plages de longueurs d'ondes dans le spectre électromagnétique

(les proportions ne sont pas respectées par rapport au spectre total) :

basse fréquence (1), ondes radio (2), micro-ondes (3), térahertz (4), infrarouge (5), lumière visible (6), ultraviolet (7), rayons X (8), rayons gamma (9), rayonnement cosmique (10)

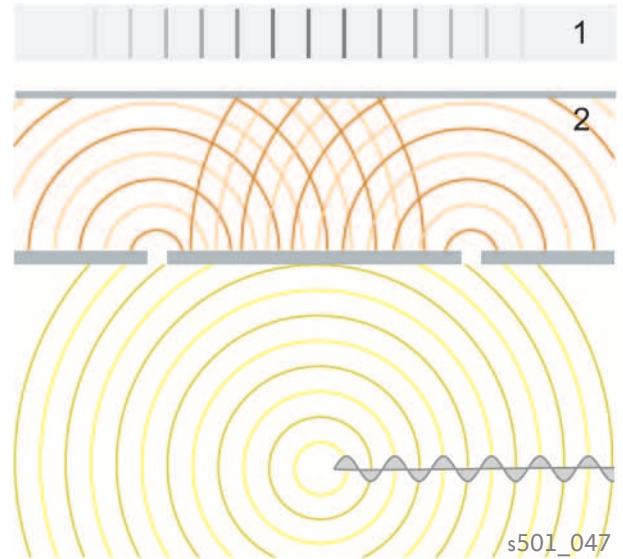
# Que sont les ondes électromagnétiques ?

## Onde, particule, ou les deux ?

Si l'on fait passer les émissions d'une source de rayonnement électromagnétique à travers deux minces ouvertures, il apparaît du côté opposé à la source un schéma d'interférence. Il s'agit d'une série de rayures, typiques de la propagation d'une onde.

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique rencontre une fente, il se forme de l'autre côté de celle-ci un nouveau front d'onde circulaire, identique à celui qui apparaît quand on jette un caillou dans un étang. Comme il s'agit dans notre expérience d'une double fente, ce sont deux fronts d'onde qui se propagent à partir des deux fentes, et qui interfèrent l'un avec l'autre. Par interférence, on entend que lorsque deux creux ou deux crêtes d'onde se rencontrent, leurs amplitudes s'ajoutent, donc se renforcent. Lorsqu'une crête d'onde rencontre un creux, les deux s'annulent mutuellement.

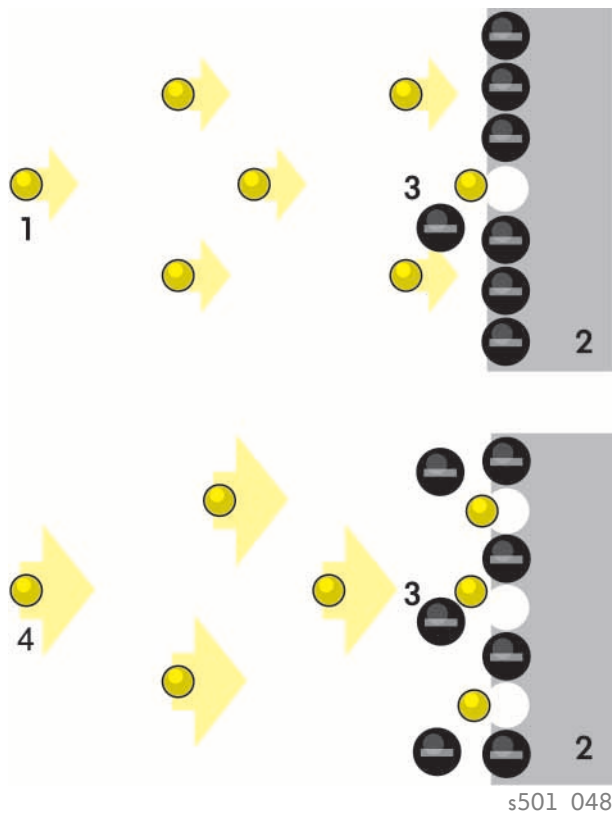
Il apparaît ainsi, de la même manière que des vagues sur un étang, un motif rayé sur une surface de projection. Dans l'expérience, il est disposé perpendiculairement au sens de propagation.



Tracé en bandes caractéristique (schéma d'interférence) (1) sur une surface de projection (2) dans l'expérience de la double fente

Suite à cette expérience, réalisée de nombreuses fois avec succès par des chercheurs, une doctrine a vu le jour selon laquelle le rayonnement électromagnétique se comporterait comme une onde. Cependant, il existe un phénomène appelé « effet photoélectrique » que l'on ne peut pas expliquer de manière satisfaisante avec le modèle représentant la lumière comme une onde. Il s'agit de l'observation selon laquelle un rayonnement électromagnétique de forte énergie (par ex. un rayonnement UV) que l'on dirige sur une surface métallique entraîne l'expulsion d'électrons hors de cette surface.

La quantité d'électrons expulsés ne dépend toutefois pas de l'intensité (amplitude) du rayonnement, comme on pourrait le supposer, mais de sa fréquence.



Dépendance de l'effet photoélectrique par rapport à la fréquence du rayonnement électromagnétique : les photons à faible énergie (1) arrachent les électrons (3) de la surface métallique (2) avec moins d'efficacité que les photons à haute énergie (4).

La solution à ce problème a été fournie par Albert Einstein sur la base de la théorie du rayonnement de Max Planck.

Einstein définit le rayonnement électromagnétique (lumière) comme une succession de paquets d'énergie (quanta de lumière ou photons). Plus la fréquence du rayonnement est élevée, plus l'énergie contenue dans les paquets est importante.

Un photon à haute énergie est plus à même d'arracher un électron de la surface métallique qu'un photon à faible énergie. C'est pourquoi c'est la fréquence, et non l'intensité du rayonnement, qui détermine le nombre d'électrons libérés. Grâce à Einstein, l'effet photoélectrique se trouve donc expliqué (ici sous une forme extrêmement simplifiée) et le rayonnement électromagnétique gagne une seconde caractéristique : il peut, comme Newton en avait eu l'intuition avant Einstein, être conçu comme un flux de particules.



Mais laquelle de ces deux approches est correcte ?

La lumière est-elle composée d'ondes ou de particules ?

Réponse : des deux à la fois !

C'est le dispositif expérimental qui détermine le type de caractéristique manifesté par le rayonnement électromagnétique. La lumière ne « décide » de la caractéristique qu'elle présente qu'au moment où on l'examine avec des moyens appropriés. Cette idée heurte notre bon sens ; une chose ne peut pas se manifester simultanément sous deux formes différentes. On ne peut pas donner à un morceau de bois en même temps une forme sphérique et une forme carrée. En revanche, dans le monde quantique des particules élémentaires, cette sorte d'« incertitude » ne constitue pas une contradiction.

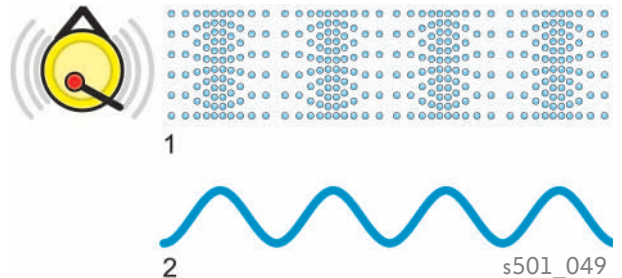
# Qu'est-ce que le son ?

Le son présente, comme la lumière, les caractéristiques d'une onde.

Une onde sonore est une succession d'oscillations de pression et de densité dans un milieu ambiant à travers lequel se propage le son. Cette caractéristique devient particulièrement évidente lorsqu'on perçoit des sons très graves, que l'on n'entend pas seulement, mais que l'on sent également avec son corps.

Pour qu'un milieu puisse conduire le son, il doit, comme un gaz ou un liquide, présenter des propriétés d'élasticité suffisantes. Dans le cas contraire, il est plus judicieux d'utiliser le milieu considéré comme isolant acoustique.

Contrairement à la vitesse de la lumière, la vitesse de propagation du son n'est pas constante. Elle dépend notamment des propriétés du milieu élastique dans lequel se déplace le son.



Les variations de pression et de densité entre les molécules du milieu élastique (1) peuvent être représentées sous forme d'ondes sonores (2).

Plus le milieu élastique est dense et froid, mieux il transmet le son. Moins le milieu est dense et plus il est chaud, moins il transmet le son. C'est pourquoi les ondes sonores se propagent plus loin et plus vite dans la mer que dans l'air. Cela signifie que plus le mouvement propre des éléments qui constituent le milieu (par ex. les molécules de gaz) est important, plus les ondes sonores sont « freinées ».

Dans le vide, c'est-à-dire en l'absence de milieu, le son ne peut pas se propager.

Cela signifie que malgré la violence de l'explosion d'une supernova, un observateur situé dans le vide intersidéral peut uniquement la voir. Dans un tel milieu, il est impossible de l'entendre avec ses oreilles.

Dans l'atmosphère terrestre, à une pression de 1 bar et une température de 20° C, le son se propage à env. 343 mètres par seconde.

La plage de fréquence des sons audibles par l'homme se situe, selon l'âge de l'individu et l'état de son appareil auditif, entre env. 16 Hz et 20 kHz.

Les infrasons sont des ondes sonores dont la fréquence se situe en dessous de notre champ auditif, les ultrasons sont des ondes sonores d'une fréquence supérieure à celui-ci.

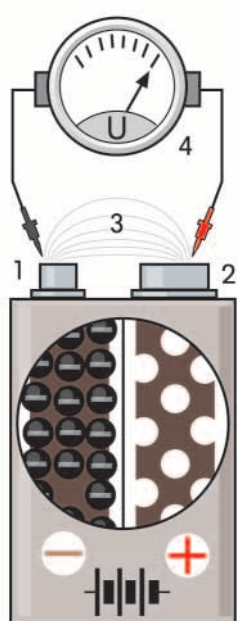
# Que signifient U, I, R et C ?

Certaines notions provenant du domaine de l'électricité apparaissent de manière récurrente dans la description de la technologie des capteurs et des procédés de mesure sur lesquelles elles sont basées. Les pages suivantes proposent une brève description de ces notions.

## Le triptyque tension, courant et résistance

La tension (U), l'intensité (I) et la résistance électrique (R) sont reliées entre elles par la loi d'Ohm. Selon cette dernière, la résistance électrique est proportionnelle à la tension et inversement proportionnelle à l'intensité du courant.

Mais que cachent ces notions ?



En raison de la différence de potentiel entre l'anode (1) et la cathode (2), il existe entre les deux bornes un champ électrique (3). La tension U (4) de la pile peut être mesurée entre les deux bornes à l'aide d'un voltmètre.

s501\_050

### Tension électrique

Elle est également appelée différence de potentiel. Une source de tension, par ex. une pile, possède un pôle négatif (anode) et un pôle positif (cathode).

Si la pile n'est pas usagée, il existe entre les deux pôles une différence de potentiel. Cela signifie qu'il existe à l'anode un potentiel électrique négatif. Pour utiliser une image, un « excédent d'électrons attend » (de pouvoir fournir un travail dans un consommateur électrique). À la cathode, il y a au contraire un potentiel électrique positif ; ici, on « attend des électrons ». Plus la différence entre les deux potentiels électriques est importante, plus la tension fournie par la pile est élevée. En raison de cette différence de potentiel, il existe un champ électrique entre les deux bornes de la pile.



La valeur de la tension indique le travail ou l'énergie nécessaire au déplacement d'un porteur de charge (par ex. un électron dans un conducteur électrique) à l'intérieur de ce champ. On peut donc également concevoir la tension comme la valeur énergétique ou la capacité de travail qu'une charge électrique est susceptible d'appliquer à un consommateur.

L'unité de mesure de la tension est le volt. Le symbole normalisé de la tension est « U ».

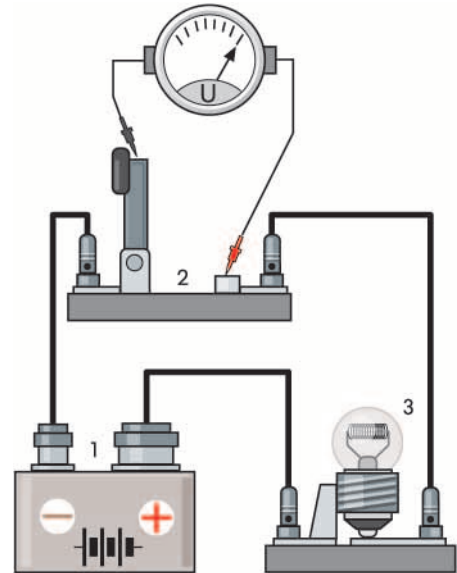
# Que signifient U, I, R et C ?

## Courant et intensité

Lorsque les deux bornes d'une pile sont reliées par un conducteur électrique (court-circuitées), les porteurs de charge électrique (électrons) commencent, sous l'effet du champ électrique généré par la tension, à circuler de l'anode vers la cathode via le conducteur. En général, on ne court-circuite toutefois pas une pile, mais on utilise l'énergie électrique accumulée dans la pile pour fournir dans un consommateur électrique, comme un moteur électrique ou une ampoule, un travail équivalent à la tension.

Examinons de plus près l'exemple que constitue une ampoule :

à l'aide de câbles électriques, on raccorde à la pile un interrupteur et une ampoule. Tant que l'interrupteur n'est pas fermé, aucun courant ne circule, mais on peut mesurer la tension du circuit électrique, par ex. aux bornes de l'interrupteur.



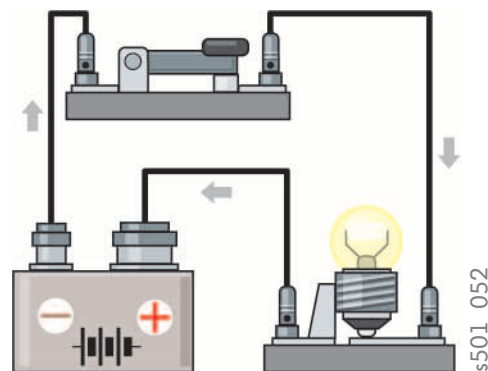
Montage expérimental avec une pile (1), un interrupteur (2) et une ampoule (3) en guise de consommateur électrique, l'interrupteur étant ouvert



Lorsqu'on ferme l'interrupteur, les électrons se mettent à circuler sous l'effet de la tension et du champ électrique qui en découle, partant de la pile et traversant l'interrupteur et l'ampoule pour revenir à la pile. Pour le dire de manière imagée, la pile fonctionne comme une « pompe à électrons ». L'intensité du courant, c'est-à-dire la quantité d'électrons (porteurs de charge) qui partent vers le consommateur par unité de temps, est mesurée en ampères.

Plus le nombre d'électrons par unité de temps est important, plus la transmission d'énergie électrique est forte et plus le consommateur peut fournir de travail.

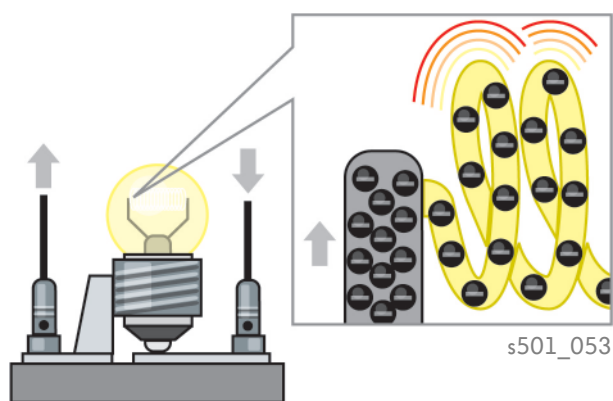
Le symbole normalisé de l'intensité est la lettre « I ».



Lorsque l'interrupteur est fermé, un courant électrique circule dans le circuit électrique.



Le niveau de l'intensité dépend de la tension et des propriétés des câbles électriques utilisés. Plus la section du câble et la conductivité du matériau sont élevées, plus l'intensité peut être forte pour une tension donnée.



L'ampoule se met à briller en raison de la résistance électrique du filament de l'ampoule.

Qu'est-ce que cela implique pour notre ampoule ?

Une fois l'interrupteur fermé, les électrons se mettent en mouvement vers l'ampoule et le courant électrique circule. À l'intérieur de l'ampoule se trouve un fil très fin (le filament), qui présente une résistance électrique bien plus importante que les autres câbles reliant les composants entre eux.

Par résistance plus élevée, on entend, de manière très simplifiée, qu'il passe moins d'électrons simultanément à travers le conducteur. Cela conduit le filament à s'échauffer lorsque des électrons sont « pompés » au travers.

Le filament restitue cette énergie thermique sous forme de rayonnement électromagnétique (lumière et chaleur). L'ampoule brille.

D'une manière simplifiée, les électrons fournissent un travail dans le filament de l'ampoule afin de le franchir, et perdent de l'énergie durant le processus avant de retourner à la cathode de la pile.



# Que signifient U, I, R et C ?

## Résistance électrique

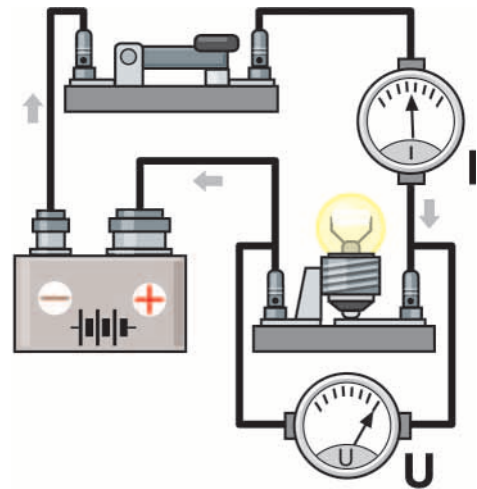
La résistance électrique établit une relation mathématique entre la tension et l'intensité. Georg Simon Ohm a découvert cette relation et l'a exprimée dans une formule mathématique. Il a donné son nom à l'unité de mesure de la résistance électrique. D'un point de vue physique, la résistance est un indicateur de la tension nécessaire pour atteindre une intensité donnée dans un conducteur électrique.

La résistance électrique résulte des propriétés électriques du conducteur dans lequel circulent les charges (par ex. électrons). La valeur de la résistance dépend de la température, de la section du câble (c'est-à-dire du diamètre du conducteur) et d'une propriété de la matière appelée « résistance spécifique ». Cette dernière peut être comprise comme l'inverse de la conductivité, une autre propriété de la matière.

La conductivité désigne la propension d'un matériau à « autoriser » le transport d'une charge par l'intermédiaire de ses électrons.

Si, comme dans le cas d'un métal par exemple, les électrons du matériau sont déjà spontanément délocalisés, et ne sont donc pas liés aux différents noyaux d'atome mais « répartis » sur l'ensemble de la structure du métal, un courant électrique peut facilement traverser le matériau parce qu'il existe de nombreux électrons « libres » accélérés dans le conducteur par le champ électrique généré par la tension.

Il possède une conductivité élevée, et par conséquent une faible résistance spécifique. Comme elle varie en fonction de la chaleur, la résistance peut être utilisée comme grandeur de mesure pour connaître la température.



$$R [\Omega] = \frac{\text{Voltmeter } [V]}{\text{Ammeter } [A]}$$

s501\_054

À partir de la mesure de l'intensité (I) et de la tension (U), il est possible de calculer la résistance (R) d'un composant électrique. Inversement, si par ex. la résistance et la tension sont connues, on peut en déduire l'intensité du courant.

Cependant, si les électrons sont liés de manière fixe aux atomes sous forme de liaisons chimiques (covalentes), ils ne cèdent que très peu volontiers leurs électrons pour le transport d'une charge électrique.

Ces matériaux possèdent donc une faible conductivité, ou encore une résistance spécifique élevée. Ils sont appelés matériaux faiblement conducteurs / non conducteurs, ou matériaux isolants lorsque leur conductivité est très, très faible par rapport à leur environnement.

Cela ne signifie pas que ces matériaux ne peuvent absolument pas transporter de charges, il faut seulement les gorger d'une quantité d'énergie assez importante, par ex. sous forme de chaleur, pour les amener à un état électriquement conducteur (plasma ionisé).

Pour de nombreux matériaux, cette valeur énergétique (température d'ionisation, point de changement brusque de la conductivité) est atteinte assez facilement, comme dans le cas de l'ionisation – dans une lampe – d'un gaz non conducteur en conditions normales.

La conductivité, et par conséquent la résistance électrique d'un matériau, dépendent de la température.

Dans le cas des métaux, cette propriété est facile à visualiser :

lorsque la température augmente, les atomes se mettent à osciller de plus en plus fortement à leur emplacement dans la structure de la matière, et les électrons entrent eux aussi toujours plus fréquemment en collision.

Ces mouvements, en s'additionnant, freinent de plus en plus fortement le transport de la charge à travers le conducteur.

La résistance augmente.

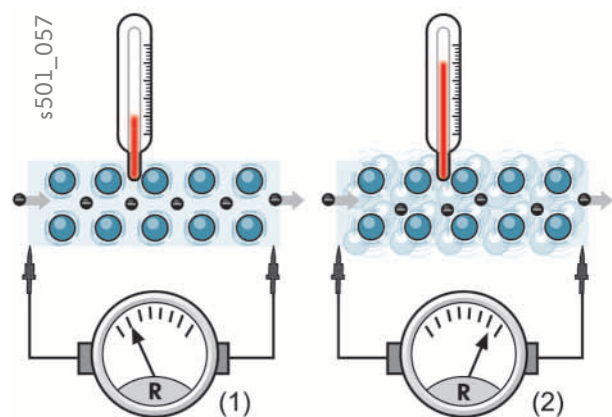
Lorsque la température baisse, la résistance des métaux et des semi-conducteurs diminue, car le mouvement des atomes dans la structure diminue également.

À partir d'un certain seuil, le transport de la charge peut être réalisé pratiquement sans perte d'énergie électrique.

On parle alors de supraconduction. Cependant cela ne se produit en général qu'à des températures très basses, proches du zéro absolu (0 K ; - 273,15 °C).

Le comportement des métalloïdes en matière de résistance électrique ou de conductivité est légèrement différent voire totalement inverse à celui des métaux.

La thermodépendance de la résistance est par exemple utilisée dans les capteurs de température. En vertu de la loi d'Ohm, elle peut toutefois également servir à déterminer la tension ou l'intensité.



Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes:  
Eine geringe Bewegung der Metallatome auf ihren Gitterplätzen führt zu einem geringen elektrischen Widerstand (1). Steigt mit der Temperatur die Bewegung der Metallatome, steigt auch der Widerstand (2)



# Que signifient U, I, R et C ?

## Capacité et diélectrique

La capacité désigne la faculté d'un condensateur à stocker une charge électrique.

L'unité de mesure de la capacité est le farad, son symbole normalisé est la lettre « C ». La capacité est proportionnelle à la charge électrique et inversement proportionnelle à la tension appliquée au condensateur.

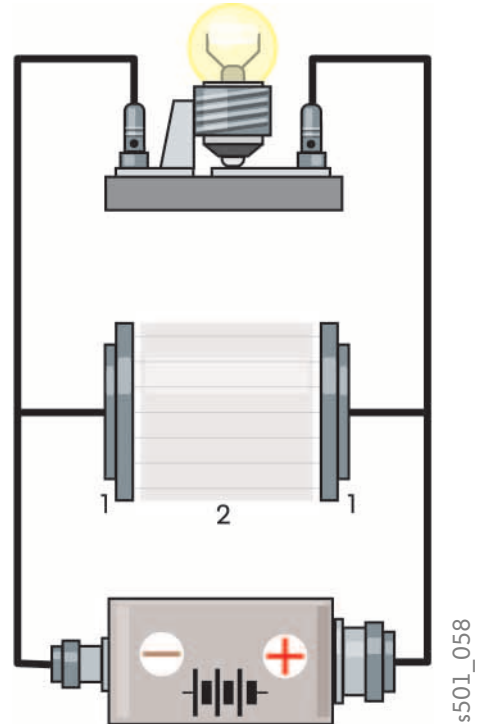
La forme la plus simple d'un tel accumulateur de charge est le condensateur électrique à lames.

Un condensateur à lames est conçu de sorte que deux lames conductrices soient positionnées en face l'une de l'autre. L'accumulation de charge a lieu même sans l'ajout d'une substance supplémentaire placée entre les lames et appelée diélectrique. On peut toutefois augmenter ou modifier la capacité de stockage du condensateur en choisissant une substance appropriée pour le diélectrique.

Le diélectrique d'un condensateur se compose d'une substance métalloïde faiblement conductrice ou non conductrice. En dehors des propriétés du diélectrique, la capacité électrique du condensateur dépend également de la surface des lames du condensateur et de l'écartement des lames.

Lorsque les deux lames sont raccordées à un circuit électrique, le condensateur se charge. Cela signifie qu'un champ électrique se crée entre les lames du condensateur. Il ne circule pas de courant électrique dans le condensateur au sens où il serait traversé par des porteurs de charge (électrons). En aval du condensateur, toutefois, le courant reprend sa circulation, par ex. pour alimenter une ampoule. Ce phénomène repose sur une propriété physique désignée par le terme de flux électrique. Le flux électrique est généré par la modification du champ électrique lors de la charge du condensateur.

Si l'on coupe l'alimentation en tension, l'énergie accumulée dans le condensateur « chargé » permet au courant de continuer de s'écouler, et à l'ampoule de briller jusqu'à ce que le condensateur soit complètement déchargé. Dans la technologie des capteurs, on mesure par exemple des pressions ou l'humidité de l'air à l'aide de capteurs capacitifs spéciaux.



Représentation simplifiée du montage d'un condensateur à lames : lorsque le circuit électrique est fermé, l'énergie électrique est stockée dans un champ électrique entre les deux lames du condensateur (1). Un diélectrique (2) placé entre les lames du condensateur permet d'influencer la capacité d'accumulation du condensateur.



## **André-Marie Ampère**

10.01.1775 - 10.06.1836

Physicien et mathématicien français

A donné son nom à l'unité de mesure du courant électrique : l'ampère.

## **Anaximène de Milet**

Env. 585 av. J.-C. – env. 526 av. J.-C.

Philosophe naturaliste grec

## **Niels Bohr**

07.10.1885 - 18.11.1962

Physicien danois

1913 Mise au point du modèle atomique de Bohr sur la base des travaux de Planck et d'Einstein

1922 Prix Nobel de physique

1922 Explication de la structure de la classification périodique des éléments à l'aide du modèle atomique amélioré de Sommerfeld

## **Charles Auguste Coulomb**

14.06.1736 - 23.08.1806

Physicien français

Fondateur de l'électrostatique et de la magnétostatique

## **Démocrite**

Env. 460 av. J.-C. – env. 370 av. J.-C.

Philosophe naturaliste grec

## **Empédocle**

V<sup>e</sup> siècle av. J.-C.

Philosophe naturaliste, médecin, homme politique, prêtre et poète grec

## **Albert Einstein**

04.03.1879 - 18.04.1955

Physicien allemand, puis citoyen américain

1905 Publication de la théorie de la relativité restreinte

1916 Publication de la théorie de la relativité générale

1921 Prix Nobel de physique

1932 Émigration aux États-Unis (Princeton)

Sa quête d'une théorie des champs unifiés est demeurée vaine jusqu'à sa mort.

## **Michael Faraday**

22.09.1791 - 25.08.1867

Naturaliste, chimiste et physicien expérimental anglais

Faraday a découvert l'induction électromagnétique et a été le premier à la décrire.

A donné son nom à l'unité de mesure de la capacité des condensateurs : le farad



**Richard Phillip Feynman**

11.05.1918 - 15.02.1988

Physicien américain

1965 Prix Nobel de physique pour ses travaux sur l'électrodynamique quantique

**Werner Heisenberg**

05.12.1901 - 01.02.1976

Physicien allemand

1927 Énoncé du principe d'incertitude de Heisenberg

1930 Publication de l'ouvrage «Les principes physiques de la théorie des quanta»

1932 Prix Nobel de physique

**Hermann Ludwig Helmholtz**

31.08.1821 - 08.09.1894

Physiologiste et physicien allemand

1847 Publication du livre «Sur la conservation de la force»

1867 Publication du «Manuel d'optique physiologique»

**Héraclite d'Éphèse**

Env. 520 av. J.-C. – env. 460 av. J.-C.

Philosophe naturaliste grec originaire d'Éphèse

**Heinrich Rudolf Hertz**

22.02.1857 - 01.01.1894

Physicien allemand

1886 Découverte de l'effet photoélectrique

Les recherches de Hertz ont fourni la base théorique pour le développement de la transmission d'informations sans fil (télégraphie, radio). A donné son nom à l'unité de mesure de la fréquence : le hertz

**Heinrich Lenz**

12.02.1804 - 10.02.1865

Physicien germano-balte

Les recherches de Lenz ont porté sur des phénomènes électriques tels que l'induction et la résistance.

**Leucippe**

V<sup>e</sup> siècle av. J.-C.

Philosophe naturaliste grec

**James Clerk Maxwell**

13.06.1831 - 05.11.1879

Physicien écossais

1860 Formulation de la théorie cinétique des gaz

1864 Publication des équations de Maxwell sur l'électricité et le magnétisme

Prévision de la valeur de la vitesse de la lumière





### **Isaac Newton**

20.03.1643 - 31.03.1727

Mathématicien, naturaliste et alchimiste anglais, directeur de la Royal Mint (maître des monnaies) à Londres

1687 Publication de l'ouvrage «Philosophia Naturalis Principia Mathematica»,  
dans lequel Newton définit ses lois de la mécanique

1704 Publication de «Opticks», où sont regroupées ses recherches dans le domaine de l'optique

A donné son nom à l'unité de mesure de la force : le newton

Newton a eu l'intuition, avant Einstein, que la lumière était constituée de particules.

### **Georg Simon Ohm**

16.03.1789 - 06.07. 1854

Physicien allemand

1826 Définition de la loi d'Ohm

A donné son nom à l'unité de mesure de la résistance électrique : l'ohm

### **Max Planck**

23.04.1858 - 04.10.1947

Physicien allemand

1899 Introduction de la constante de Planck

1918 Prix Nobel de physique

1929 Publication de «La vision du monde de la nouvelle physique»

Directeur puis président d'honneur de l'Institut Kaiser-Wilhelm pour la promotion des sciences  
(rebaptisé ultérieurement Institut Max-Planck), cofondateur de la mécanique quantique

### **Ernest Rutherford**

30.08.1871 - 19.10.1937

Physicien néo-zélandais

1902 Hypothèse de la désintégration radioactive des éléments

1908 Prix Nobel de chimie

1911 Dérivation du modèle atomique de Rutherford

1918 Découverte du proton

### **Leonard Susskind**

1940 - Physicien américain

Cofondateur de la théorie des cordes

### **Thalès de Milet**

Env. 624 av. J.-C. – 546 av. J.-C.

Mathématicien, philosophe naturaliste, astronome, homme politique et ingénieur grec originaire de Milet

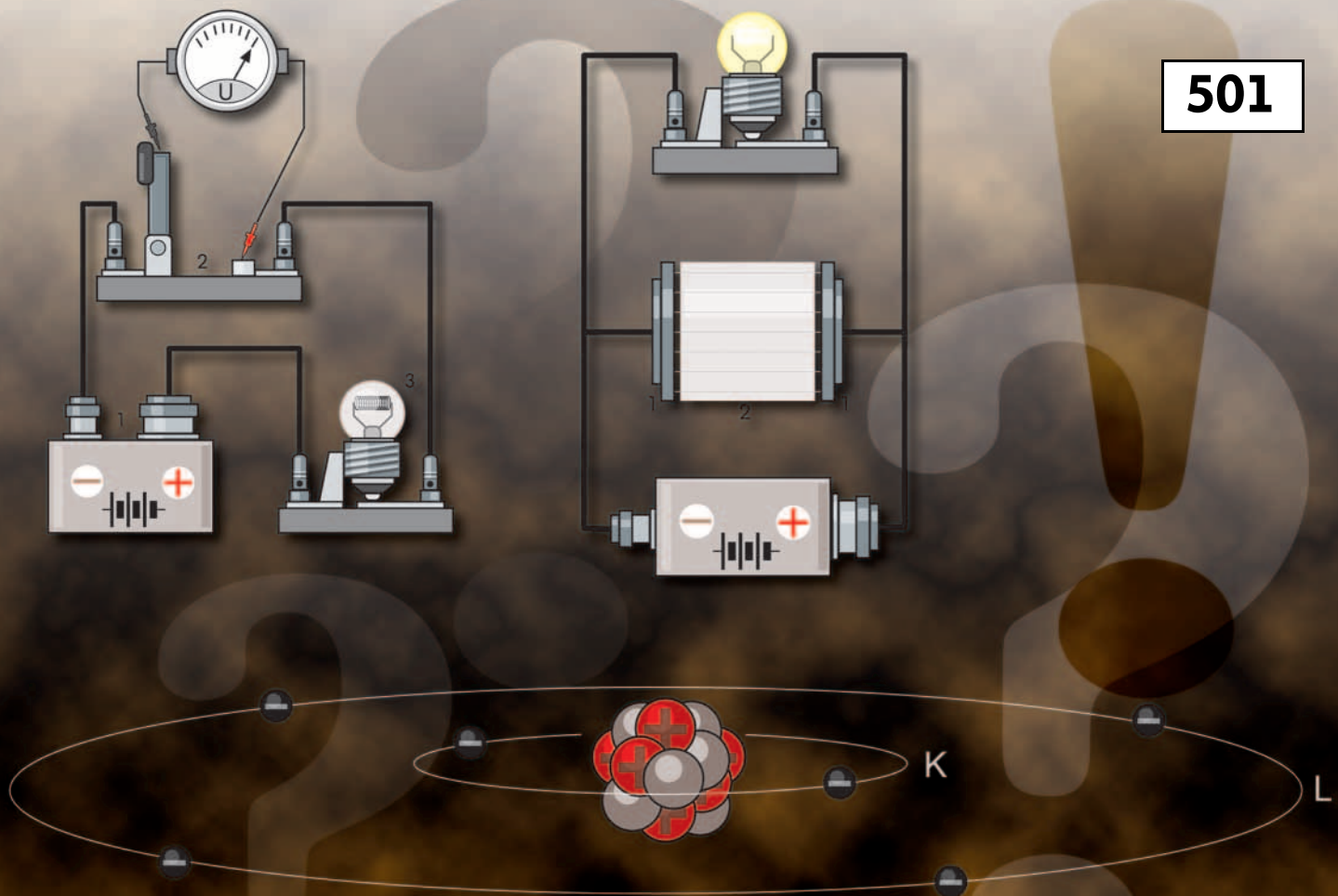
### **Comte Alesandro Giuseppe Antonio Volta**

18.02.1745 - 03.03.1827

Physicien italien

A donné son nom à l'unité de mesure de la tension électrique : le volt





© VOLKSWAGEN AG, Wolfsburg  
Tous droits et modifications techniques réservés.  
000.2812.58.40 Dernière mise à jour :12/2010

Volkswagen AG  
After Sales Qualifizierung  
Service Training VSQ-1  
Brieffach 1995  
D-38436 Wolfsburg

♻️ Ce papier a été fabriqué à partir de pâte blanche sans chlore.