

L'énergie des véhicules électriques

CORD-HENRICH DUSTMANN

Grâce à de nouveaux types d'accumulateurs, les performances des véhicules électriques urbains vont s'améliorer.

Lorsque Carl Friedrich Benz et Gottlieb Wilhelm Daimler présentèrent, indépendamment, leurs fiacres motorisés, en 1885 et en 1886, des voitures électriques circulaient déjà dans Paris depuis quelques années. Puis, en 1899, la *Jamais Contente* du Belge Camille Jenatzy, avec son moteur électrique, fut le premier véhicule autopropulsé à dépasser la vitesse de 100 kilomètres à l'heure.

Au tournant du siècle, aux États-Unis, le nombre des voitures à essence était inférieur (22 pour cent du parc automobile) au nombre des voitures électriques et à vapeur (respectivement, 38 et 40 pour cent). On appréciait l'électricité pour sa facilité d'utilisation, sa fiabilité et sa propreté ; l'autonomie et la puissance n'étaient pas encore des critères importants.

La découverte du démarreur électrique pour le moteur à explosion a donné à celui-ci un avantage décisif. En 1995, les véhicules électriques représentaient à peine 0,01 pour cent des 47,5 millions d'automobiles du parc allemand, dont la moitié étaient des voitures particulières.

Des bricoleurs, des bureaux d'études et des constructeurs automobiles présentent régulièrement des concepts nouveaux et intéressants de véhicules totalement ou partiellement électriques. En France, par exemple, à la fin de 1996, plus de 3 000 véhicules électriques sont immatriculés, dont plus de 1 000 l'ont été dans l'année. Certains sont fabriqués industriellement et vendus : le marché progresse. Toutefois, les moteurs à combustion interne ont encore de beaux jours devant eux : à moyen terme, les véhicules qu'ils équiperont

resteront moins coûteux et leur utilisation restera plus souple.

Le principal handicap des véhicules électrique est la difficulté du stockage de l'énergie électrique. Tandis que 40 litres d'essence fournissent une énergie de 1 400 mégajoules, dont 8 à 15 pour cent (selon le mode de conduite) sont convertis par le moteur en énergie de propulsion, une batterie de volume équivalent ne contient qu'une énergie d'environ 100 mégajoules, que le moteur utilise à 80 ou 90 pour cent.

En outre, les véhicules électriques ne s'imposeront que si leur conduite est aussi confortable que celle des véhicules à moteur thermique : la batterie doit fournir de l'énergie à la demande, uniquement en fonction des besoins du véhicule et quelles que soient les conditions extérieures. Que la voiture soit en stationnement ou qu'elle roule sur une route accidentée, par temps chaud, froid, sec ou humide, elle doit répondre aux commandes du conducteur.

Les constructeurs visent, pour un avenir proche, la commercialisation de batteries qui permettront à des véhicules d'atteindre une vitesse de 120 kilomètres à l'heure, de rouler une centaine de kilomètres sans recharge, et qui résisteront à un millier de cycles de charge et de décharge (soit environ 150 000 kilomètres parcourus en dix ans). Ces caractéristiques constituent un compromis entre l'énergie et la puissance de la batterie : avec certaines batteries, des véhicules prototypes ont une autonomie de 200 kilomètres et, sur les véhicules électriques actuels, la vitesse de pointe n'est pas limitée par la batterie mais par le moteur.

Une bonne batterie

Comment les fabricants de batteries atteindront-ils ces objectifs ? Un accumulateur est caractérisé par sa densité d'énergie et par sa densité de puissance. La densité d'énergie, tout d'abord, est la quantité d'énergie stockée dans un kilogramme (ou dans un litre) d'accumulateur ; elle détermine l'autonomie du véhicule. On essaie aujourd'hui d'atteindre 360 kilojoules par kilogramme. D'autre part, la densité de puissance est la puissance électrique maximale par kilogramme, qui détermine la vitesse maximale et l'accélération ; la densité de puissance d'un accumulateur satisfaisant serait de 150 watts par kilogramme (200 watts par litre).

Les réactions électrochimiques de charge et de décharge doivent être totalement réversibles. Le système de freinage actif relié aux roues, qui transforme le moteur en générateur, recharge en effet la batterie à chaque décélération, quel que soit son état de charge. Le système doit aussi fonctionner sans entretien et ne présenter aucun danger supplémentaire par rapport à un véhicule classique, même en cas d'accident grave. Enfin le prix de la batterie ne doit pas trop grever celui de la voiture électrique. Le coût associé dépend, entre autres paramètres, des matériaux utilisés et de la durée de vie de la batterie. Pour qu'une batterie soit commercialisable, il faut que les électrodes et les électrolytes utilisés soient chimiquement stables pendant toute sa durée de vie.

Des laboratoires universitaires et industriels testent aujourd'hui plusieurs systèmes électrochimiques. Peu

répondront à l'ensemble des critères que nous venons d'énumérer, de sorte que les constructeurs devront trouver des compromis. La batterie au plomb à électrolyte gélifié, par exemple, est la plus utilisée aujourd'hui, parce qu'elle est la moins coûteuse et que c'est celle dont on connaît le mieux le fonctionnement. Sa den-

sité d'énergie est toutefois trop faible. La batterie Zebra (l'acronyme anglais d'un projet de recherche sur les batteries sans émissions), dont la Société AEG Anglo Batteries prépare la production en série, est beaucoup plus performante : elle stocke l'énergie sous forme de sodium et de chlorure de nickel.

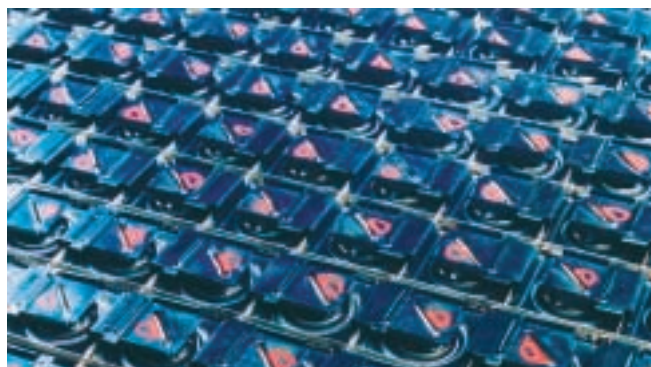
La batterie sodium/chlorure de nickel

On fabrique un élément de la batterie Zebra en plaçant, dans un tube d'alumine, du chlorure de sodium et du nickel, en poudre, une électrode de nickel et du chlorure d'aluminium et de sodium. Le tube est ensuite



Romualda Holak, Avere France

1. LES VÉHICULES ÉLECTRIQUES, équipés de batteries, sont rechargés par un branchement électrique standard. Les utilisateurs profitent des arrêts, à domicile ou dans des parcs de stationnement, pour «faire le plein».



2. UNE BATTERIE ZEBRA, composée de 200 à 500 cellules, délivre une tension d'environ 300 volts (à gauche). Le boîtier métallique à double paroi isole thermiquement la batterie, qui fonctionne à 300 °C,



AEG Anglo Batteries/Spektrum der Wissenschaft

de l'environnement extérieur. Ce boîtier protège aussi contre d'éventuelles fuites lors de chocs violents, tel celui qu'a subi une batterie lors d'un essai de chute (à droite).

encapsulé dans un autre tube métallique. L'alumine utilisée ne conduit pas les électrons, mais elle est perméable aux ions sodium lorsque la température atteint environ 300 °C. Lorsque l'on charge l'élément à cette température de fonctionnement, les ions sodium traversent le tube d'alumine et sont réduits en sodium métallique, tandis que le nickel métallique est oxydé en ions nickel qui se combinent avec les ions chlorure. Le contact entre le chlorure de nickel ainsi formé et l'alumine est assuré par le chlorure d'aluminium et de sodium, liquide et conducteur des ions sodium à cette température. Le sodium métallique, très inflammable à l'air, ne se forme que pendant la charge, alors que l'ensemble est scellé.

Tout le courant qui circule dans l'accumulateur est utilisé dans la réaction que nous venons de décrire (ou pour la réaction inverse lors de la décharge): il n'y a pas d'autre réaction

chimique possible. Il suffit de suivre en permanence le courant avec un dispositif électronique d'intégration pour connaître à tout instant le niveau de charge de la batterie. En outre, à température ambiante, l'alumine n'est pas perméable aux ions sodium : l'accumulateur peut rester chargé très longtemps sans être utilisé.

Une telle cellule a une tension à vide de 2,58 volts et une capacité de 32 ampères-heures. En associant une centaine de cellules en série, on obtient une tension d'environ 300 volts et, en associant en parallèle des groupes de cellules en série, on atteint des capacités de 64 ou 96 ampères-heures. La résistance électrique des cellules est telle que, si elles n'ont pas toutes le même niveau de charge, la répartition du courant s'équilibre.

Les cellules élémentaires sont assemblées debout, dans un boîtier isolé de l'extérieur par une double paroi sous vide. La température interne est

ajustée par un chauffage électrique et un réfrigérant qui assurent un bon fonctionnement de la batterie entre les températures extérieures de -40 °C à 75 °C. Les réactions de charge et de décharge de la batterie sont indépendantes de son niveau de charge : la même densité de puissance est fournie jusqu'à 80 pour cent d'utilisation de la charge.

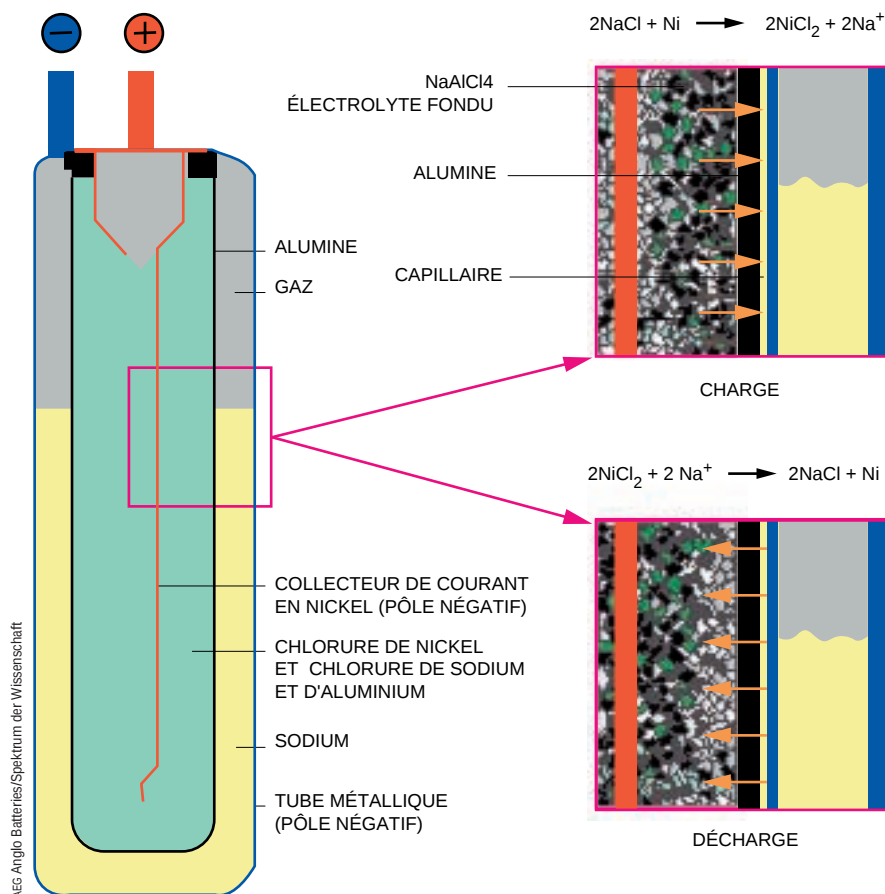
Cette batterie est fiable et sûre. Si une cellule tombe en panne, la capacité est réduite de moins de un pour cent. Si le tube en alumine se casse, le sodium et le chlorure d'aluminium et de nickel réagissent, ce qui conduit à la formation d'aluminium métallique : les deux électrodes sont alors court-circuitées et le courant circule librement à travers la cellule, ce qui préserve le fonctionnement global de la batterie. La puissance ne diminue pas notablement tant que moins de cinq pour cent des cellules sont hors service.

Nous avons analysé le fonctionnement des batteries Zebra dans des conditions défavorables, et nous avons testé 210 spécimens dans des conditions normales d'utilisation, sur des bancs d'essai, ainsi que sur 75 véhicules dont les conducteurs ont parcouru au total 1,6 million de kilomètres. Quelques batteries ont fonctionné pendant quatre ans, certaines plus de 100 000 kilomètres, sans qu'une seule cellule ait été changée. Une durée de fonctionnement de dix ans paraît donc réaliste.

Une batterie sûre

Nous avons éliminé les deux risques que les accumulateurs font courir en cas d'accident : l'électrocution et la fuite de produits toxiques. Tout d'abord, un interrupteur général isole la batterie du reste du véhicule, en cas de choc violent. En cas de fausse manœuvre ou de panne des systèmes électroniques de contrôle ou de charge, le court-circuit déjà évoqué protège la batterie contre une charge ou une décharge excessives. Si des composants sont détériorés, le système s'éteint automatiquement.

En outre, lors d'une déformation violente d'une cellule, le tube d'alumine est le premier élément endommagé : le sodium liquide est immédiatement oxydé par le chlorure de sodium et d'aluminium, ce qui forme de l'aluminium et du chlorure de sodium ; toute fuite est ainsi bloquée.



3. UNE CELLULE DE LA BATTERIE ZEBRA est composée d'un tube en alumine encapsulé dans un tube métallique. Lors de la charge (à droite, en haut), le chlorure de sodium et le nickel contenus dans le tube d'alumine sont transformés en sodium et en chlorure de nickel. Les ions sodium traversent l'alumine et sont réduits en sodium métallique dans le tube métallique. La réaction inverse se produit lors de la décharge (à droite, en bas). Du chlorure de sodium et d'aluminium, liquide à la température de fonctionnement, assure la conduction dans le tube d'alumine.

Cette réaction chimique ne dégage que les deux tiers de l'énergie libérée par la réaction normale de décharge, qui ne peut plus se produire : l'aluminium et le chlorure de sodium formés recouvrent l'électrode négative d'une couche isolante.

Le boîtier métallique et les joints résistent à des températures atteignant 800 °C, et les températures d'ébullition élevées des matériaux contenus dans la cellule évitent une trop grande augmentation de la pression interne : il n'y a pas de dégagement gazeux. De même, dans le cas extrême où toute l'énergie serait dissipée sous forme de chaleur lors d'un court-circuit, la température interne resterait inférieure à 1 000 °C, et les parois externes atteindraient à peine 100 °C.

Au cours d'un essai, nous avons laissé tomber verticalement, sur une glissière fixe de sécurité, une batterie entièrement chargée et à la température interne de 300 °C. Le choc s'est produit à la vitesse de 50 kilomètres à l'heure : toutes les cellules ont été détruites, et presque toute l'énergie contenue dans la batterie s'est transformée en chaleur. Toutefois, il ne s'en est échappé qu'un peu de fumée blanche : de l'hydroxyde d'aluminium, inoffensif, et des traces d'acide chlorhydrique.

Naturellement, la batterie *Zebra* est en concurrence avec d'autres accumulateurs et, notamment, avec les batteries qui sont composées de nickel et d'hydrures métalliques. Leur densité d'énergie est inférieure de 30 à 40 pour cent, mais leur puissance massique est supérieure. Elles conviendraient particulièrement aux véhicules hybrides qui rechargent eux-mêmes leurs batteries pendant qu'ils roulent avec un moteur thermique.

Dans moins de dix ans, les batteries à base de lithium et d'hydrures métalliques, dont les caractéristiques électriques sont comparables à celles des batteries *Zebra*, seront utilisables dans les véhicules. La concurrence conduira les ingénieurs à améliorer leurs systèmes et à en mettre au point de nouveaux, et permettra ainsi le développement des voitures électriques.

Cord-Henrich DUSTMANN est directeur commercial de la Société *AEG Anglo Batteries*, à Ulm.

Voir sans regarder

PAUL KWIAT • HARALD WEINFURTER • ANTON ZEILINGER

L'optique quantique détecte des objets sans interagir avec eux, même par de la lumière.

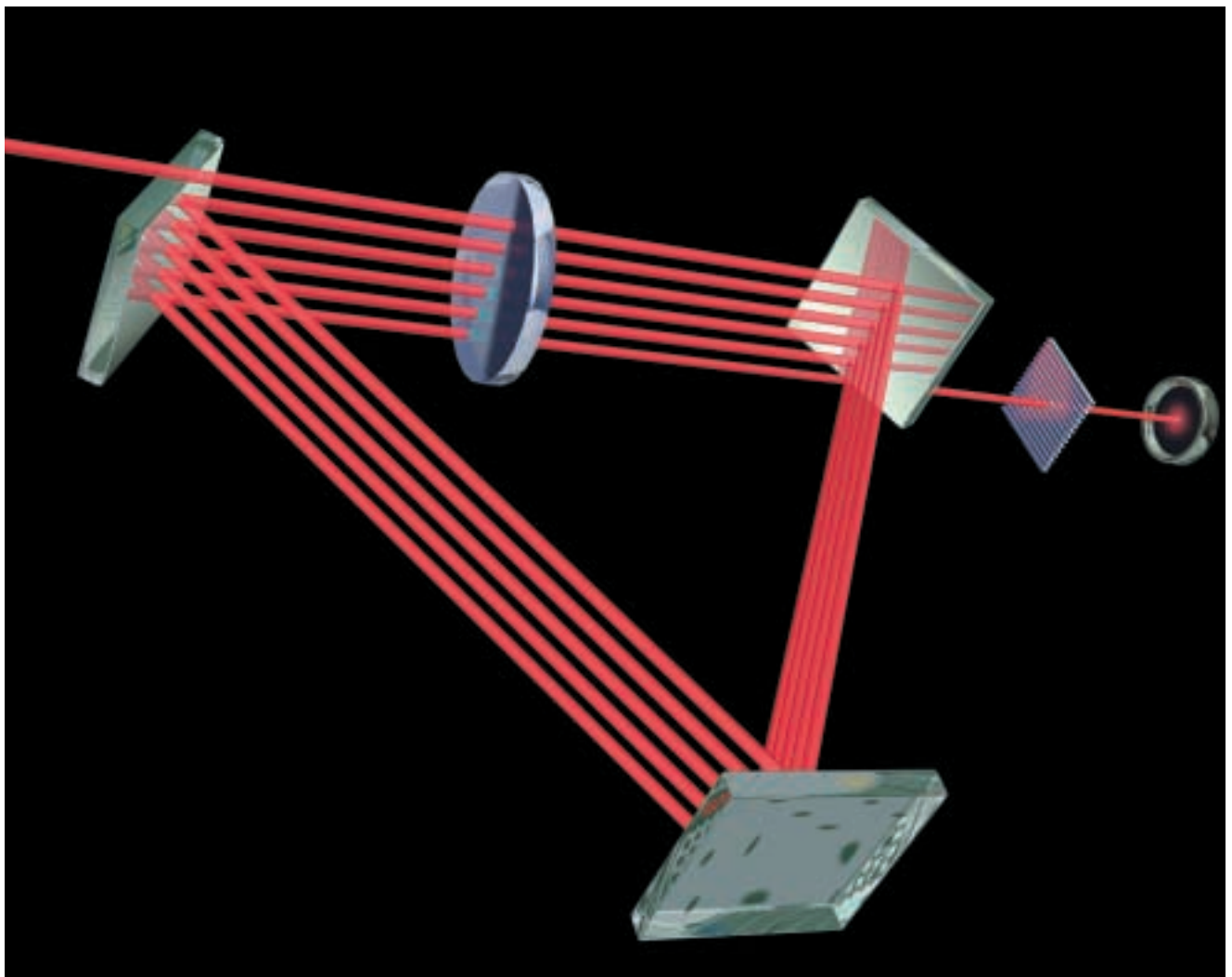
Les mythes grecs rapportent comment Persée affronta Méduse, créature aux cheveux de serpents qu'aucun mortel ne pouvait contempler en face sans être instantanément pétrifié. Certaines versions du mythe racontent que Persée échappa à la pétrification grâce à un bouclier que lui avait donné Hermès : il prit soin

de ne regarder la Gorgone qu'indirectement, avant de lui couper la tête.

En 1962, Dennis Gabor, l'inventeur de l'holographie, affirma que Persée n'aurait pas échappé à Méduse si les lois de la physique avaient été respectées : aucun objet, énonça-t-il, ne pouvait être observé avec moins d'un photon, ou grain de lumière.

Toutefois, ces dernières années, les spécialistes de l'optique quantique ont appris que cette affirmation n'était ni évidente ni, même, exacte : ils savent maintenant déterminer la présence d'un objet même quand aucun photon ne l'a percuté.

Une telle mesure sans interaction est paradoxale : sans interaction, com-



Michael Goodman

1. L'EFFET ZÉNON QUANTIQUE, version du paradoxe de l'impossibilité du mouvement forgé par le philosophe grec Zénon, est utilisé dans des dispositifs qui font des mesures sans interagir avec les

systèmes sur lesquels porte la mesure. Pour observer cet effet, on utilise un faisceau laser qui suit un trajet en escalier menant à un détecteur de photons.

ment obtenir une mesure? Cette question est légitime en mécanique classique, quand on décrit le mouvement des ballons de football, des planètes ou, plus généralement, des objets assez gros ; mais il en va autrement en mécanique quantique : au royaume des électrons, des photons et des autres particules subatomiques, des mesures sans interaction sont possibles quand on utilise des effets inédits et des systèmes expérimentaux bien conçus. Armé de physique quantique, Persée aurait pu trouver un moyen de «voir» Méduse sans aucune lumière provenant de la Gorgone ; il aurait pu voir sans regarder.

Des détecteurs quantiques qui mesureraient ainsi sans interaction auraient de nombreuses utilisations dans la vie quotidienne, mais ce sont surtout les conséquences philosophiques de leur fonctionnement qui sont intéressantes. Elles s'évaluent mieux grâce à des expériences de pensée, c'est-à-dire des analyses qui envisagent les résultats d'expériences qu'on ne cherche pas à réaliser en pratique.

Imaginons une variation du jeu de bonneteau, avec deux coquilles de noix et un cailloux caché sous l'une d'elles. Le caillou est spécial : il est réduit en poussière par la lumière. Le jeu consiste à chercher l'emplacement du caillou sans soulever les coquilles, et en lui évitant toute perturbation ; si le caillou est réduit en poussière, le joueur perd la partie.

Il semble impossible de gagner à tout coup, mais on gagne un coup sur deux si l'on soulève la coquille supposée ne pas contenir le caillou : si rien n'apparaît, alors le caillou se trouve sous l'autre coquille ; si un peu de poussière est présente, c'est que le caillou s'y trouvait.

Poursuivons notre modification du jeu en le simplifiant, de sorte qu'un joueur limité aux lois de la physique classique ne puisse plus gagner : nous ne conservons qu'une seule coquille, et une chance sur deux que le caillou soit dessous. Le but du jeu est de dire si le caillou est présent, toujours sans l'exposer à la lumière.

Supposons qu'il y a un caillou sous la coquille. Si le joueur ne regarde pas sous la coquille, il n'obtient pas d'information. S'il regarde, alors il sait que le caillou était là, mais, comme il l'a exposé à la lumière, il ne retrouve qu'un tas de poussière. Pourrait-on diminuer l'éclairement, de sorte que la lumière

qui atteint le caillou soit minimale? Pour voir quelque chose, il faut au minimum un photon.

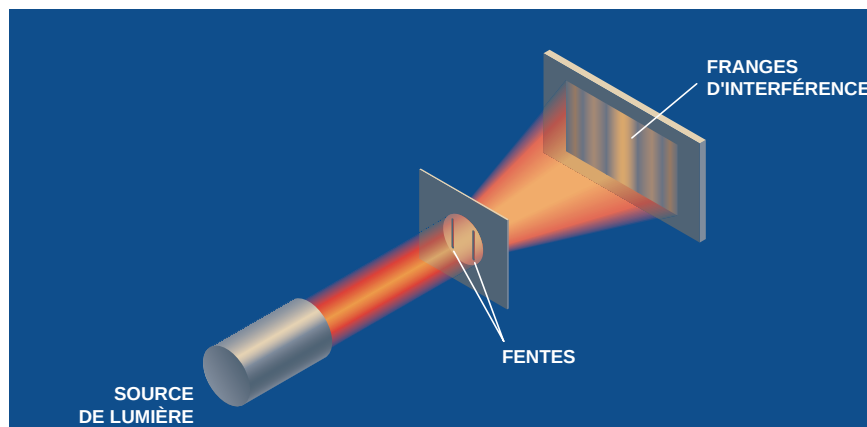
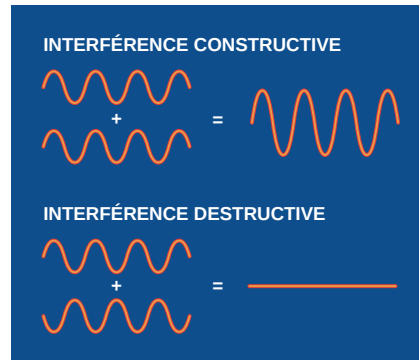
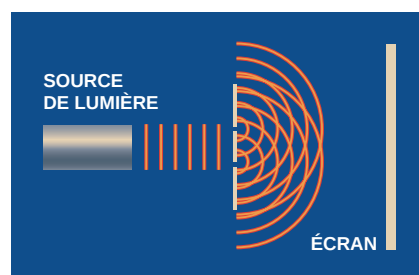
Elitzur, Vaidman et la bombe

Avec un caillou, le jeu n'a pas de conséquences dramatiques, mais, à l'Université de Tel Aviv, C. Elitzur et Lev Vaidman ont proposé un problème équivalent, où le caillou serait remplacé par une bombe qui exploserait en recevant le moindre photon, quelle que soit son énergie. Comment déterminer alors si la bombe se trouve sous une coquille?

C. Elitzur et L. Vaidman ont trouvé une solution qui ne donne un bon résultat qu'une fois sur deux, mais qui a montré qu'il existe un espoir de gagner un jour. Nous avons mentionné que la lumière est constituée de photons, mais, dans certaines circonstances, elle présente des propriétés purement ondulatoires et, notamment, peut former des interférences. Ces dernières se forment quand deux ondes se rencontrent dans une même partie de l'espace. Par exemple, dans l'expérience des fentes d'Young, la lumière traverse simultanément deux fentes parallèles, avant d'atteindre un écran situé derrière les fentes. Sur l'écran, les interférences se présentent sous la forme de raies alternativement sombres et claires (voir la figure 2). Les raies claires correspondent à des zones où les creux et les crêtes de la lumière provenant d'une fente se superposent respectivement aux crêtes et aux creux de la lumière provenant de l'autre fente. Les raies sombres correspondent à

des interférences destructives, où les crêtes de l'une des ondes se superposent aux creux de l'autre, et *vice versa*. Autrement dit, les raies claires correspondent à des zones de l'écran que les photons ont de fortes probabilités de frapper, et les bandes sombres de faibles probabilités.

La mécanique quantique montre que des interférences apparaissent lorsqu'un événement peut se produire de plus d'une façon, si ces façons sont indiscernables (cette définition de l'interférence est plus générale que celles qui sont généralement données dans les manuels). Dans l'expérience d'Young, la lumière a deux façons d'atteindre l'écran (elle peut passer par la fente supérieure ou par la fente inférieure), et on ne cherche pas à savoir



2. DES INTERFÉRENCES apparaissent lorsqu'un rayon laser traverse un écran percé de deux fentes : derrière l'écran, des ondes concentriques interfèrent (en haut). Ces ondes peuvent s'ajouter de façon constructive ou destructive (au milieu), engendrant une figure d'interférence composée d'une alternance de bandes sombres et claires (en bas).