

La supraconductibilité aux très basses températures

La supraconductibilité, qui était encore une simple curiosité de laboratoire il y a quelques années (en 1961) a maintenant de grandes perspectives d'avenir. Ne se manifestant que vers -270°C , cette étrange fantaisie de la nature est ce que l'on connaît de plus proche du mouvement perpétuel. Elle fournira l'énergie de l'avenir et elle permettra à l'homme de partir vers les étoiles. Avec le développement phénoménal des dispositifs d'information, on fera de plus en plus appel à cet étrange phénomène pour traiter, emmagasiner et mettre en œuvre la somme croissante de connaissances. On en a déjà tiré parti pour les chambres à bulles, les accélérateurs linéaires et le traitement des données. La supraconductibilité a déjà révolutionné le domaine des aimants puissants, sa science et sa technologie. Elle peut même prendre la place de nombreuses analyses chimiques classiques. L'armée s'y intéresse pour les circuits de communication et les dispositifs accumulateurs d'énergie, la marine pour la propulsion des sous-marins, la N.A.S.A. pour la protection des astronautes contre les rayons cosmiques pendant les voyages dans l'espace qui durent des mois, l'industrie pour la production économique de l'énergie électrique dont le monde moderne fait une consommation de plus en plus grande. Ses perspectives vont beaucoup plus loin, des moteurs sans frottement et des trains rapides qui ne touchent pas le sol, des microscopes encore plus perfectionnés que ceux d'aujourd'hui qui grossissent déjà

L'AIMANT SUPRACONDUCTEUR est d'abord refroidi dans l'azote liquide avant d'être plongé dans l'hélium liquide à une température qui correspond presque au zéro absolu. C'est une vue des laboratoires Westinghouse.

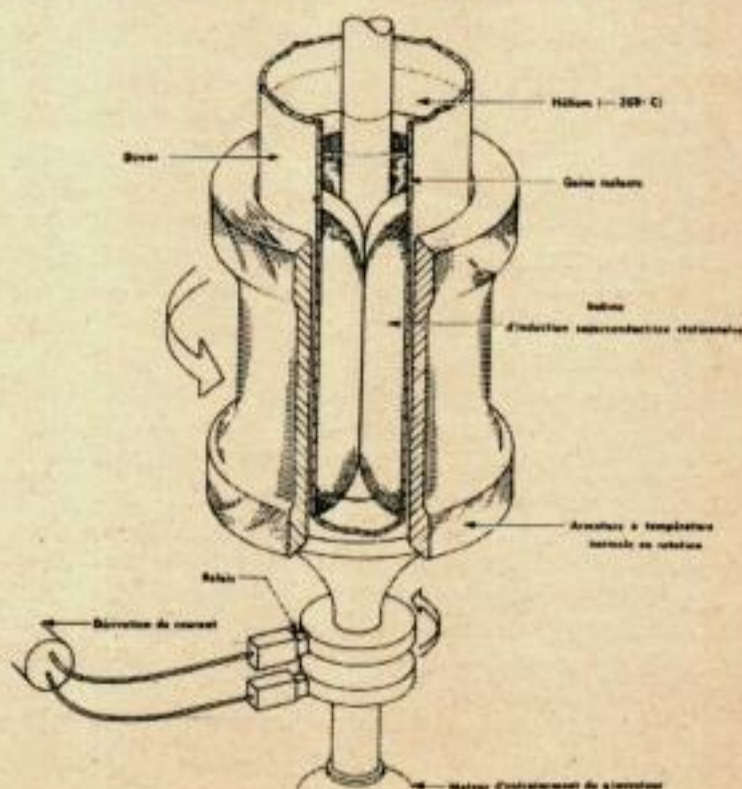


des millions de fois, des ordinateurs pas plus grands qu'une boîte à chaussures, un câble de 8 cm de diamètre qui suffit pour alimenter toute la ville de New York en énergie électrique.

Tout ça a commencé en 1908 à l'université de Leyden, en Hollande, lorsqu'un physicien nommé Heike Kamerlingh Onnes a découvert que lorsqu'il abaissait la température de l'hélium en dessous de -269°C , ce qui était alors un exploit, le gaz devenait liquide. A ces températures, les savants préfèrent utiliser l'échelle Kelvin au lieu de l'échelle Celsius. Le 0° absolu ou 0°K correspond à $-273,15^{\circ}\text{C}$. Trois ans plus tard, Onnes plaça un anneau de mercure dans l'hélium liquide, puis induisit un courant électrique dans le métal — il fut sidéré par le résultat qui bouleversa tout le monde scientifique. Car le courant induit tourna sans arrêt et sans faiblir dans l'anneau tant que sa température était maintenue assez basse avec l'hélium liquide. Il nomma cet état du métal « supraconducteur ».

Lorsque le physicien hollandais réduisit la température de l'hélium à $2,4^{\circ}\text{K}$ ou à peu près -271°C quelque chose de nouveau se produisit : le liquide devenait superfluide ! Il coulait vers le haut sur la paroi du récipient à l'intérieur et vers le bas à l'extérieur ! Il s'infiltrait à travers des trous si petits que l'hélium gazeux ne peut y passer — et l'hélium est un gaz qui peut s'échapper par des trous si petits qu'il faudrait 3 000 ans à un litre pour sortir. Dans un supraconducteur porté à la température de l'hélium liquide qui supprime l'agitation atomique, les électrons,

LE GENERATEUR SUPRACONDUCTEUR produit un courant alternatif en faisant tourner une armature dont la température est normale dans le champ magnétique d'une bobine supraconductrice dont la température est maintenue à -269°C .



donc le courant électrique, peuvent se déplacer sans rencontrer de résistance, de même, l'hélium superfluide peut passer par des trous microscopiques impénétrables pour les autres liquides.

A sa « température critique », la résistance électrique d'un supraconducteur disparaît brusquement et les électrons peuvent se déplacer dans sa masse sans rencontrer de résistance. Ce changement de l'état normal à l'état supraconducteur se produit brusquement avec un changement de température de moins de 0,001° C. On cherche toujours le mécanisme exact de ce phénomène. Lorsque le courant électrique passe dans un fil ordinaire (ou même dans un fil d'argent, le meilleur conducteur de l'électricité), il y a une dépense d'énergie pour surmonter la résistance du fil, et cette énergie se dissipe sous forme de chaleur. Si on lance un courant dans un anneau de métal à l'état normal et si on ne l'alimente pas constamment, l'énergie électrique est rapidement dissipée. Mais si ce courant est lancé dans un anneau supraconducteur, on n'a pas besoin de l'entretenir — il continue à tourner indéfiniment dans l'anneau tant que la température reste assez basse. On est arrivé ainsi à faire tourner un courant pendant des années sans l'entretenir.

Le docteur Clifford Jones, directeur du Cryophysics Laboratory de la Westinghouse Electric Corporation, un spécialiste dans ce domaine, donne quelques détails à ce sujet. Cette réduction de résistance peut être de l'ordre de 10^{16} , c'est-à-dire, un supraconducteur n'a plus qu'un dix millionnième de milliardième ($1/10\,000\,000\,000\,000\,000$), de la résistance qu'il a à l'état normal. Un groupe de physiciens de l'université de Princeton a découvert que le courant tournera dans un supraconducteur pendant plus de 300 000 ans, sans pouvoir préciser même la durée approximative. Au bout de 300 000 ans, le courant aura perdu beaucoup moins que la moitié de son énergie initiale.

La supraconductibilité existe dans plus de 1 400 composés métalliques et alliages et même dans quelques semi-conducteurs si la température, l'intensité du courant et du champ magnétique correctes sont réalisées. Parmi ces supraconducteurs, on trouve toutes sortes de substances depuis le mercure et le plomb d'abord employés jusqu'aux alliages exotiques comme le niobium et l'étain ou le zirconium. On en découvre constamment de nouveaux. Les savants de Bell Telephone Laboratories ont été également très actifs dans ce domaine et ont récemment découvert que l'état de supraconductibilité peut exister déjà à 20° K environ soit à -250° C seulement. Des températures de fonctionnement plus élevées — par exemple celle de l'hydrogène liquide, de l'azote liquide, peut-être même de l'air liquide — rendraient la manipulation plus simple et les frais moins élevés, et faciliteraient les recherches pour trouver des applications pratiques.

L'application la plus commune et la plus répandue de cette nouvelle merveille scienti-

fique est à trouver dans la technologie magnétique. Des aimants supraconducteurs produisent des champs magnétiques que l'on n'a jamais pu réaliser d'une façon pratique auparavant et avec une dépense d'énergie à peu près nulle. La densité plus forte du courant permet une réduction de volume qui rend possible la réalisation d'aimants de formes compliquées — par exemple l'aimant baseball dont les enroulements ont la forme des coutures d'une balle de baseball. L'étude du magnétisme est maintenant poussée au-delà des limites actuelles pour les applications futures.

Les champs magnétiques gaussiens.

On mesure généralement les champs magnétiques en « gauss » ; la force du champ magnétique terrestre varie d'un demi-gauss environ à l'équateur à un gauss ou à peu près aux pôles. Un aimant en fer à cheval du genre jouet d'enfant a un champ de 100 gauss environ. Un grand électro-aimant classique peut produire 30 000 gauss.

En ce moment même, les savants et les industriels sont engagés dans une « course aux gauss » pour réaliser des aimants plus gros et plus puissants. A Los Alamos, (Nouveau-Mexique) et en Europe, des savants font exploser des charges explosives pour produire pendant un temps très court, de l'ordre de $1/100\,000^{\text{e}}$ de seconde, un champ magnétique de plusieurs millions de gauss.

LE CHAMP MAGNETIQUE DE 100 000 GAUSS est créé par un aimant supraconducteur. Trois bobines séparées de fil supraconducteur sont réunies pour former l'aimant, l'un des quatre aimants les plus puissants du monde. Il peut être alimenté par une simple batterie d'auto, qui est ensuite débranchée lorsque le courant est créé dans les bobines supraconductrices. En bas à droite, le plan supraconducteur à mémoire pourra accumuler plus de bits d'information par unité de surface que n'importe quelle grille d'ordinateur classique.



Au National Magnet Laboratory du Massachusetts Institute of Technology, il y a un électro-aimant classique qui peut produire un champ magnétique de 250 000 gauss, mais il consomme 16 millions de watts d'électricité (soit la consommation d'une ville de 15 000 habitants) et une grande quantité d'eau (des dizaines de milliers de litres par minute) pour son refroidissement. Le docteur C. B. Satterthwaite un professeur de physique à l'université de l'Illinois, a dit que les aimants supraconducteurs peuvent être conçus pour produire un demi-million de gauss après avoir reçu une seule petite impulsion électrique et avec une alimentation continue en hélium liquide.

Lorsque Onnes découvrit la radio-activité pour la première fois, il pensa aussitôt aux aimants supraconducteurs ; mais il s'aperçut bientôt que les métaux qu'il utilisait : le mercure, le plomb et l'étain redeviennent « normaux » (perdent leur supraconductibilité) lorsque le champ magnétique augmente au-delà d'une valeur trop faible pour être utile. Ces métaux sont maintenant classés comme supraconducteurs du type I. Il fallut un demi-siècle, jusqu'en 1961, pour que les savants de Bell Laboratories découvrent les supraconducteurs de Type II qui ont lancé la grande course aux aimants actuelle. Ces aimants sont constitués d'alliages comme le niobium-étain et le niobium-zirconium qui conservent la supraconductibilité même dans un champ magnétique très puissant.

Un des premiers fut mis au point par Westinghouse, pas plus grand qu'un petit pain rond et pesant seulement une livre, son champ de 43 000 gauss était créé par une batterie d'auto. Un électro-aimant de même puissance aurait pesé environ 20 tonnes et exigerait une alimentation continue de 100 000 watts environ.

Le Dr Jones m'a fait sursauter quand il a dit d'un ton tout à fait calme, avec son accent britannique :

« Quand nous serons arrivés à produire l'énergie industrielle par un dispositif thermonucléaire, comme cela semble inévitable, la « bouteille magnétique » qui servira à contenir la réaction thermonucléaire sera sans doute créée par des aimants supraconducteurs ».

Il expliqua que « la plus grande réserve d'énergie dont nous disposons c'est l'hydrogène de l'eau de mer ». Ceux qui s'occupent de ce problème envisagent des aimants de 12 mètres de long et de 3 mètres de large, avec des champs si puissants que les aimants classiques ne pourraient servir. Le Dr Jones a conclu : « Les aimants supraconducteurs sont le moyen pour obtenir l'énergie de l'avenir ».

Nos futurs astronautes voyageant vers les étoiles lointaines pendant des mois seront sans doute propulsés à l'aide de ces superaimants. Cela pourrait se faire soit en « emboîtant » une réaction thermonucléaire, soit par un dispositif qui accumule l'énergie magnétique et peut le convertir rapidement en électricité. Ces explorateurs seront protégés contre les particules très puissantes lancées par les explosions solaires par un champ magnétique et

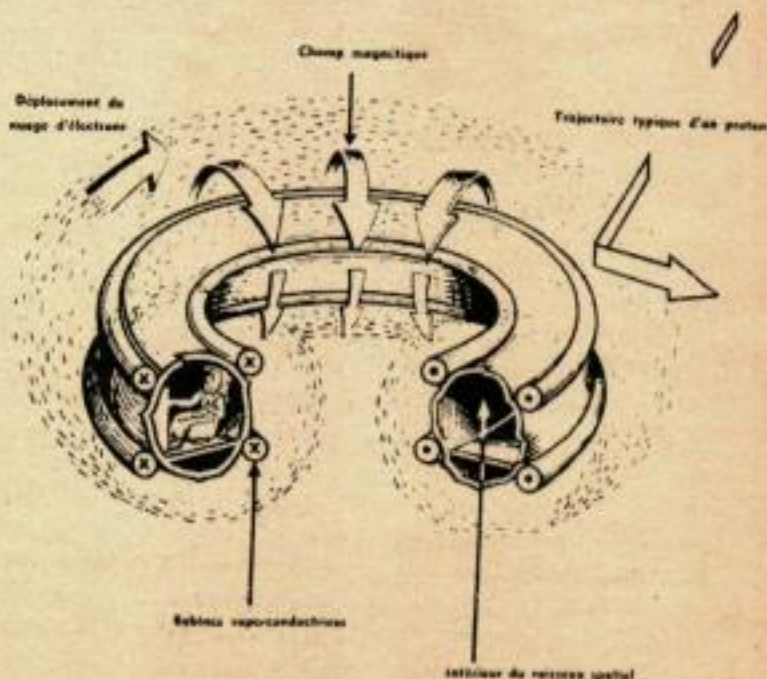
on envisage par exemple de construire un vaisseau spatial de forme annulaire. Les superaimants nécessaires pour cela ne pèseraient que 1/20^{ème} environ d'un blindage classique.

Ces superaimants sont également importants pour la physique des grandes énergies, la science qui s'occupe de la structure intime de la matière. On s'en sert actuellement dans les chambres à bulles, dont on dit que l'invention a été inspirée par un verre de bière avec les bulles qui montent. Les accélérateurs linéaires dans le même domaine des recherches sont utilisés pour accélérer les particules plutôt que pour les étudier comme dans les chambres à bulles. Le Dr Jones m'a parlé d'un accélérateur linéaire supraconducteur de l'université de Stanford, un appareil très concentré qui produit des rayons X très puissants et pourrait devenir un outil industriel.

Un gyroscope supraconducteur sans frottement est étudié en ce moment par la N.A.S.A. et on monte des superaimants sur des ballons de sondage pour étudier les rayons cosmiques. Les microscopes électroniques peuvent grossir 10 millions de fois environ : leurs « lentilles » magnétiques (en réalité un champ magnétique non uniforme) ont le même effet sur les électrons qu'ils utilisent que les lentilles optiques des microscopes classiques sur les rayons lumineux. Les superaimants permettent de nouveaux progrès en résolution et en grossissement.

Le département américain des transports est en train d'étudier l'utilisation des superaimants sur les trains très rapides qui se déplaceront en l'air. Les champs magnétiques repousseront la « voie » de sorte qu'il n'y aura aucun contact entre le train qui se déplace, et la voie. On a estimé que ces trains pour-

LA PROTECTION DU VAISSEAU spatial au moyen d'un blindage de plasma antiradiation est possible à l'aide d'une bobine supraconductrice qui produit un champ magnétique. Le vaisseau est ainsi protégé contre les protons lancés par le soleil grâce au nuage d'électrons qui l'entoure et qui freine les protons au moment où ils pénètrent dans cette zone de potentiel plus élevé. Ils sont alors repoussés dans l'espace.



raient atteindre une vitesse de 500 km/h avec un prix du billet bien inférieur à celui des avions. L'absence de frottement facilitera beaucoup l'entretien. Marne A. Dubs de l'Union Carbide, l'un des grands spécialistes de la supraconductibilité estime que vers 1985, la consommation d'énergie pourrait être quatre fois plus forte que celle d'aujourd'hui. Vers l'an 2000, elle pourrait être sept fois plus forte. Une ligne de transmission supraconductrice pourrait transporter l'électricité pour ainsi dire sans aucune perte d'énergie et Dubs envisage la ligne supraconductrice de courant continu comme simple de construction ; un tube recouvert d'une couche très mince de niobium-étain peut conduire un courant de 10 millions de Kw à 150 000 volts jusqu'à 1 600 km. La ligne n'aura que 20 à 25 cm de diamètre. Cette vision d'avenir est si proche que l'Edison Electrical Institute a accordé deux contrats à l'Union Carbide pour l'étude de réseaux de câbles souterrains pour la transmission de courant alternatif. Certains disent même que tous les besoins électriques de la ville de New York pourraient être alimentés par un seul câble supraconducteur qui n'aurait que 8 centimètres de diamètre.

Aimants supraconducteurs.

A mesure que progressent les systèmes de traitement des données d'information, les applications de la supraconductibilité y seront de plus en plus nombreuses. En réalité, selon le Dr Jones, les aimants supraconducteurs pourraient être la seule solution à mesure que les systèmes deviennent nécessairement plus grands. Le Dr Alfred Leitner, professeur de physique à l'université du Michigan, souligne que deux des plus importantes applications de ce phénomène sont le commutateur supraconducteur et le cryotron (la troisième est l'aimant supraconducteur).

Le cryotron est essentiellement un commutateur supraconducteur utilisé comme élément d'ordinateur. Les cryotrons peuvent assumer de nombreuses fonctions confiées généralement aux tubes à vide et aux transistors. Ces nouveaux dispositifs peuvent être combinés pour contenir environ un million d'unités de mémoire dans un espace de $5 \times 5 \times 20$ cm. On a ainsi peut-être le moyen de réaliser une nouvelle génération d'ordinateurs plus rapides, plus petits et plus rentables que les meilleurs qui existent actuellement. Certains savants parlent même d'ordinateurs pas plus grands qu'une boîte à chaussures.

Les aimants dans la médecine

Les aimants supraconducteurs pourraient aussi jouer un rôle important dans la médecine où l'on utilise en ce moment de puissants aimants classiques pour déplacer des médicaments dans l'estomac du patient, pour avoir de meilleurs rayons X et pour déplacer de petits aimants qui remorquent de petits tubes en plastique dans les vaisseaux sanguins des animaux, dans leur cerveau, pour porter les

médicaments à l'endroit exact à traiter. Même des plis dans les intestins des enfants ont pu être redressés en y mettant de la limaille magnétique, puis en déplaçant rapidement de puissants aimants sur la peau pour tirer sur les intestins.

Des superaimants ont également été utilisés pour fabriquer des générateurs capables de produire un courant alternatif de 8 000 watts pour les laboratoires de recherches du génie de l'armée U.S. qui ont recommandé, paraît-il, de l'utiliser sur les véhicules militaires, pour alimenter les radars et les engins les plus perfectionnés. Un générateur de ce genre pourrait équiper un jour les véhicules de transport en commun, les hôpitaux, les exploitations agricoles et autres installations qui trouveraient pratique l'emploi d'un groupe électrogène léger et mobile.

L'armée est également intéressée par les dispositifs accumulateurs d'énergie où un courant très puissant est lancé dans une bobine de fil supraconducteur d'où on peut l'extraire quand on veut. La marine veut également tirer parti de la supraconductibilité pour la propulsion des navires, pour les ordinateurs cryogéniques et pour les servomécanismes. On a parlé notamment d'oscillateurs radio avec un accord extrêmement sélectif, ce qui permet de placer un plus grand nombre de canaux de communication dans une certaine bande de fréquence ; on a parlé également de magnétomètres pour une détection plus sûre des sous-marins.

LA SUPERFLUIDITE et la supraconductibilité sont liées l'une à l'autre et peuvent être expliquées par le concept tiré de la mécanique des quanta que la matière a les propriétés à la fois des ondes et des particules. P.W. Anderson et P.L. Richards des laboratoires de Bell Telephone ont démontré la théorie avec des expériences faites avec l'hélium liquide superfluide : les atomes de matière se comportent comme des ondes cohérentes.



L'imagination devient réalité

Parmi d'autres applications des supraconducteurs, on peut citer les voltmètres de courant continu sensibles à 1/1 000 000 000 000 000 de volt, les détecteurs d'infrarouge avec un délai de réaction de moins de 1/100 000 000 de seconde, un gravimètre extrasensible pour déceler les marées terrestres.

On peut citer le commentaire du docteur Satterthwaite sur l'état actuel de la supraconductibilité :

« Il est probable que les anticipations les plus audacieuses que nous pouvons faire à présent sur les applications possibles de la supraconductibilité sembleront tout à fait modestes d'ici dix ou vingt ans ».

Les répercussions de ces nouveaux progrès dans l'industrie, dans les activités économiques et techniques.

Technique aérospatiale

Les aimants supraconducteurs permettront de réaliser toutes sortes de groupes électrogènes pour propulser les véhicules spatiaux pendant des mois en dehors du système solaire.

Agriculture

Des générateurs supraconducteurs légers et compacts fourniront du courant électrique aux installations où l'alimentation électrique normale est absente ou serviront de groupes de secours.

Traitement des données

Les ordinateurs actuels sont rapidement dépassés par les besoins d'information de plus en plus grands. La supraconductibilité rétablira l'équilibre. De nouveaux dispositifs supraconducteurs peuvent concentrer environ un million d'unités de mémoire dans un espace de $5 \times 5 \times 20$ cm.

Electronique

La supraconductibilité peut être utilisée pour réaliser des oscillateurs radio si sélectifs qu'on peut placer un plus grand nombre de canaux de communication dans une bande de fré-

quence donnée : des cryotrons prendront la place des tubes à vide et des transistors.

Médecine

Les aimants peuvent être utilisés pour déplacer des tubes en plastique contenant des médicaments à l'intérieur du cerveau et pour baliser les radiographies.

Métallurgie

Des dispositifs à rayons X de grande puissance concentrés grâce aux supraconducteurs peuvent être utilisés pour découvrir les défauts des pièces métalliques d'auto, de pipelines, etc.

Utilisations militaires

La supraconductibilité trouvera des applications dans la détection des sous-marins et la propulsion des navires, dans les radars, les dispositifs accumulateurs d'énergie et les armements les plus perfectionnés.

Optique

Les microscopes électroniques qui peuvent déjà grossir 10 millions de fois seront encore perfectionnés par des aimants supraconducteurs (les aimants jouent le rôle des lentilles pour ces microscopes).

Recherches et inventions

Les superaimants sont plus petits, plus puissants et coûtent moins cher dans l'utilisation, ce qui les rendent très pratiques. Ils prennent une importance de plus en plus grande dans la physique des énergies élevées, dans les chambres à bulles et les accélérateurs linéaires.

Les transports

Les superaimants permettront de construire des trains très rapides qui se déplaceront sans frottement, sans contact avec le sol, à des vitesses de l'ordre de 500 km/h et le voyage coûtera beaucoup moins cher qu'en avion.

Services publics

Vers 1980, nous utiliserons quatre fois plus d'énergie qu'aujourd'hui et vers l'an 2000, sept fois plus. Seule la supraconductibilité nous permettra de faire face à ces besoins accrus.

QUELQUES MATERIAUX SUPRACONDUCTEURS ET LEURS TEMPERATURES CRITIQUES.

ELEMENT COMPOSE	TEMPERATURE CRITIQUE	ELEMENT COMPOSE	TEMPERATURE CRITIQUE
Mercure	4,16° K	Gallium	1,10
Plomb	7,2° K	Uranium	1
Etain	3,72	Zinc	0,91
Technetium	11,2	Cadmium	0,56
Niobium	8,7	Osmium	0,71
Lanthanum	5,4	Titanium	0,39
Vanadium	4,89	Niobium - Aluminium - Germanium	20,1
Tantale	4,38	Carbure de Niobium - Niobium nitré	17,8
Thallium	2,39	Niobium étain	18,1
Thorium	1,37	Les composés du graphite varient de	0,02 à 0,55.
Pluminium	1,20		

° O° K correspond à $-273,15^{\circ}$ C.

° C correspond à $+273,15^{\circ}$ K.

La température critique est la température à laquelle la substance devient supraconductrice.