

### 1.1. Introduction :

La cryogénie, qui concerne la science et la technologie des températures inférieures à 120 K (-153°C), a débuté son deuxième siècle d'existence. Cette discipline résulte d'une convergence historique entre les avancées scientifiques, telles que le développement progressif de la thermodynamique au XIXe siècle et l'évolution des théories énergétiques de J. Joule, S. Carnot, L. Boltzmann et J.W. Gibbs vers la mécanique statistique des particules microscopiques, ainsi que des progrès technologiques tels que la liquéfaction des gaz atmosphériques jusqu'alors considérés comme "non condensables". Ces progrès ont impliqué l'ingéniosité des physiciens et des ingénieurs pour étudier les propriétés des substances chimiques pures, leurs mélanges, les dispositifs de compression, l'écoulement et les transferts de chaleur des fluides, ainsi que les techniques d'isolation thermique.

Les premières réalisations marquantes incluent la liquéfaction de l'air en 1877 par L. Cailletet et R. Pictet, suivie de la première séparation de l'oxygène et de l'azote en 1883 par K. Olszewski et S. Wroblewski, et enfin la liquéfaction de l'hydrogène en 1898 grâce à l'invention du réservoir isolé sous vide avec écran de rayonnement par J. Dewar. Toutefois, c'est la première liquéfaction de l'hélium en 1908 par H. Kamerlingh Onnes qui a ouvert la voie à la recherche sur la matière condensée à basse température, un domaine qui reste un aspect crucial de la recherche aujourd'hui. Cette avancée a également conduit à la découverte de phénomènes tels que la supraconductivité en 1911 par H. Kamerlingh Onnes et la superfluidité en 1928 par W.H. Keesom, phénomènes qui ont été expliqués plus tard dans la seconde moitié du XXe siècle avec l'avènement de la mécanique quantique.

À une époque où la plupart des expériences en physique étaient menées par des chercheurs indépendants travaillant avec de petits appareils, le laboratoire de H. Kamerlingh Onnes à Leyde est devenu le premier exemple de recherche scientifique à grande échelle, impliquant une équipe pluridisciplinaire, des méthodes structurées et des collaborations internationales. Depuis lors, la cryogénie n'a cessé de progresser vers des températures de plus en plus basses, atteignant aujourd'hui environ 0,1 nK dans les laboratoires spécialisés grâce à l'utilisation combinée de techniques de dilution de l'hélium et de désaimantation adiabatique.

Ce bref historique vise à illustrer comment la cryogénie, tout au long du XXe siècle, a été étroitement liée aux progrès de la science et de la technologie. Cette association perdure aujourd'hui grâce à des caractéristiques uniques, comme expliqué ci-dessous.

### 1.2. Diagramme de phase P, T :

Les différentes phases d'une substance pure en fonction des variables telles que la pression et la température sont représentées par trois courbes d'équilibre correspondant à un changement d'état.

**Solide-gaz** : courbe de sublimation

**Solide-liquide** : courbe de fusion

**Liquide-gaz** : courbe de vaporisation

Lorsque la pression et la température augmentent, les énergies impliquées dans la transformation gaz-liquide diminuent jusqu'à devenir nulles au point critique ( $P_c$ ,  $T_c$ ). Au-delà de ces valeurs, la distinction entre gaz et liquide disparaît (état supercritique monophasique). Par exemple, en refroidissant un fluide à une pression constante mais supérieure à  $P_c$ , le fluide se transforme progressivement en un état dense sans changements brusques dans ses propriétés physiques (semblable à un brouillard de plus en plus dense jusqu'à un état pseudo-liquide). Cela signifie également qu'il n'y a jamais d'interface entre liquide et gaz dans de telles conditions, car il n'y a toujours qu'une seule phase présente. Un raisonnement similaire appliqué à une pression variable mais une température constante et supérieure à  $T_c$  aboutit aux mêmes conclusions. L'état supercritique est souvent utilisé dans les systèmes de refroidissement car il empêche la coexistence des phases liquide et gazeuse, évitant ainsi les perturbations causées par la présence de gaz dans un flux liquide.

Lorsque la pression et la température diminuent, une autre limite est atteinte, appelée point triple, où débute la phase solide. Au point triple ( $P_t$ ,  $T_t$ ), les trois phases (solide, liquide et gaz) coexistent. Ce point est bien défini pour une substance pure et est souvent utilisé comme référence thermométrique. À partir de ce point, les trois courbes d'équilibre solide-gaz, solide-liquide et liquide-gaz se déploient. En dessous de  $T_t$ , seules les phases solide et gazeuse coexistent.

### 1.3. Applications des cryo-fluides et sources des basses températures :

Les techniques cryogéniques permettent d'obtenir des gaz d'une pureté extrême, ce qui confère une importance considérable à l'activité industrielle dans le domaine des gaz liquéfiés. Cette industrie englobe le gaz naturel, l'azote, l'oxygène, l'hydrogène, l'hélium, et autres. Les fluides cryogéniques trouvent leur utilisation dans divers secteurs tels que l'électronique, la métallurgie, la chimie, l'aérospatiale, entre autres. Par exemple, le carburant des fusées Ariane 5 est composé d'oxygène et d'hydrogène liquides, tandis que la fabrication de composants semi-conducteurs, comme les microprocesseurs de nos ordinateurs, requiert l'utilisation d'azote d'une pureté élevée obtenu par évaporation du liquide.

Des avancées significatives ont également été réalisées dans le domaine des applications médicales. Les scanners par résonance magnétique nucléaire (RMN) utilisent le champ magnétique généré par des bobines supraconductrices plongées dans un réservoir de Dewar contenant de l'hélium liquide. De même, la cryopréservation d'organes ou de cellules (telles que le sang) implique l'utilisation d'azote liquide et de réservoirs de stockage cryogénique.

L'azote liquide est également largement utilisé dans le domaine de la cryochirurgie. De plus, les grands instruments scientifiques font partie des utilisateurs majeurs du froid. De nombreux laboratoires ont installé des aimants supraconducteurs pour fournir des champs magnétiques extrêmement intenses, notamment dans les installations d'expérimentation sur les plasmas, comme le Tore Supra, par exemple.

L'espoir de trouver une source d'énergie pour le futur repose sur des recherches menées à basse température, où un apport de chaleur très faible entraîne une augmentation perceptible de la

## Introduction à la Cryogénie

température. Cela a conduit à l'idée d'utiliser les techniques cryogéniques pour la détection des particules cosmiques. Actuellement, plusieurs instruments dits "bolométriques" sont utilisés dans les laboratoires d'astrophysique à cette fin.

Les propriétés quantiques de la matière ouvrent également la voie à la conception de nouveaux étalons de grandeurs fondamentales ou appliquées, tels que le Volt ou l'Ohm, définis par des effets comme l'effet Josephson et l'effet Hall quantique, et réalisés par des dispositifs à très basse température.

Dans le domaine électrotechnique, les dispositifs supraconducteurs offrent un potentiel significatif pour un gain d'énergie par rapport aux systèmes classiques. Les transformateurs, alternateurs et limiteurs de courant supraconducteurs sont progressivement déployés sur les réseaux électriques pour une efficacité accrue.

Les applications dans le domaine des télécommunications se sont également développées rapidement, en particulier avec les filtres très sélectifs pour les téléphones mobiles, fabriqués à partir de supraconducteurs à "haute température critique" maintenus à la température de l'azote liquide. D'autres applications visent à exploiter la grande sensibilité et le faible bruit électrique de certains dispositifs fonctionnant à basse température, tels que les amplificateurs cryogéniques. Les SQUIDS (dispositifs quantiques supraconducteurs interagissant avec les flux magnétiques) sont par exemple les magnétomètres les plus sensibles existants, capables de mesurer des tensions de l'ordre du picoVolt.

Avec la miniaturisation des circuits électroniques à l'échelle nanométrique, leur sensibilité aux perturbations thermiques devient de plus en plus critique. Les nano-objets étudiés dans les laboratoires à proximité du zéro absolu de température ont déjà conduit à de nombreuses découvertes fondamentales qui alimentent la technologie de demain.