

Bulletin de l'Institut International du Froid of the International Institute of Refrigeration



2003-6

*Abstracts and News
Analyses et Informations*

Article de synthèse

**La cryogénie,
clé de la science et
de la technologie avancées**

Philippe Lebrun

Review Article

**Cryogenics, Key to
Advanced Science and
Technology**

Philippe Lebrun

VOLUME LXXXIII
BIMESTRIEL / PUBLISHED BI-MONTHLY
ISSN - 0020 69-70



Philippe Lebrun est Chef de la division Technologies des Accélérateurs au CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire) à Genève. Il participe à la construction du LHC (Large Hadron Collider), grand accélérateur de haute énergie basé sur l'utilisation massive d'aimants supraconducteurs fonctionnant à 2 K dans l'hélium superfluide.

Philippe Lebrun est diplômé de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines à Paris, France, et du California Institute of Technology à Pasadena aux Etats-Unis. Il a 30 ans d'expérience dans le domaine des aimants supraconducteurs et de la cryogénie. Il est l'auteur d'une centaine d'articles dans ces domaines.

Philippe Lebrun est Vice-Président du Comité International de Génie Cryogénique (ICEC) Président de la Commission AI, Cryophysique et cryoingénierie de l'HF et International Advisory Editor de la revue Cryogenics. Pour en savoir plus sur les activités du CERN, consultez: <http://user.web.cern.ch>

La cryogénie, clé de la science et de la technologie avancées

par

Philippe Lebrun

Président de la Commission AI de l'HF, Cryophysique et cryoingénierie
CERN, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
CH-1211 Genève 23, Suisse
philippe.lebrun@cern.ch

Plus qu'une complète revue d'ensemble de la cryogénie aujourd'hui, ce bref article s'attache plutôt à présenter sa relation continue avec les progrès de la science et de la technologie, tant par son rôle de technique auxiliaire que comme moteur du développement d'idées et de réalisations pratiques. Par ses exigences intellectuelles et ses défis techniques couvrant une grande variété de disciplines, la cryogénie constitue aussi un excellent terrain de formation pour les techniciens, les ingénieurs et les physiciens.

INTRODUCTION

La cryogénie, science et technologie des températures inférieures à 120 K,¹ a entamé son deuxième siècle d'existence. Elle est le résultat d'une conjonction historique du progrès scientifique (déploiement progressif de la thermodynamique au cours du XIXe siècle, de la théorie macroscopique de l'énergie de J. Joule et S. Carnot, à la mécanique statistique des particules microscopiques de L Boltzmann et J.W. Gibbs) et du progrès technologique (poursuite de la liquéfaction des gaz atmosphériques jusque là considérés comme « non condensables », faisant appel à l'ingéniosité des ingénieurs et des physiciens pour étudier les propriétés des substances chimiques pures et de leurs mélanges, les appareils de compression, l'écoulement et les transferts de chaleur des fluides, et les techniques d'isolation thermique). La première liquéfaction de l'air [L. Cailletet et R. Pictet, 1877] et la première séparation de l'oxygène et de l'azote

[K. Olszewski et S. Wroblewski, 1883] furent rapidement suivies par la liquéfaction de l'hydrogène, rendue possible par l'invention d'un réservoir isolé sous vide avec écran de rayonnement [J. Dewar, 1898]. Cependant, ce fut la première liquéfaction de l'hélium [H. Kamerlingh Onnes, 1908] qui ouvrit la voie de la recherche sur la matière condensée aux basses températures, un domaine qui est aujourd'hui encore un aspect majeur de la recherche, et qui engendra la découverte de nouveaux phénomènes tels que la supraconductivité [H. Kamerlingh Onnes, 1911] et la superfluidité [W.H. Keesom, 1928], qui ne furent expliqués qu'au cours de la deuxième moitié du XXe siècle, avec l'émergence de la mécanique quantique. Il est intéressant de rappeler qu'à l'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 fut le premier exemple de recherche scientifique à « grande échelle », impliquant une équipe pluridisciplinaire, des efforts structurés, des méthodes quasi industrielles et des collaborations internationales. Depuis, la cryogénie n'a cessé de progresser vers des températures de plus en plus basses (Figure 1), atteignant aujourd'hui des valeurs d'environ 0,1 nK dans les laboratoires spécialisés grâce à l'association de techniques de dilution de l'hélium et de désaimantation adiabatique.

Ce bref historique n'a pour but que de montrer comment la cryogénie, du début et tout au long



du XXe siècle, a été associée aux progrès de la science et de la technologie. Ceci est vrai aujourd'hui encore, grâce à des caractéristiques uniques, présentées ci-après.

I. APPLICATION DES PHENOMENES DE BASSE ENERGIE

Les basses températures rencontrées en cryogénie peuvent être utilisées pour révéler et étudier les phénomènes physiques de basse énergie (1 K correspond à 10^{-4} eV ou 10^{-23} J), occultés à température ambiante par les excitations thermiques - par exemple les propriétés de transport intrinsèques des métaux et des alliages - et pour créer de nouvelles formes de matière condensée dominées par l'énergie de « point zéro » d'origine quantique plutôt que par les interactions entre les particules et les atomes - supraconducteurs, superfluides et même condensats réels de Bose-Einstein (Tableau 1). Même si le potentiel d'application de ces phénomènes fut repéré très tôt, le transfert du laboratoire aux applications pratiques a requis un laps de temps plus long que la normale (Figure 2). Ce n'est qu'après l'apparition des supraconducteurs de type II au début des années 1960 et le développement de techniques frigorifiques capables de générer la température de l'hélium II, que la supraconductivité et la superfluidité ont pu être appliquées à grande échelle dans des domaines industriels tels que les systèmes à résonance magnétique nucléaire (RMN),² les dispositifs de fusion par confinement magnétique³ et les accélérateurs de particules à haute énergie^{4,5} (Figures 3, 4 et 5). Avec quelque 15 000 unités dans le monde et une demande constamment en hausse, les dispositifs d'imagerie par résonance magnétique (IRM) constituent la plus grande part de marché des applications de la supraconductivité.

Les supraconducteurs « haute température » - une catégorie de matériaux récents toujours en phase de développement - remplaceront

éventuellement la technologie conventionnelle dans des secteurs commerciaux portant sur les machines électriques et les lignes de transport.⁶ Même si l'avantage principal des supraconducteurs haute température est de fonctionner à la température de l'azote liquide (jusqu'aux environs du point triple à 63 K), les matériaux disponibles actuellement nécessitent encore pour certaines applications une cryogénie à basse température (typiquement 20 K ou jusqu'à la température de l'hélium liquide) (Figure 6).

Certaines applications électrotechniques de la supraconductivité n'ont cependant pas d'équivalent conventionnel. L'absence de résistance électrique a permis de concevoir et de fabriquer des systèmes de stockage d'énergie magnétique supraconducteur (SMES), utilisés pour l'écrêtage des pointes de puissance, pour la stabilisation des réseaux ou pour les alimentations électriques à fonctionnement ininterrompu. La capacité des supraconducteurs à passer rapidement de l'état supraconducteur à l'état résistif lorsque leur courant critique est dépassé a déjà été appliquée aux limiteurs de courant de défaut qui protègent les réseaux des surintensités destructrices.⁸

La faible valeur du quantum de flux magnétique des supraconducteurs est utilisée pour les étalons de mesure de précision et la détection sensible des champs magnétiques: les interféromètres quantiques supraconducteurs (SQUID) sont devenus des outils indispensables pour la prospection géophysique, la détection sous-marine et l'encéphalographie magnétique.⁹ Dans de nombreux cas, on ne peut tirer tout l'avantage de la précision et de la sensibilité qu'en réduisant simultanément le bruit thermique, donc en faisant fonctionner les appareils à large bande passante à température cryogénique, même s'ils utilisent les nouveaux supraconducteurs « haute température ». Grâce à l'utilisation de détecteurs sensibles et à la

Tableau 1. Températures caractéristiques des phénomènes de basse énergie rencontrés en cryogénie

| | |
|---|------------|
| Supraconducteurs « haute température » | ~ 100 K |
| Supraconducteurs « basse température » | - 10 K |
| Propriétés de transport intrinsèques des métaux | < 10 K |
| Cryopompage | quelques K |
| Fond cosmologique diffus | 2,7 K |
| Hélium 4 superfluide | 2,2 K |
| Bolomètres pour rayonnement cosmique | < 1 K |
| Condensats atomiques de Bose-Einstein de faible densité | ~ μ K |



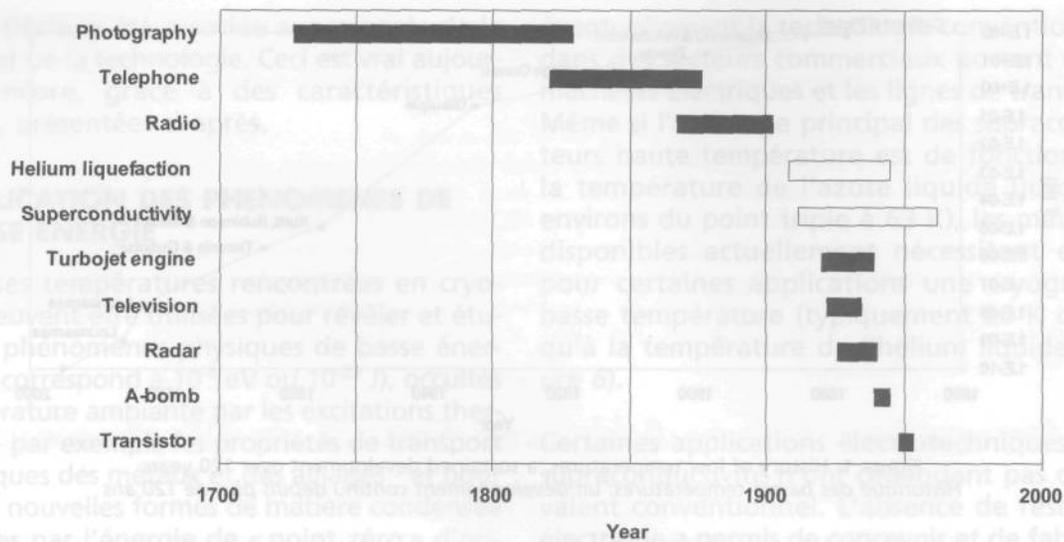


Figure 2. Time from discovery of principle to émergence of technology
Délaientreladécouverteduprincipeetl'émergencedelatechnologie

réduction du bruit thermique, la cryogénie a trouvé sa place pour le refroidissement des détecteurs semi-conducteurs embarqués utilisés pour étudier le fond cosmologique diffus de l'univers ou les objets astronomiques dans différentes bandes du spectre électromagnétique à partir de sondes spatiales en orbite autour de la Terre ou au-delà.¹⁰

Grâce au facteur exponentiel de l'équation d'Arrhenius, la cinétique des réactions chimiques peut être bloquée de manière efficace lorsque la température absolue devient inférieure à l'énergie d'activation. De nos jours, la conservation cryogénique des cellules biologiques et du sperme est largement répandue et son extension aux composants du sang et aux organes est actuellement à l'étude. Les cryopompes à adsorption ou à condensation utilisent également des températures inférieures à 20 K pour piéger les molécules de gaz résiduelles et obtenir un vide propre à des vitesses de pompage élevées.

II. DES FLUIDES DENSES DE FAIBLE VISCOSITE

Conformément à son développement historique, la cryogénie est le plus souvent utilisée pour la densification, la liquéfaction et la séparation par distillation des gaz et des mélanges gazeux. Même si elle est en compétition avec des procédés de séparation non cryogéniques, la liquéfaction des gaz est sans pareil lorsque la purification est critique ou difficile, par exemple pour la séparation et la récupération du tritium, ou lorsque le produit final doit être conservé à une densité maximale, soit pour un

transport compact - combustible pour fusées et réservoirs de gaz naturel liquéfié - soit pour les interactions des faisceaux de particules - cibles d'hydrogène liquide, chambres d'ionisation et calorimètres à liquides nobles, et sources de neutrons froids.¹¹

Dans les fusées propulsées par de l'hydrogène liquide, devenues des véhicules de lancement très puissants à grande fiabilité industrielle (*Figure 8*), l'utilisation d'un liquide sous-refroidi¹² et même de mélanges solides-liquides (« slush » ou glace fondue) pourrait augmenter la masse de combustible par unité de volume du réservoir, tout en réduisant la perte de combustible (« zéro boil-off » ou ébullition zéro) pour les missions longues.¹³

Si l'hydrogène, malgré sa faible masse moléculaire, devenait un vecteur énergétique courant - l'« économie de l'hydrogène » est souvent citée comme solution à l'augmentation de la consommation d'énergie et à la protection de l'environnement dans les pays industrialisés - l'hydrogène sous forme de liquide cryogénique aurait très certainement un rôle important à jouer, comme aujourd'hui dans les réservoirs des prototypes de voitures et de véhicules commerciaux équipés de moteurs à combustion interne ou de piles à combustible.¹⁴

Les liquides cryogéniques ont des caractéristiques spécifiques, qui nécessitent une attention toute particulière mais qui offrent également de nouvelles possibilités d'utilisation. Au vu de leur faibles températures critiques et de leur pressions critiques modérées, les cryogènes sont souvent utilisés dans le domaine supercritique,

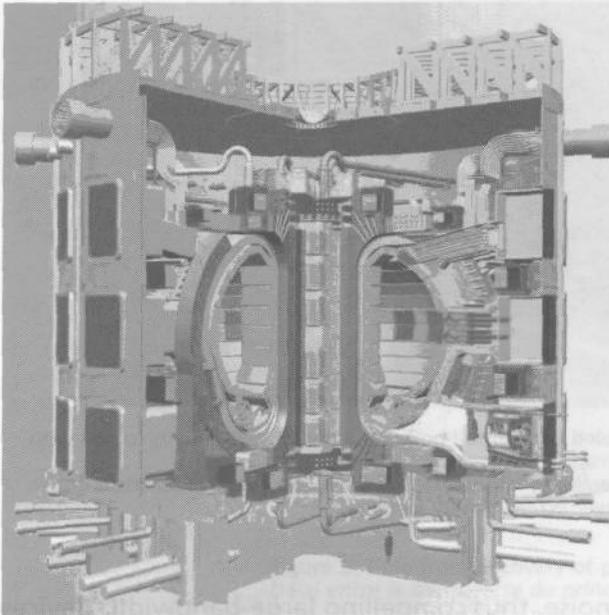


Figure 5. View of ITER, a large magnetic-confinement fusion tokamak in project
Letokamak ITER, unemachinedefusionparconfinementmagnétiqueendéveloppement

avec une transition continue de la phase liquide à la phase gazeuse et une divergence de certaines propriétés thermodynamiques au point critique. Un certain nombre de systèmes supraconducteurs de grande taille - chaînes d'aimants dans les accélérateurs de particules ou grands aimants - sont refroidis par circulation forcée d'hélium supercritique monophasique, évitant ainsi le risque d'instabilités diphasiques.¹⁵ L'association de la capacité thermique élevée et de la faible viscosité caractérisant l'hélium liquide et l'hélium superfluide rendent ces derniers irremplaçables en tant que milieu de stabilisation pour lutter contre les perturbations thermiques dans les appareils supraconducteurs.¹⁶

Plus la viscosité diminue à basse température, plus les écoulements de liquide ou de vapeur deviennent fortement turbulents, permettant d'atteindre des nombres de Reynolds très élevés lors d'expériences de laboratoire, ce qui constitue un outil précieux pour étudier les lois d'échelle de la turbulence des fluides. De plus, la variation simultanée de la densité, de la viscosité et de la température permet de maintenir les conditions de similitude de Reynolds et de Mach dans les écoulements à échelle réduite: ce phénomène est à la base des souffleries cryogéniques, outils essentiels pour la conception des ailes d'avions supersoniques pour lesquels les effets de la compressibilité ne peuvent être négligés. Enfin, le taux de dilatation volumique élevé à basse température engendre des nombres de Rayleigh élevés et une forte convection

naturelle. Des expériences pionnières ont récemment été menées sur les écoulements contrôlés à très hauts nombres de Reynolds et de Rayleigh en utilisant l'hélium cryogénique.¹⁷

III. UNE PRODUCTION DE FROID FIABLE ET EFFICACE

Les effets négatifs du second principe de la thermodynamique lors d'un fonctionnement à basse température peuvent être aggravés par la présence d'irrégularités internes ayant un effet sur l'efficacité globale du réfrigérateur, et donc également sur sa puissance et sa consommation d'énergie. Pour les installations cryogéniques ayant une puissance frigorifique de plusieurs kW, le facteur principal agissant sur l'optimisation des cycles frigorifiques et sur le choix de l'équipement - compresseurs, échangeurs de chaleur, détendeurs, vannes - est l'efficacité au sens du second principe, obtenue en limitant les irrégularités au niveau du transfert de chaleur et de l'écoulement des fluides. Ainsi, les grands réfrigérateurs cryogéniques à hélium (Figure 9), qui de nos jours fonctionnent tous à partir de variantes du cycle de Claude, ont vu leur rendement augmenter de manière significative au cours des dernières décennies, atteignant environ 30% du cycle réversible de Carnot, soit une performance excellente pour des appareils thermodynamiques fonctionnant entre 4,5 K et 300 K.¹⁸ De plus, lorsque la charge varie beaucoup, cette performance peut être maintenue sur une grande gamme dynamique, grâce à des techniques de contrôle élaborées, mises en œuvre à l'aide de régulateurs programmables et d'ordinateurs. Ces appareils fonctionnent en continu pendant plus de 6000 heures par an, sont disponibles plus de 99% du temps, et ne nécessitent qu'une seule période de maintenance par an. C'est l'arrivée de ces réfrigérateurs industriels à hélium, fiables et efficaces, qui a ouvert la voie aux applications de la supraconductivité de grande ampleur citées dans la première partie.

A l'autre extrémité de l'échelle de puissance, les cryorefroidisseurs sont de petites machines ayant une puissance frigorifique variant de quelques mW à quelques dizaines de W. Ils ne nécessitent aucune manipulation de cryogènes et sont souvent intégrés dans l'appareil qu'ils refroidissent.¹⁹ La question du rendement est souvent moins critique, mais celle de la fiabilité devient essentielle, particulièrement dans les applications aérospatiales embarquées qui ne permettent aucune maintenance ni réparation, et pour lesquelles le temps moyen entre défaillances (MTBF) doit impérativement être

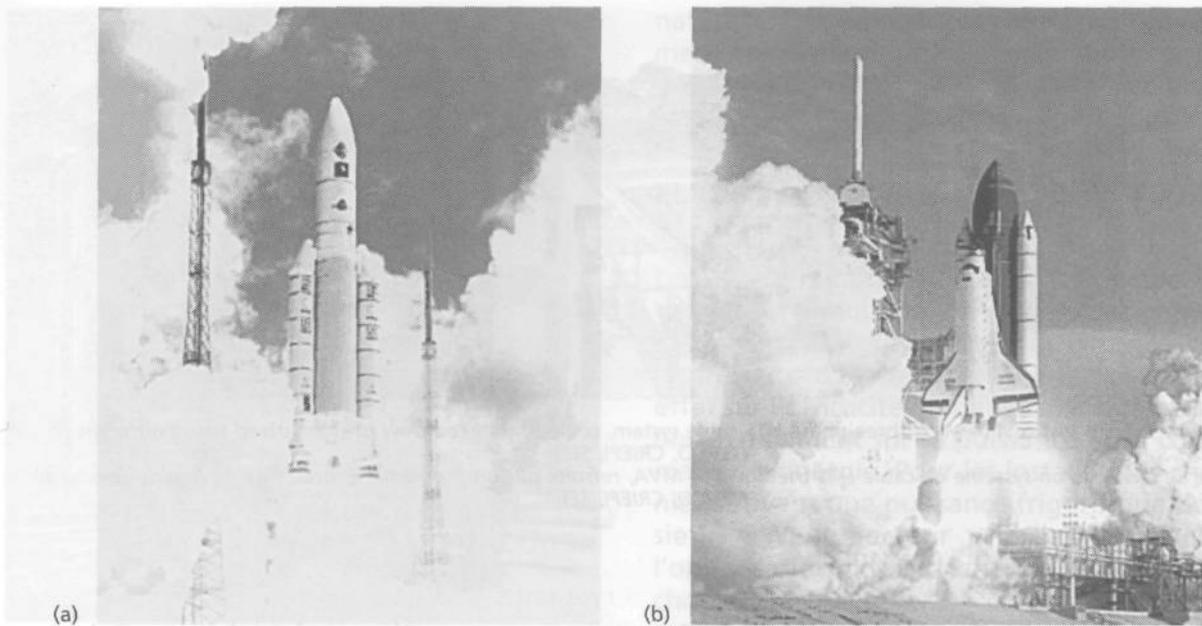


Figure 8. Cryogénie liquid rocket propulsion (a) Ariane 5 (25 t H₂, 130 t O₂)
 (b) Space Shuttle (100 t H₂, 600 t O₂)
 Propulsion de fusées à liquides cryogéniques (a) Ariane 5 (25 t H₂, 130 t O₂)
 (b) Navettes spatiales américaines (100 t H₂, 600 t O₂)

long. Un aspect important de la fiabilité est la simplicité de la conception, par exemple pour les compresseurs à sorption²⁰ et les oscillateurs de pression sans contact des cryorefroidisseurs spatiaux,²¹ ainsi que l'absence d'éléments frigorifiques mobiles dans les réfrigérateurs à tube à pulsation²² (Figure 10). Des développements remarquables dans ce domaine concernent l'utilisation de mélanges frigorigènes appropriés dans les refroidisseurs Joule-Thomson²³ et à tube à pulsation, ainsi que celle de matériaux régénérateurs à transition de phase magnétique permettant de compenser la baisse de chaleur spécifique des solides à basse température et d'utiliser les refroidisseurs à tube à pulsation jusqu'à une température inférieure à 4 K.²⁴ Tandis que le secteur du froid cryogénique à grande échelle est contrôlé par un petit nombre de fabricants dans le monde, la grande variété des applications spécifiques et l'ingéniosité des chercheurs et des développeurs rendent le secteur des cryorefroidisseurs très dynamique et attractif pour les petites et moyennes entreprises.

IV. UNE FORMATION PLURIDISCIPLINAIRE

La cryogénie apparaît rarement comme telle dans le programme académique des universités et des écoles d'ingénieurs. Elle est en fait une association de disciplines scientifiques et techniques appliquées au domaine des basses températures, ce qui rend l'analyse des procédés, la conception des équipements et la construction

des machines bien plus délicates, nécessitant des connaissances spécifiques, de la rigueur et de l'ingéniosité de la part de l'ingénieur en cryogénie, tout en lui permettant d'avoir un large aperçu de ces disciplines multiples. Prenons l'exemple du concept plutôt abstrait de l'entropie : dans un système à basse température, la perte d'exergie - l'« énergie utilisable », une entité davantage accessible à l'intuition - est largement dominée par la production d'entropie, rendant cette dernière plus accessible à la compréhension de l'étudiant en cryogénie. De même, l'étude et la pratique de la cryogénie permettent de se familiariser avec les transitions de phase, les fluides supercritiques, les écoulements diphasiques, les régimes d'échange de chaleur non linéaires, les instabilités de débit et autres particularités apparaissant fréquemment, non seulement à basse température, mais dans les divers domaines de la science et de la technologie avancées. D'un point de vue plus technique, la construction en cryogénie nécessite une maîtrise des matériaux de structure, des techniques d'assemblage et de raccordement, des essais d'étanchéité et des procédures d'assurance qualité, constituant ainsi une école d'excellence, tant pour l'élève ingénieur que pour le technicien stagiaire.

CONCLUSION

Ce bref aperçu montre qu'après un siècle de progrès synergique dans les domaines de la



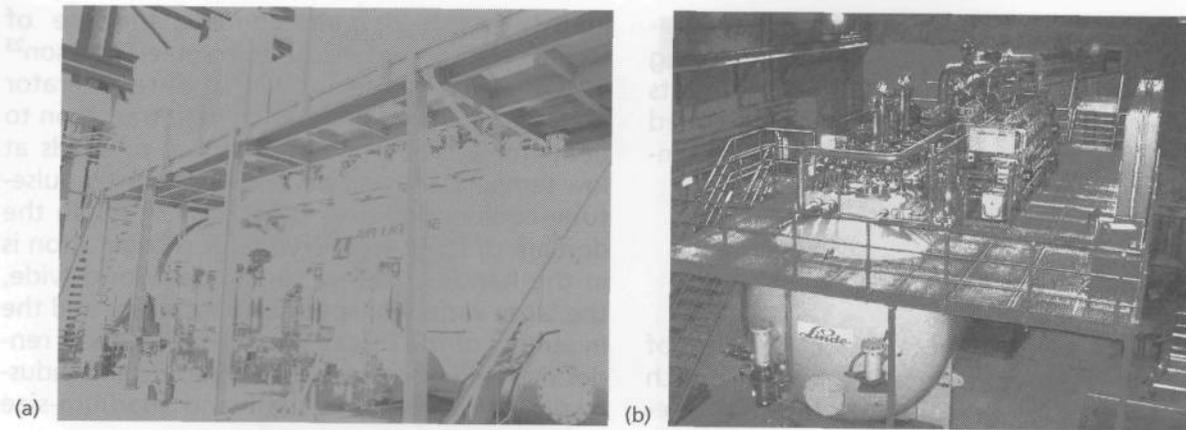


Figure 9. 18 kW at 4.5 K hélium cryogénie plants for the LHC by (a) Air Liquide and (b) Linde
 Installations cryogéniques à hélium de 18 kW à 4,5 K pour le LHC par (a) Air Liquide et (b) Linde

haute technologie et des sciences avancées, la cryogénie est bien implantée et continuera à se développer au même rythme que les secteurs auxquels elle contribue. Afin de se tenir informés des derniers développements en cryogénie, les lecteurs sont invités à participer aux conférences internationales ICEC et CEC/ICMC, organisées en alternance tous les deux ans, ainsi qu'aux conférences spécialisées organisées ou patronnées par THF, qui constituent les points de convergence de la communauté scientifique et technique.

REFERENCES

1. International Institute of Réfrigération, 1975, *New International Dictionary of Réfrigération*, 3rd éd., IIF/IIR, Paris
2. Wider G. 2002, High-resolution nuclear magnetic resonance applied to biophysics and molecular biology: highlights and challenges, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 12, 1: 740-743.
3. Aymar R. 2002, Cryogénies and the next step in magnetic fusion, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 97-104.
4. Lebrun P. 2002, Advanced superconducting technology for global science: the Large Hadron Collider at CERN, *Adv. Cryog. Eng.*, 47A: 3-14.
5. Wolff S. 2002, Cryogénies for future large particle accelerators, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 3-10.
6. Malozemoff AP et al. 2002, Power applications of high-temperature superconductors: status and perspectives, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 12, 1: 778-781.
7. Sato K et al. 2002, The latest development of high-Tc superconducting power cable, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 225-232.
8. Mikkonen R. 2002, Highlights of SC power applications in Europe, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, 12, 1: 782-787
9. Knuutila J. 2002, What can SQUIDs tell about the human brain, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 563-570.
10. Collaudin B et al. 2002, Herschel-Planck and the future of space cryogénies, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 493-502.
11. Gobrecht KH. 2002, Cryogénies of cold and ultra-cold neutron sources, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 119-122.
12. Notardonato WU. 2002, NASA stratégie launch initiative propellant densification program: results of the base period work and future plans, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 533-536.
13. Kittel P et al. 2002, Zéro boil-off cryogénie propellant storage at NASA, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 529-532.
14. Fleck U, Kündig A. 2002, Liquid hydrogen - A clean energy?, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 547-551.
15. Zahn GR, Heller R. 2002, Forced-flow cooling of large superconducting magnets for fusion applications, *Proceedings of ICEC19*, Gistau & Seyfert éd., Narosa Publishing House, New Delhi: 151-156.