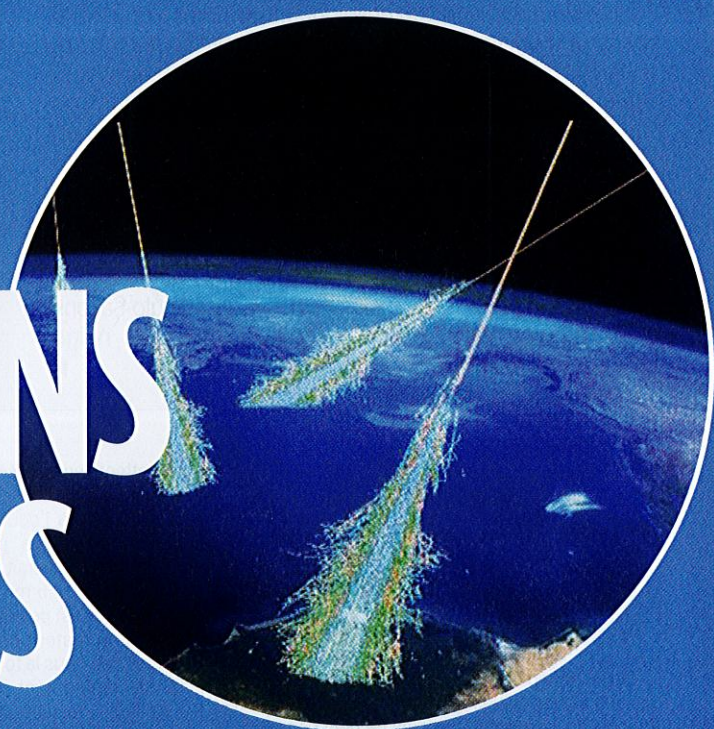


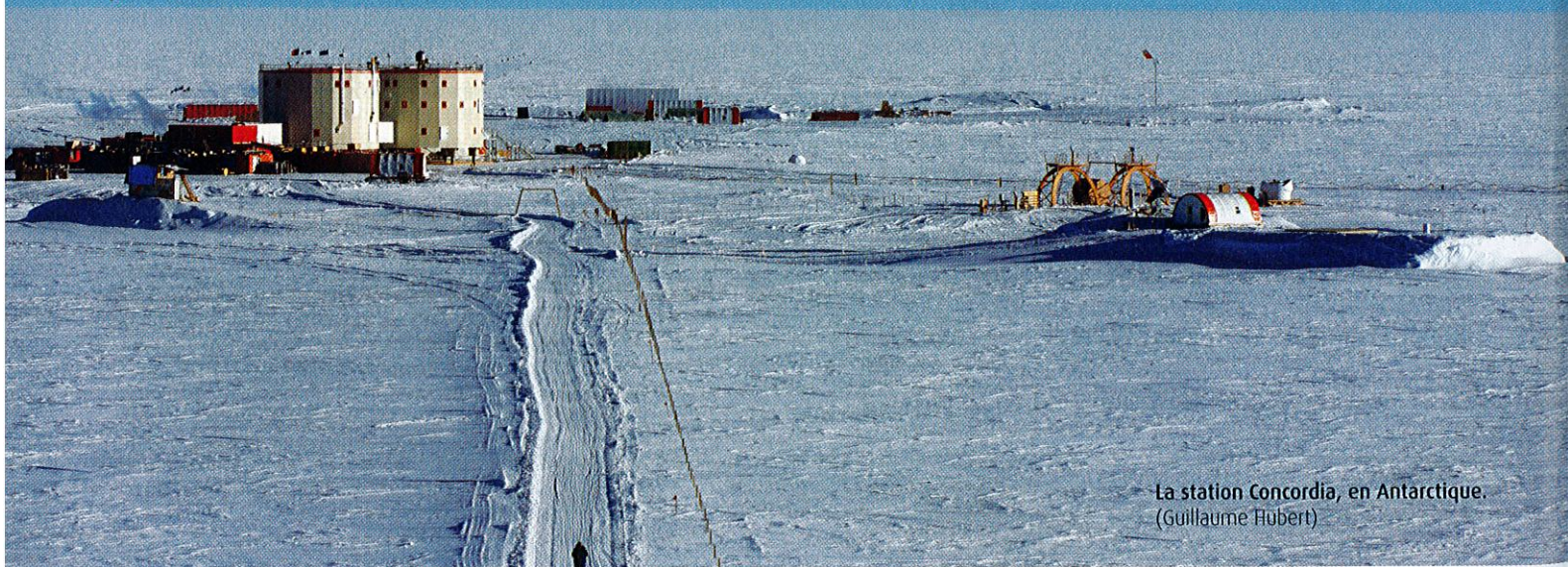


EN ANTARCTIQUE LA CHASSE AUX RAYONS COSMIQUES



1. Les grandes gerbes atmosphériques induites par les rayons cosmiques primaires; ces gerbes se composent d'une multitude de particules secondaires: neutrons, protons, muons, pions, électrons, etc.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le rayonnement cosmique n'est pas un rayonnement de nature électromagnétique comme la lumière ou les rayons X, mais un flux de particules, souvent de très haute énergie, qui se déplacent dans l'espace intersidéral. Ces particules sont majoritairement (environ 85 %) des noyaux d'hydrogène (ou protons), et aussi des noyaux d'hélium et d'autres particules, y compris des neutrinos. Leurs énergies sont toujours très élevées: certaines peuvent atteindre 10^{20} électronvolts (eV) et, dans ce cas, ce sont des particules fortement relativistes, dont la vitesse est très proche de celle de la lumière. Ce rayonnement provient de phénomènes très énergétiques se produisant dans notre Galaxie ou au-delà, telles que des fusions de trous noirs ou des implosions d'étoiles supermassives. Cette question fait toujours l'objet d'actives recherches. Par ailleurs, on a détecté aussi un rayonnement cosmique d'énergie beaucoup plus basse (environ quelques GeV, 10^9 eV) provenant du Soleil, lors de certaines éruptions chromosphériques.



La station Concordia, en Antarctique.
(Guillaume Hubert)

NATURE ET ORIGINE DES RAYONS COSMIQUES

Lorsqu'un rayonnement cosmique traverse l'atmosphère terrestre, il se produit des interactions, des collisions avec les noyaux des atomes présents (O et N) qui donnent naissance à des particules secondaires moins énergétiques. Celles-ci, à leur tour, vont interagir. Il se produit ainsi des cascades de particules, encore appelées gerbes atmosphériques (fig. 1) qui sont formées de particules secondaires de moins en moins énergétiques et qui peuvent être détectées par des instruments au sol ou dans des engins spatiaux. Parmi les particules secondaires formées et arrivant au sol, il y a des muons (environ 60 %) et aussi des pions, des électrons, des protons et des neutrons. Les muons interagissent peu sur leur parcours, d'où leur nombre important en arrivant au sol. Le présent article s'intéresse à la détection des neutrons et en particulier à des travaux réalisés en Antarctique.

La découverte du rayonnement cosmique et de sa nature extraterrestre date de 1912, suite à des mesures réalisées à bord de ballons par le physicien autrichien Franz-Viktor Hess. Ultérieurement, le physicien français Pierre Auger (1899-1993) a été le premier à observer, en 1938, les gerbes atmosphériques produites par l'interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère terrestre. L'observatoire Pierre-Auger, en Argentine, est aujourd'hui l'un des grands centres de détection. En Arménie, sur le mont Aragats (3 200 m), un centre de détection des rayons cosmiques a été aménagé à l'époque de l'URSS et il fonctionnait encore en 2015 (cf. « La traque des rayons cosmiques en Arménie », *l'Astronomie* n° 81, mars 2015).

EFFETS NUISIBLES OU UTILES DES RAYONS COSMIQUES

La surface terrestre est protégée du rayonnement cosmique primaire par le champ magnétique terrestre et par l'atmosphère, mais ce n'est pas le cas pour les spationautes et autres voyageurs de l'espace. Les rayons cosmiques agissent sur les tissus biologiques; ils peuvent provoquer l'altération de molécules d'ADN et aussi créer des radicaux libres (radiolyse) avec des conséquences biologiques néfastes. Les pilotes d'avion sont moins concernés, mais des mesures sont tout de même prises car, à l'altitude où ils volent fré-

quement, le rayonnement est encore assez énergétique. Ainsi, les compagnies utilisent une dosimétrie réglementaire pour évaluer les doses reçues lors de chaque vol.

À cause du rayonnement cosmique, l'instrumentation électronique peut subir de graves dérèglements. On distinguera les défaillances réversibles comme les aléas logiques (inversion d'un bit dans une mémoire) des effets destructifs dont les conséquences sont bien plus critiques et font l'objet d'une attention toute particulière de la part des industriels. Par exemple, les rayons cosmiques sont suspectés d'être à l'origine d'un incident de vol survenu en 2008 sur un avion de ligne de la compagnie Quantas. Celui-ci décrocha deux fois successivement sur une centaine de mètres à la suite d'un mauvais fonctionnement inexplicable du pilotage automatique, ce qui engendra des blessures chez les passagers et les membres d'équipage. Les évolutions technologiques permettant des seuils de sensibilité toujours plus bas, ces problématiques concernent également désormais les applications terrestres. Ainsi, dans les caméras utilisées pour des observations astronomiques, les rayons cosmiques peuvent induire des niveaux de charges parasites dans les pixels qui se traduisent par un signal transitoire dont il est nécessaire de s'affranchir par traitement.

Le rayonnement cosmique arrivant sur Terre au niveau du sol représente 15 % de la radioactivité naturelle (le reste provient des roches radioactives). Ainsi, en géologie et en archéologie, la technique des datations basées sur la présence dans un échantillon d'isotopes rares, tel le carbone 14, peut être considérée comme une utilisation du rayonnement cosmique.

Un autre exemple d'utilisation du rayonnement cosmique est la technique de la tomographie, qui consiste à mesurer l'atténuation du flux de muons en fonction de la densité du milieu qu'il traverse. Par exemple, la surveillance des chambres magmatiques des volcans applique cette technique qui a été utilisée pour la première fois pour le volcan de la Soufrière, en Guadeloupe. Ou encore, EDF utilise des « nivomètres à rayons cosmiques » permettant d'évaluer les caractéristiques du manteau neigeux hivernal pour estimer les quantités d'eau qui rempliront les retenues hydroélectriques.

LA DÉTECTION DES NEUTRONS D'ORIGINE COSMIQUE

Les neutrons « cosmiques » représentent un pourcentage important des particules secondaires arrivant au sol. Un ordre de grandeur est que, pour environ 190 muons par seconde et mètre carré, il y a 75 neutrons par seconde et mètre carré. Ces neutrons se répartissent dans des catégories énergétiques différentes. En effet, selon le type d'interaction ayant fait apparaître un neutron, celui-ci peut être très énergétique si l'interaction est du type « choc direct » ou peu énergétique (on le nomme alors neutron thermique) si l'interaction est plutôt du type « évaporation ».

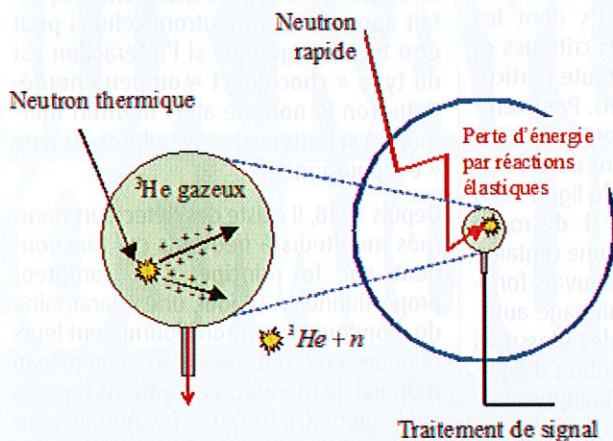
Depuis 1948, il existe des détecteurs nommés moniteurs à neutrons qui fonctionnent sur le principe d'un compteur proportionnel. À ce jour, une quarantaine de moniteurs à neutrons fournissent leurs données en temps réel grâce à un réseau mondial de moniteurs à neutrons répartis sur le globe (NMDB). Ces instruments enregistrent le nombre de particules par unité de temps et de surface, mais ils ne donnent pas d'information sur les énergies des neutrons détectés. Pour accéder au spectre énergétique des neutrons atmosphériques, il faut recourir à des techniques qui posent de nombreux défis instrumentaux et métrologiques. En effet, il faut être en mesure de détecter les neutrons sur l'ensemble de leur spectre énergétique, tout en étant peu sensible aux autres particules. Il faut également veiller à conserver une efficacité suffisante pour permettre l'étude de la dynamique des variations de l'environnement radiatif naturel atmosphérique (éruptions solaires, variations saisonnières, etc.).

Entre 2007 et 2011, une plateforme d'instrumentation dédiée à la spectrométrie énergétique des neutrons cosmiques a été développée à l'Onera. Le principe du spectromètre neutron repose sur deux propriétés physiques du neutron:

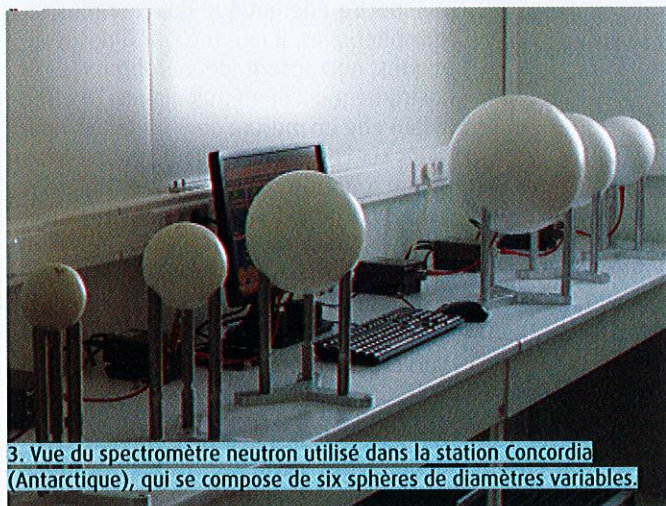
- La première est la forte probabilité qu'ont les neutrons de faible énergie, dit thermiques, d'interagir par réaction de capture avec certains isotopes tels que lithium 7 (${}^7_3\text{Li}$) ou l'hélium 3 (${}^3_2\text{He}$), comme selon la réaction nucléaire: ${}_0^1\text{n} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^1_1\text{p}$. Ces réactions de capture conduisent à l'émission de particules secondaires qui ionisent le milieu qu'elles traversent et qui se traduisent par une signature détectable.

- La seconde s'appuie sur le processus d'interaction élastique des neutrons énergétiques avec les noyaux d'hydrogène, conduisant à une perte d'énergie de ces neutrons sans en altérer la nature.

Cette technique permet donc de détecter les neutrons très énergétiques aussi bien que les autres. La fig. 2 donne le schéma théorique du spectromètre neutron. Dans la pratique, l'instrument est constitué de sphères en polyéthylène (matériau riche en hydrogène), de diamètres variables. Au centre de chaque sphère est inséré un compteur proportionnel (détecteur Bonner de neutrons thermiques (fig. 3).



2. Schéma du principe de fonctionnement de la sphère de Bonner avec détecteur central à remplissage gazeux (^3He).



3. Vue du spectromètre neutron utilisé dans la station Concordia (Antarctique), qui se compose de six sphères de diamètres variables.

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEAU RÉSEAU MONDIAL DE SPECTROMÈTRES NEUTRONS

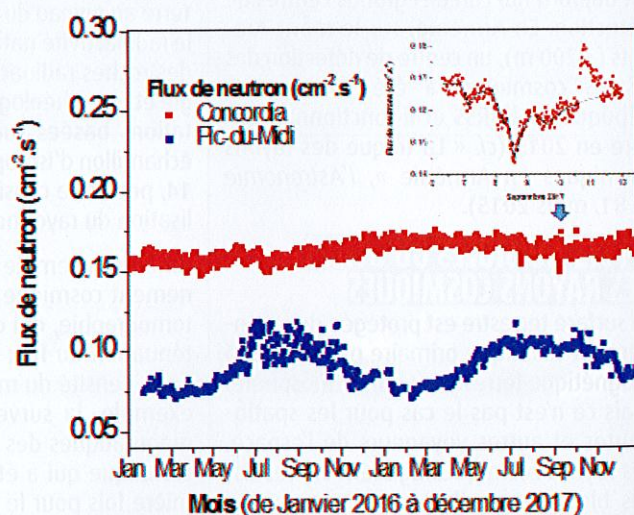
Le premier instrument de ce réseau a été installé au pic du Midi de Bigorre en mai 2011 (observatoire Midi-Pyrénées), accumulant donc à ce jour huit années de mesures.

Un deuxième instrument, déployé en Amérique du Sud, a permis de mener une campagne de mesures de plusieurs mois à l'observatoire du Pico dos Dias, lieu particulièrement intéressant puisque conjuguant l'altitude du site et une localisation dans l'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud. Cette anomalie ma-

gnétique vient du fait que le champ magnétique terrestre a une valeur particulière dans cette région. Elle cause un rapprochement des ceintures de Van Allen à cet endroit. Ces mesures se sont déroulées dans le cadre d'une collaboration très fructueuse avec l'Institut d'études avancées du Brésil (IEAv). Ce second instrument devrait être redéployé en 2018.

Un troisième spectromètre est conçu dans le cadre du projet IPEV CHINSTRAP (Continuous High-altitude Investigation of Neutron Spectra for Terrestrial Radiation Antarctic Project; Chinstrap est également le terme scientifique qui désigne certains manchots de l'Antarctique). Ce projet polaire a été sélectionné en 2014 suite à l'appel à projets par l'Institut polaire français Paul-Émile-Victor (IPEV). L'Antarctique est un milieu particulièrement propice à la détection des radiations atmosphériques puisqu'il se situe dans les cornes polaires et que l'altitude au cœur du continent est généralement supérieure à 3 000 m. Ce projet s'est structuré grâce à une collaboration impliquant des laboratoires de recherche nationaux et internationaux. Son principal objectif était d'installer et d'exploiter un troisième spectromètre dans la base franco-italienne Concordia située à proximité du sommet du Dôme C (3 233 m). Une première campagne opérationnelle organisée par l'IPEV a été menée entre décembre 2015 et février 2016 et a permis l'installation de l'instrument. Il est depuis opérationnel et constitue avec les deux autres instruments un important réseau mondial d'étude des rayons cosmiques par spectrométrie neutron étendue aux hautes énergies.

Les mesures issues de ce réseau participent au développement d'un modèle global de l'environnement radiatif atmosphérique, et ont pour principaux champs d'application les effets sur les électroniques embarquées, l'évaluation des doses biologiques, ainsi que l'étude de l'interface atmosphère/espace. Une première éruption solaire a été enregistrée en septembre 2017 (fig. 4).



4. Les flux de neutrons mesurés au pic du Midi et à Concordia entre janvier 2016 et décembre 2017, et zoom sur l'éruption de septembre 2017 mesurée à Concordia.

MISSION EN ANTARCTIQUE



L'Antarctique est le sixième continent, c'est aussi le continent de tous les extrêmes : isolé du reste du monde, les températures les plus basses (jusqu'à $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ l'hiver), l'altitude moyenne la plus élevée ($+2\ 500\text{ m}$) à cause de l'épaisseur de la calotte glaciaire, les vents récurrents les plus élevés, et n'ayant jamais hébergé de vie humaine. Une mission polaire française organisée par l'IPEV vers l'Antarctique oriental commence le plus souvent dans le port d'Hobart en Tasmanie ou celui de Christchurch en Nouvelle-Zélande. Il s'agit des deux grandes bases arrière qui hébergent les structures logistiques, les bateaux polaires ou bien encore les plateformes opérationnelles des agences polaires, dont l'IPEV. Pour se rendre à Concordia, la première étape consiste à rejoindre une station polaire littorale, comme Casey, Dumont-d'Urville, Mac Murdo ou Mario Zucchelli. Ce trajet peut s'effectuer en bateau ou directement en avion. Au terme de cette première étape de un à plusieurs jours, on atteint Concordia par un vol de quelques heures en Twin Otter ou Basler.

Les premiers pas à Concordia sont l'aboutissement d'un travail de planification logistique et scientifique de plusieurs années. Cet environnement n'est que désolation, de la glace à perte de vue... Les conditions étaient particulièrement rigoureuses durant cet été austral avec une température avoisinant les $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'altitude est également un sérieux obstacle dans la bonne marche de notre acclimatation ($+3\ 233\text{ m}$), tout comme le jour permanent qui perturbe notre cycle de sommeil.

Une trentaine de scientifiques était présente sur la base pendant mon séjour, réunissant glaciologues, sismologues, climatologues, chimistes, physiciens et astronomes. Les repas à heures fixes rythment nos journées : 7 h, midi et 19 h. Chaque repas est l'occasion d'échanger sur nos travaux respectifs, d'évoquer les dif-

ficultés rencontrées et de parler de notre vie quotidienne. Le cuisinier est un homme clef de la station, et à ce sujet la France et l'Italie tiennent tout à fait leur rang de référents gastronomiques, même en Antarctique ! À l'issue des repas, nous prenons un temps de détente, qui peut se traduire par des jeux, par la lecture (Concordia dispose d'une bibliothèque assez fournie) ou par la poursuite de nos discussions. La réunion hebdomadaire du samedi après-midi (nommée *weekly*

sont des ressources rares et dont il faut user avec mesure et responsabilité. Le retour est un sujet récurrent qui alimente nos échanges, particulièrement pour les hivernants sortants. Les rotations des navires et aéronefs sont toujours conditionnées par la météorologie, introduisant une imprévisibilité qui parfois déroute. En ce qui concerne les objectifs techniques et scientifiques de cette mission, il s'agissait de déplacer le spectromètre neutron dans un autre abri pour faciliter sa mani-

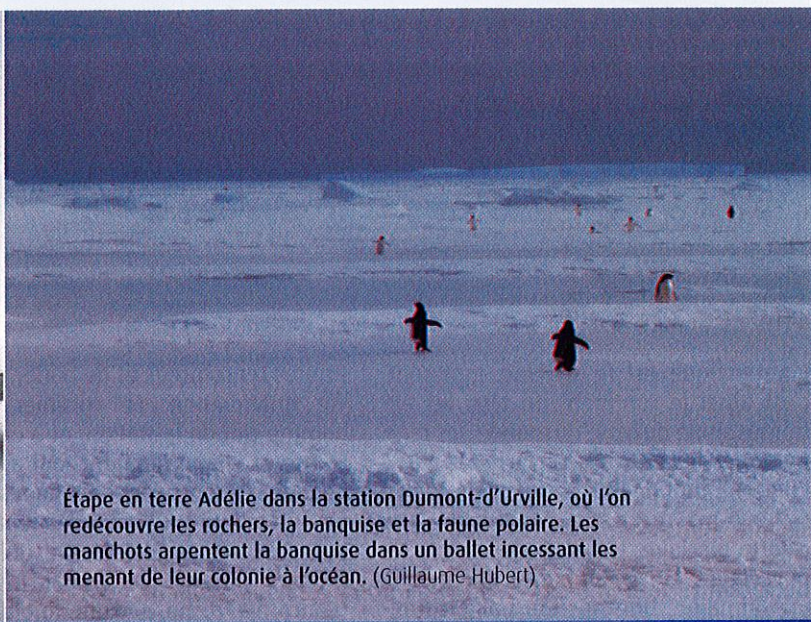
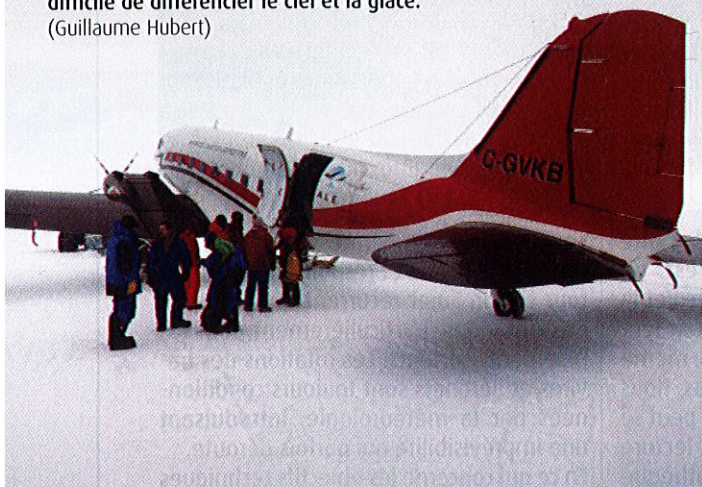


Le froid règne sur le Dôme C.
(Guillaume Hubert)

meeting) est essentielle puisqu'elle permet de dresser un bilan des différentes activités de la station, de connaître les avancements des uns et des autres, de percevoir les difficultés techniques liées à ces conditions extrêmes. C'est aussi l'occasion de rappeler les règles de sécurité et de savoir-vivre, essentielles en pareil lieu. Cette compréhension plus globale du mode de fonctionnement de la station nous rappelle combien l'énergie et l'eau

pulation et son opérabilité hivernale, puis de mener une campagne de calibrage afin de garantir la bonne interprétation des mesures. Les gestes les plus habituels et les mieux maîtrisés en temps normal deviennent en pareil lieu complexes, voire parfois insurmontables. Chaque matin, il fallait regagner le bâtiment qui abrite le laboratoire, une distance anodine de quelques centaines de mètres qui peut se transformer en une véritable épreuve si le

Le Basler lors d'un transfert de Concordia vers la terre Adélie. Les conditions de vol et d'atterrissage sont très particulières. Par exemple, il est souvent difficile de différencier le ciel et la glace.
(Guillaume Hubert)



Étape en terre Adélie dans la station Dumont-d'Urville, où l'on redécouvre les rochers, la banquise et la faune polaire. Les manchots arpentent la banquise dans un ballet incessant les menant de leur colonie à l'océan. (Guillaume Hubert)

sommeil a été mauvais, si le vent souffle ou si le moral est en berne. Un vrai travail sur soi est alors nécessaire, exigeant concentration, re-motivation et parfois encouragement. Ces difficultés passagères n'occultent en rien la joie de participer à une campagne polaire.

Il est aussi possible, selon les besoins de chacun, d'apporter une aide dans d'autres programmes de recherche ou à la logistique de la station. Il peut s'agir de participer au déneigement d'un abri prisonnier des glaces, de seconder un collègue lors de prélèvement de neige ou de contribuer à une opération logistique. Le programme CHINSTRAP a pu bénéficier d'une telle mobilisation lors du transfert de l'instrument vers son nouvel emplacement. Le déplacement de cinq caisses de 50 kg, qui dans des conditions ordinaires serait très simple à mettre en œuvre, requiert en milieu polaire une planification et un surplus d'énergie loin d'être anodin.

Un moment unique dans la vie de la station Concordia est l'arrivée du « raid », une sorte de caravane de l'extrême qui rejoint la station en parcourant la distance séparant la terre Adélie de Concordia. Il achemine le ravitaillement, les équipements scientifiques, du matériel ou bien encore le kérosène. Lorsque le raid approche de la station, nous allons à sa rencontre dans une effervescence qui traduit probablement la joie de rompre notre isolement et notre quotidien. Ensuite, commence un ballet incessant pour son déchargement.



Le départ de la station est toujours un moment particulier, ou chacun vient saluer ceux qui partent. Débutent alors quatre heures d'infini blanc, un vol nourri par l'impatience de découvrir les premiers rochers, la banquise puis l'océan. À la suite d'un atterrissage improbable entre ciel et glace, un hélicoptère nous achemine à la station Dumont-d'Urville, petite île prisonnière de la banquise et offrant un point de vue unique sur l'inlandsis. Il est fréquent de séjourner à Dumont-d'Urville et de pouvoir contempler la faune composée d'oiseaux, des manchots (Adélie et empereurs), et plus rarement de phoques. Après quelques jours passés en terre Adélie, *L'Astrolabe* vogue vers des terres plus clémentes, affrontant le pack, les icebergs et parfois une tempête estivale dans les cinquantièmes hurlants. Ce voyage prend fin lorsque nous percevons les premières

senteurs d'eucalyptus et que nous discernons la côte ciselée de la Tasmanie.

Cette expérience du continent blanc s'achève par une ré-immersion dans un monde qui grouille et pour lequel une forme de détachement s'est insidieusement développée au cours des semaines et des mois. Et pourtant, cette expérience continue de nourrir silencieusement notre intériorité et participe à une prise de conscience. L'Antarctique joue un rôle essentiel dans la régulation des courants océaniques et dans le climat planétaire. Ce continent, bien qu'en apparence immaculé et préservé, est déjà un révélateur des conséquences de l'activité humaine et de ses dérives. L'Antarctique est une terre de paix, de partage, de sciences, une terre à préserver et dont il faut probablement s'inspirer. ■