

Concordia – Dôme C un ciel d'une qualité extraordinaire (1)

Isabelle Vauglin, CRAL – Observatoire de Lyon, 69230 Saint-Genis-Laval

Membre du Comité National Français des Recherches Arctiques et Antarctiques (CNFRA)

Représentante française dans le groupe des sciences physiques du Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR)

Observer le ciel depuis le pôle Sud pose de nombreux problèmes mais le site est exceptionnel comme nous l'explique ici Isabelle Vauglin dans ce premier article. Dans une deuxième partie elle reviendra sur l'exploitation d'un tel site.

Grâce à ses pionniers, la France a acquis un savoir-faire unique en matière d'activités scientifiques en milieux polaires. Les Français gèrent avec les Italiens une base peu connue sur le plateau Antarctique à 3 233 m d'altitude : Concordia, au Dôme C.

Les qualités atmosphériques de Concordia en font un site exceptionnel pour les observations astronomiques et le site du Dôme C sur le plateau Antarctique s'avèrera probablement le meilleur site astronomique au monde, rivalisant à certaines longueurs d'onde avec le domaine spatial, mais les conditions d'exploitation y sont particulièrement difficiles.



Fig.1. Vue d'avion de la base antarctique Concordia.

Les contraintes atmosphériques des observations astronomiques

L'atmosphère est absolument indispensable à la vie sur Terre mais pour les astronomes, elle constitue à toutes les longueurs d'onde, de l'ultraviolet jusqu'au domaine radio-millimétrique, un obstacle et un problème. Composée de gaz et de particules

solides très fines, les aérosols, elle dégrade la qualité des images : elle est à la fois *source d'extinction* (absorption dans des raies ou des bandes, diffusion) de la lumière provenant des astres observés, *source de turbulence* qui dégrade le « piqué » (résolution angulaire) des images et *source d'émission de lumière parasite*, soit thermique propre (c'est un corps noir à environ 300 K), soit solaire diffusée (par les aérosols, nuages, diffusion Rayleigh)...

Bref, elle n'a pour nous presque que des défauts.

À toutes les longueurs d'onde, ce sont les propriétés de l'atmosphère au-dessus du site qui conditionnent la qualité des observations astronomiques. Pour s'affranchir de ce problème, les astronomes ont eu deux pistes : (1) s'installer à haute altitude pour diminuer autant que possible l'épaisseur d'atmosphère au-dessus de leur tête ou (2) aller dans l'espace, mais à des coûts très élevés et avec, le plus souvent, un manque de flexibilité et des conditions nettement plus difficiles.

Les astronomes voudraient évidemment essayer d'obtenir à partir du sol, des données de qualité comparable à celles que l'on obtiendrait dans l'espace mais à un coût moins prohibitif.

La sélection de sites d'observation

Pour installer les télescopes dans des sites aussi propices que possibles, les astronomes font des recherches de sites, c'est-à-dire qu'ils installent dans les lieux sélectionnés des instruments qui vont mesurer en continu les paramètres physiques de l'atmosphère pendant plusieurs années. Dans le choix d'un bon site, il n'intervient que des considérations de qualités atmosphériques reconnues (faible opacité, grande stabilité des images et faible émission propre).

C'est ainsi que les sites, par exemple, du Mauna Kea à Hawaï, de la Silla, du Paranal et de Chajnantor dans la chaîne des Andes au Chili font partie des meilleurs sites astronomiques reconnus et exploités aujourd'hui et c'est là qu'est installée la plupart des grands instruments modernes tels que CFH, Keck, Gemini, VLT, ALMA, et le futur E-ELT.

Et l'Antarctique ?

Depuis la signature du Traité sur l'Antarctique en 1959, l'Antarctique est un **continent de paix dédié exclusivement aux sciences**, et il est spécifié qu'*aucune activité intervenant pendant la durée du Traité ne constituera une base permettant de faire valoir, de soutenir ou de contester une revendication de souveraineté territoriale dans l'Antarctique*. Le Protocole au Traité sur l'Antarctique relatif à la protection de l'environnement, entré en vigueur en 1998, est venu compléter le Traité. Il désigne l'Antarctique comme une *réserve naturelle consacrée à la paix et à la science et interdit toutes les activités relatives aux ressources minérales de l'Antarctique autres que la recherche scientifique*. Jusqu'en 2048, il ne peut être modifié qu'avec l'accord unanime de toutes les Parties consultatives au Traité sur l'Antarctique.

Pour les astronomes, le continent Antarctique et notamment ses sites les plus élevés (les « Dômes ») présentent des avantages cruciaux par rapport

aux meilleurs sites « conventionnels » parce que l'atmosphère terrestre y est d'une qualité exceptionnelle.

De l'exploration à l'installation

Ce n'est pas un hasard si la France est présente aux pôles. Dans la suite de Dumont d'Urville et de Charcot, c'est en grande partie grâce à Paul-Émile Victor et ses expéditions au Groenland que la France a acquis une longue expérience de l'exploitation des sites polaires à des fins scientifiques. C'est ainsi qu'elle a pu dès 1978 développer et faire fonctionner la base continentale de Concordia au Dôme C, à 1 100 km de la base côtière de Dumont d'Urville (DDU).

Claude Lorius est une autre figure française de la science aux pôles : glaciologue passionné des pôles, il réalise son premier hivernage dans des conditions très précaires à la base Charcot en 1957 avec Roland Schlich et Jacques Dubois. En observant les bulles de gaz qu'un glaçon libère dans son verre de whisky, il a l'intuition qu'elles contenaient les archives de la composition de l'air au moment de la formation de cette glace. Avec Jean Jouzel, ils sont les premiers à faire le lien entre concentration atmosphérique de gaz à effet de serre (CO₂ et CH₄) et évolution du climat de la Terre et créent ainsi la paléoclimatologie, l'étude des climats passés.

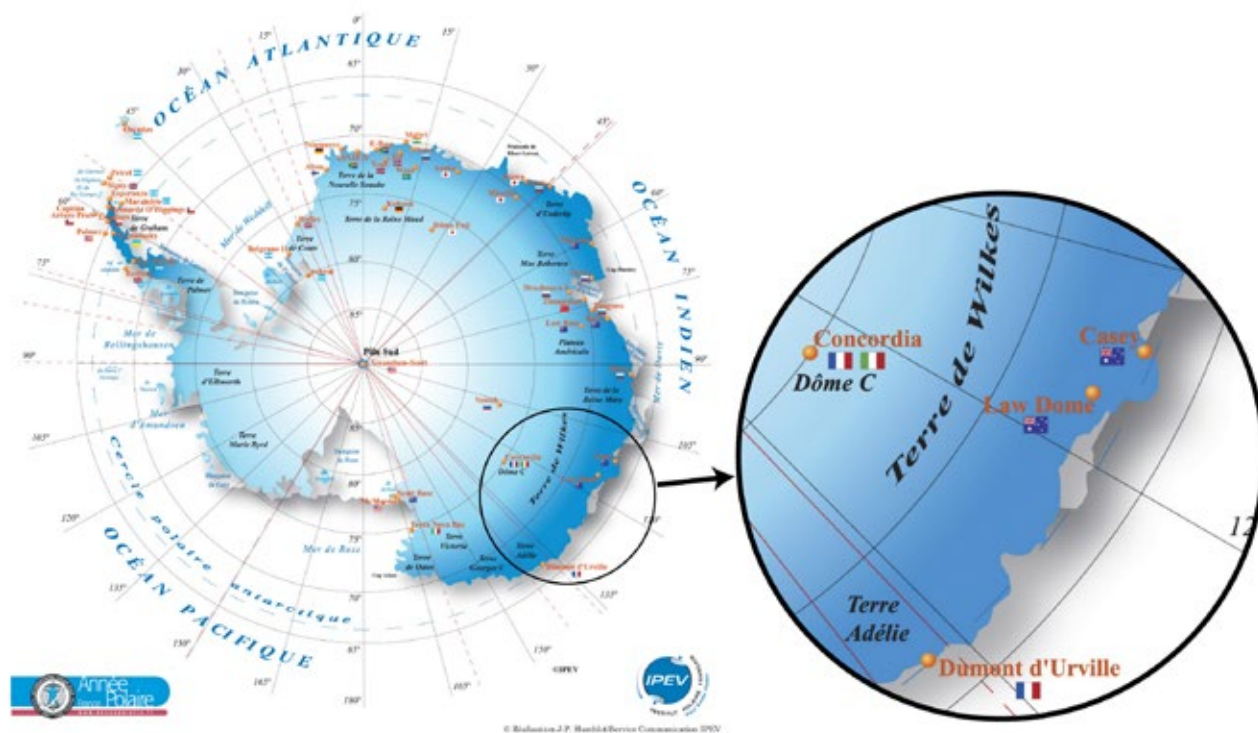


Fig.2. Les bases scientifiques du continent Antarctique.

Sous l'impulsion de C. Lorius, les Français réalisent des forages profonds, principalement en Antarctique et au Groenland, afin d'étudier la composition des bulles d'air incluses dans les carottes de glace, qui sont les archives privilégiées des climats anciens. La France accède alors au cercle très fermé des pays capables de réussir des forages profonds en régions polaires. Démarré en 1995 à la base franco-italienne de Concordia, le forage européen EPICA atteint le socle rocheux à $-3270,20$ m le 21 décembre 2004. Ce record de profondeur permet d'étudier l'évolution climatique sur la période la plus longue, allant au-delà de 800 000 ans.

La France a acquis un savoir-faire solide et envié (!) et une capacité reconnue à mener des recherches en milieu polaire.



Fig.3. Vue de la base franco-italienne de Concordia, plateau Antarctique.

La station Concordia : un atout majeur pour la France et l'Europe

Grâce à son Institut Paul-Émile Victor (IPEV), la France est, avec son partenaire italien, l'opérateur d'une des deux seules stations de l'intérieur du continent Antarctique en activité tout au long de l'année : la station Concordia peut fonctionner en hivernage avec seize personnes depuis 2005 (figure 3). Les hommes y arrivent en avion depuis DDU ou depuis la base côtière italienne de Mario Zuchelli à Terra Nova (à 1 200 km). Elle est régulièrement approvisionnée en matériel lourd par le « Raid », le convoi entre DDU et Concordia capable de parcourir les 1 100 km en 10 à 12 jours, apportant 500 tonnes de fret à la base, dont presque la moitié de fuel et 10 tonnes de nourriture. Il est possible de faire au maximum 3 allers-retours par an, une limite stricte à la quantité de matériel apporté ! L'organisation de ces convois logistiques sur la calotte glaciaire constitue un savoir-faire indispensable à l'existence d'une base continentale.

De février à octobre, les hivernants vivent en totale autarcie car la base est absolument inaccessible pendant l'hiver.



Fig.4. Le convoi de ravitaillement sur le plateau Antarctique entre DDU et Concordia. Indispensable pour assurer l'acheminement du matériel et de la nourriture, le raid demande un savoir-faire que l'IPEV maîtrise parfaitement.

Bien que cette station n'ait pas été créée pour l'astronomie, elle abrite depuis près de deux décennies des recherches pluridisciplinaires (glaciologie, physique de l'atmosphère, sismologie, biologie, télédétection) et le site s'est révélé particulièrement favorable à l'observation astronomique.

Cet avantage exceptionnel place la France en situation privilégiée pour être un fer de lance du développement de l'astronomie en Antarctique. Certes, les USA exploitent la station Amundsen-Scott au pôle Sud avec des moyens logistiques beaucoup plus importants, mais ce site n'est pas du tout favorable à l'observation astronomique dans les domaines visible et infrarouge.

D'autres pays sont sur les rangs, notamment la Chine au Dôme A (peut-être de qualité meilleure que le Dôme C) et le Japon au Dôme F. Ces deux pays ont des projets astronomiques significatifs, mais ne sont pas encore en mesure de réaliser des hivernages malgré leurs prévisions et les moyens importants qu'ils y ont consacrés.

L'extraordinaire qualité du site de Concordia

Il est probable que le site du Dôme C sur le plateau antarctique sera le site d'avenir de l'astronomie au sol du XXI^e siècle car il présente des conditions atmosphériques tout à fait extraordinaires, en particulier pour le domaine infrarouge thermique, au-delà de $2,5 \mu\text{m}$, et en submillimétrique vers $200 \mu\text{m}$, domaines spectraux difficilement accessibles hors de l'espace.

La caractérisation astronomique du site de Concordia a été menée pendant plus de dix ans par les équipes néo-zélandaises du laboratoire universitaire Lagrange de J. Vernin, E. Fossat, E. Aristidi..., qui ont démontré une propriété remarquable du site : en hiver, plus de 95 % de la turbulence est confinée dans les 30 premiers mètres au-dessus du sol, couche dénommée *ground layer*.

Au-dessus de cette couche turbulente, le seeing moyen est fantastique : des images avec une résolution de 0,3" (alors qu'elle est en général de 0,6" à 0,8" dans les meilleurs observatoires) seraient accessibles en quasi-permanence, proche des conditions hors atmosphère. Par comparaison, l'épaisseur de cette couche turbulente, celle qui dégrade la qualité des images, est de plusieurs centaines de mètres, voire d'un kilomètre, au-dessus des autres observatoires.

De plus, ce seeing de 0,3" est accessible au sol chaque jour entre 13 h et 18 h pendant l'été car la température devient homogène quand on s'élève au-dessus de la base (i.e. la tropopause descend jusqu'au sol). Or, comme ce sont les variations de températures qui produisent les turbulences, une température constante « fige » l'atmosphère et nous avons des images d'une qualité spectaculaire !

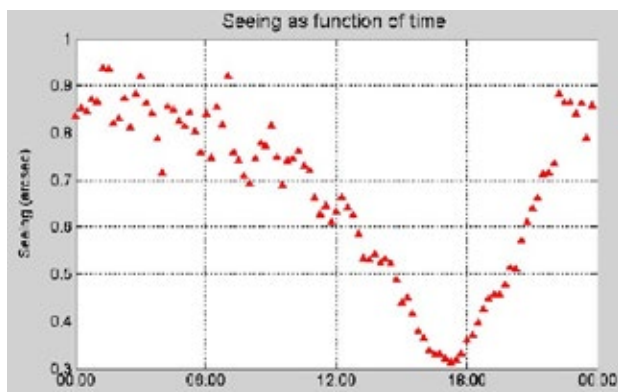


Fig.5. Variations moyenne du seeing sur 24 h en été mettant en évidence un phénomène spectaculaire et unique : chaque jour en fin d'après-midi, la température devient homogène au-dessus de la base rendant l'atmosphère parfaitement stable et les turbulences disparaissent. On atteint un seeing de 0,3", comparable à l'espace.

Et ce n'est pas la seule qualité de ce site :

- l'angle d'isoplanétisme¹ est deux à trois fois plus grand que dans tout autre site connu, ce qui est très favorable pour l'optique adaptative ;
- la vitesse du vent est très lente en moyenne

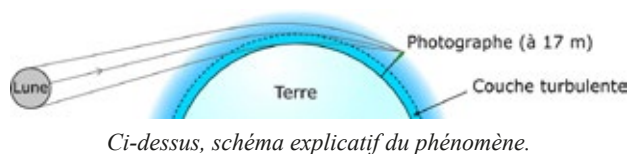
¹ L'angle d'isoplanétisme correspond à la distance angulaire maximale entre deux points sources affectés par la même turbulence. À l'intérieur de cette zone, la réponse de l'atmosphère est constante, la fonction d'étalement est identique.

(2,8 m/s, Aristidi et al. 2005), contrairement à la base US d'Amundsen-Scott où des vents catabatiques² dépassent 55 m/s ;

- la quantité de vapeur d'eau précipitable (precipitable water vapour ou PWV) est très faible : seulement 0,26 mm sur la période d'hiver de mars à septembre et 0,72 mm en été, en décembre. Concordia est un des sites les plus secs au monde.



Fig.6. Mise en évidence de la minceur de la couche turbulente « ground layer » sur ce lever de Lune en février 2008 au Dôme C : sur ce cliché, le bord inférieur de la Lune est perturbé alors que le bord supérieur est régulier.



Par conséquent :

- cela ouvre la fenêtre atmosphérique entre 200 μm et 350 μm . La très faible quantité d'absorbant (H_2O) contenue dans les basses couches de l'atmosphère permet d'accéder à ces fenêtres spectrales du domaine submillimétrique, alors qu'il faut monter à des altitudes bien plus élevées (> 5000 m) dans les sommets andins par exemple pour bénéficier de transmissions comparables ;
- les observations à 350 μm et 450 μm sont possibles en continu ;
- une faible PWV signifie une meilleure transmission aussi dans le proche et le moyen infrarouge et des

² Vents produits par des masses d'air froid, plus lourdes, qui dévalent les pentes.

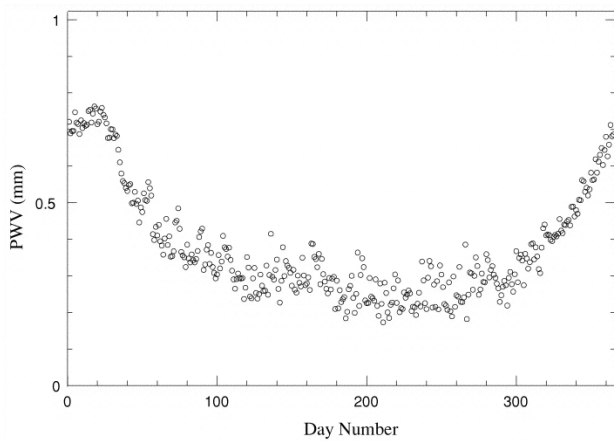


Fig.7. Variation de la quantité de vapeur d'eau précipitable (PWV) sur une année. Pendant l'hiver austral (jour 120 à 300), la moyenne de PWV est de 250 μm seulement ! (d'après Chamberlin, 2000).

fenêtres atmosphériques plus larges, donc des longueurs d'onde nouvelles, inaccessibles au sol ailleurs sur Terre ;

- du fait des températures très basses (entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ soit autour de 210 K), la brillance du ciel en infrarouge est diminuée d'un facteur 10 à 20 au-delà de $2,3\text{ }\mu\text{m}$ (du fait de la loi de Planck) ;
- la brillance du ciel en visible est également plus faible : le ciel est noir quand le Soleil est en dessous de -12° , ce qui correspond à plus de 2 500 heures noires par an. Le ciel est de qualité photométrique dans 80 à 85 % du temps pendant l'hiver.

Ces conditions atmosphériques exceptionnelles font que les astronomes français et italiens ont donc accès au meilleur site astronomique terrestre (si ce n'est le Dôme A, mais les Chinois n'ont pas encore réussi à le prouver) parce que l'atmosphère y est **plus stable** (la couche de turbulence y est beaucoup moins épaisse

qu'en aucun autre site), **plus transparente** (étendant l'infrarouge et ouvrant les ondes submillimétriques) et **moins émissive** (sensibilité accrue dans l'infrarouge). Ces trois facteurs conjugués font qu'un instrument de même taille peut être 10 à 20 fois plus performant (notamment en matière de sensibilité) s'il est installé au Dôme C plutôt que sur l'un des meilleurs sites conventionnels. Enfin, dans le domaine visible et proche infrarouge, les nuits polaires permettent des observations de très longue durée sans interruption jour-nuit et donc le suivi sans lacune temporelle d'objets variables dans le temps ou intermittents (astérosismologie, étoiles variables, transits exo-planétaires, phénomènes transitoires imprévisibles tels que supernovae, sources de rayons gamma, etc.).

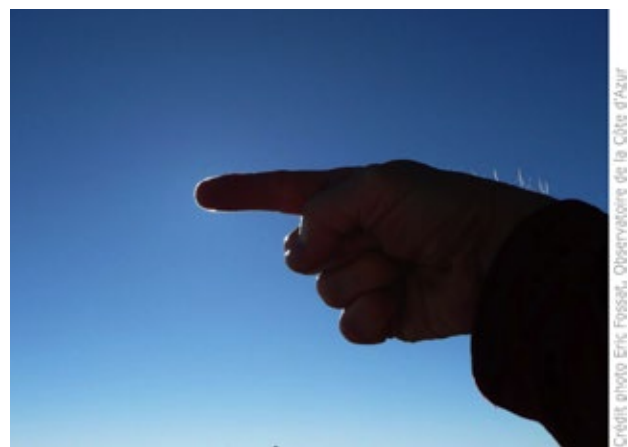


Fig.8. Pour résumer les qualités du ciel au Dôme C : le ciel est coronal, c'est-à-dire sans diffusion atmosphérique, il n'y a aucun halo blanchâtre autour du Soleil, masqué juste par l'index !

À suivre...

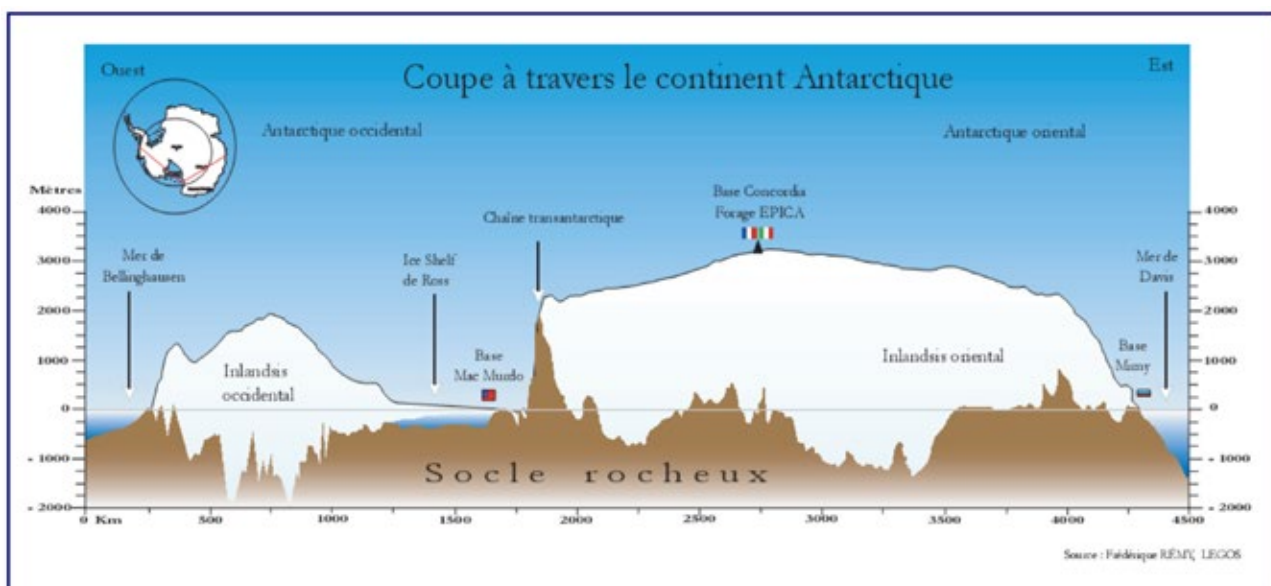


Fig.9. Coupe à travers le continent antarctique, à 98 % recouvert de glace. C'est le continent le plus froid.