



Le projet Beyond EPICA Antarctique

Frédéric Parrenin, Catherine Ritz

Institut des Géosciences de l'Environnement,
Grenoble.

Amaëlle Landais

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement,
Saclay.

Forer de la glace de plus d'1 000 000 d'années

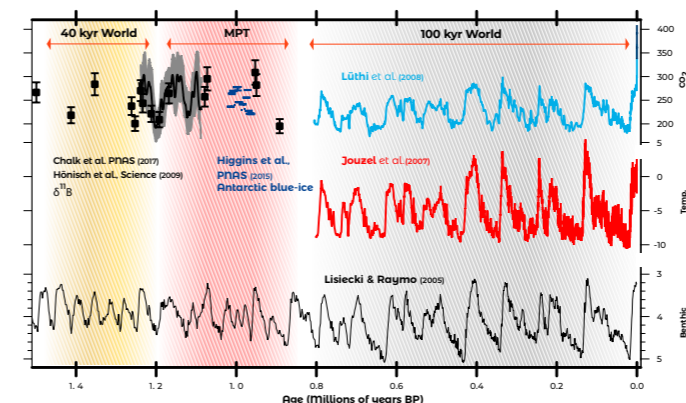
Comprendre les rouages
du changement climatique
nécessite de se tourner vers
le passé, vers les époques
où de grands changements
climatiques ont eu lieu.

Le Quaternaire, qui couvre les derniers 2.6 millions d'années, est une période particulièrement intéressante car la géographie des continents est la même qu'actuellement et les changements climatiques sont de ce fait plus faciles à interpréter. C'est donc une période clefs pour valider les modèles de climat. Le changement

climatique majeur le plus récent est la transition depuis le dernier maximum glaciaire, il y a 21 000 ans, à notre période interglaciaire actuelle, commencée il y a 10 000 ans. Le dernier maximum glaciaire était associé à un niveau des mers 120 m plus bas qu'à l'actuel, à des calottes de glace de plus de 3 km couvrant le nord de l'Amérique du Nord (calotte Laurentide) et de l'Eurasie (calotte Fennoscandienne) et à une température moyenne d'environ 4°C plus basse que l'actuelle, avec de grandes disparités régionales. Les enregistrements issus des sédiments marins nous montrent qu'au cours du Quaternaire, les oscillations entre périodes glaciaires et interglaciaires se sont succédées, avec une amplitude qui a augmenté au fil du temps, les périodes froides étant de plus en plus froides, sans doute liées à une extension des calottes de glace (figure 1).

La périodicité de ces oscillations a aussi augmenté de 40 000 ans à 100 000 ans entre deux périodes interglaciaires. Cependant, le forçage principal de cette variabilité aux longues échelles de temps, lié aux paramètres orbitaux de la Terre, ne permet pas encore d'expliquer cette transition vers ces cycles glaciaires-interglaciaires de plus grande durée. Le rôle de la variation de concentration des gaz à effet de serre sur le Quaternaire et de la dynamique des calottes de glace est encore débattu et doit donc être étudié de plus près.

forçage (...)
Un forçage climatique est un paramètre influençant le climat.



◆ Figure 1 : Etat des connaissances actuelles concernant l'évolution de la concentration atmosphérique du CO2 (haut), de la variation de la température antarctique (milieu) et du δ18O des foraminifères benthiques (bas, indicateur des variations du niveau des mers) sur 1,5 million d'années.
Figure issue du projet Beyond EPICA (GA n°815384).

GA
ou « Grant Agreement », c'est le numéro sous lequel est enregistré le projet à la commission européenne.

Les archives glaciaires nous renseignent sur des paramètres clés comme la concentration et l'origine des gaz à effet de serre, la température **Antarctique**, l'aridité des continents, la circulation atmosphérique, les éruptions volcaniques, l'activité solaire, etc... Actuellement, elles permettent seulement de remonter aux 800 000 dernières années - le record étant détenu par le forage européen EPICA sur la station franco-italienne Concordia (carotte EPICA **Dome C**). Cette période de temps est cependant trop courte pour étudier la longue période de temps pendant laquelle les longs cycles glaciaires – interglaciaires sont apparus, de 1.2 millions d'années à 600 000 ans, appelée Transition du Mi-Pléistocène (TMP). La communauté internationale des carottes de glace s'est donc fixée pour objectif de forer de la glace qui nous permette de reconstruire continûment l'histoire de la composition de l'atmosphère jusqu'à 1,5 million d'années dans le passé.

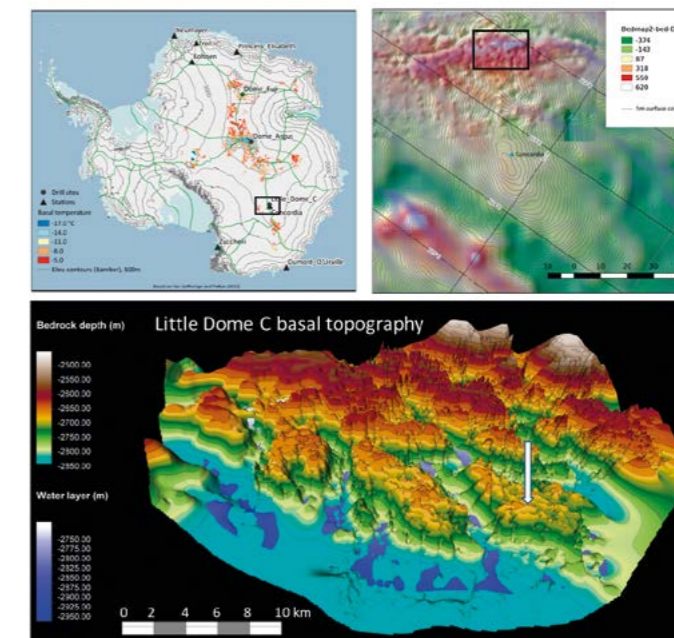


Figure 2

- ◆ Figure 2 : Localisation d'un site potentiel de glace ancienne à « Petit Dôme C ».
- En haut à gauche : Carte de l'Antarctique avec représentés en code couleur des sites où la glace basale n'atteint pas le point de fusion. Le cadre représente la région de Dôme C.
- En haut à droite : Carte de la région de Dôme C avec en code couleur le relief du socle sous glaciaire et en contours la topographie de surface. Le cadre représente la région de « Petit Dôme C », où un relief sous glaciaire crée un dôme secondaire.
- En bas : La région de « Petit Dôme C » avec le socle sous glaciaire en couleurs et en bleu foncé les lacs. Le site sélectionné est marqué par la flèche blanche verticale. Figure issue du projet Beyond EPICA (GA n°815384).

LOCALISATION d'un site potentiel

Tout d'abord, il convient de situer les paramètres généraux de la recherche de glace ancienne. On veut un endroit où l'accumulation annuelle de neige est la plus petite possible, pour couvrir la plus grande période temporelle possible. Cela élimine les calottes du Groenland et de l'Antarctique de l'Ouest et les régions côtières d'Antarctique de l'Est. On veut éviter un endroit où l'**advection** horizontale de glace est trop importante, ce qui serait responsable de perturbations dans les couches les plus profondes, et donc les plus anciennes, de glace. On veut donc se situer à proximité des dômes et lignes de partage en Antarctique l'Est (Figure 2). Concernant l'épaisseur de glace, la première idée qui vient à l'esprit est de forer dans un endroit où l'épaisseur est grande. Mais c'est négliger l'importance de la fusion basale, responsable de l'érosion des couches les plus anciennes. La glace étant un isolant et le socle sous-glaciaire émettant un flux de chaleur (le flux géothermique), plus l'épaisseur est importante, plus le risque de **fusion basale** est important. On cherche donc une épaisseur intermédiaire, pas trop petite pour garder une résolution temporelle acceptable mais pas trop grande non plus, sa valeur exacte dépendant de la valeur du flux géothermique local et de l'accumulation.

advection
mouvement.

fusion basale
La fusion basale est la hauteur de glace qui fond à la base de la calotte par unité de temps.

Localiser un site de glace ancienne en Antarctique n'est

pas une chose aisée, car les scientifiques ne disposent pas d'observations directes de l'âge de la **glace basale**. Certes, les observations par radar (aéroporté ou au sol) peuvent pénétrer à l'intérieur de la calotte polaire et donner une image des couches internes, appelées **isochrones (surface d'un âge donné)**. Mais ces couches ne sont pas a priori datées. Dans les régions où un forage profond existe déjà on peut suivre ces couches internes depuis le site de forage existant, où les couches sont datées grâce aux mesures effectuées sur la carotte jusqu'aux sites de forage potentiels. Mais une difficulté vient du fait que les radars actuels ne permettent en général pas de résoudre ces couches internes jusqu'au fond de la calotte, la zone basale restant une zone « aveugle ». D'un autre côté, les données radar permettent d'observer les lacs sous glaciaires, qui sont responsables d'horizons de réflexion importants et plats. L'épaisseur de glace à laquelle ces lacs apparaissent nous renseigne sur l'épaisseur critique, c'est-à-dire l'épaisseur au-delà de laquelle il y a de la fusion à l'interface glace-socle.

glace basale
Glace qui se trouve à la base de calotte polaire, au contact du continent qui se trouve sous la glace.

surface d'un âge donné
Définition...



La modélisation de la relation âge – profondeur et de l'écoulement n'est également pas une chose aisée, car un paramètre essentiel, à savoir le flux géothermique provenant du socle rocheux et qui est responsable de l'érosion des couches les plus anciennes, est très mal connu en Antarctique. Pour reconstruire l'âge de la glace basale sans forer cette glace, il faut donc toujours s'appuyer sur une combinaison modélisation-observation : des exercices de modélisation vont extrapoler les observations sur cette relation âge-profondeur obtenue par les couches internes qui ont pu être datées, dans la partie supérieure de la calotte.

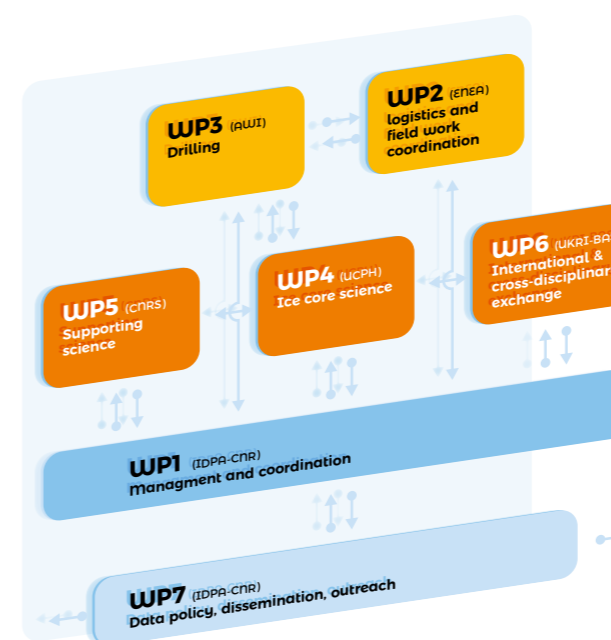
Les scientifiques européens se sont en premier lieu focalisés sur la région de Dôme C (Figure 2) en Antarctique de l'Est. En effet, le forage EPICA situé à cet endroit détient jusqu'à présent le record d'âge, avec 800 000 ans. Ce site avait été choisi parce qu'il se situait à un dôme, mais sans plus d'investigations sur la localisation de la glace ancienne. Il est donc possible que de la glace encore plus ancienne se trouve non loin de Dôme C. De plus, le site a connu de nombreuses campagnes d'observations, ce qui rend les recherches de glace ancienne plus aisées. Enfin, la France et l'Italie possèdent la base logistique Concordia, rendant beaucoup plus aisée une possible nouvelle opération de forage profond.

Ces recherches ont été effectuées dans le cadre d'un premier projet Européen appelé Beyond EPICA Oldest Ice Consolidating and Support Action (BE-OI CSA). L'Institut polaire français et le CNRS était déjà partenaires de ce projet tout comme l'ENEA en Italie. Les recherches ont pointé vers le site de « Petit Dôme C », un dôme secondaire peu prononcé se situant 40 km au Sud-Ouest de Dôme C, où la surface de la glace est seulement 2 m en dessous de celle de Dôme C. Ce dôme secondaire est vraisemblablement dû à un relief sous glaciaire. Les échos radar ont montré que le relief sous glaciaire se trouvait quasiment dépourvu de lacs. Différents efforts de modélisation ont également montré que l'on pouvait espérer de la glace de plus de 1.5 million d'années dans cette région. Un site a donc été choisi (Figure 2) à un endroit où le socle sous glaciaire est relativement plat, en se situant suffisamment profond tout en étant assez loin des lacs sous-glaciaires pour éviter tout risque de fusion, dans le passé comme à l'actuel.

LE PROJET DE FORAGE EUROPÉEN Beyond EPICA

Une fois le site sélectionné, les scientifiques européens, la plupart issu du projet EPICA, ont monté un projet pour aller forer cette glace ancienne à « Petit Dôme C » et effectuer les premières analyses. Le projet a été soumis à l'automne 2018 à l'appel d'offre européen « H2020 Research and innovative program » et accepté au printemps 2019 avec l'accord de financement n°815384. Le projet a démarré le 1^{er} juin 2019 pour une durée de 6 ans. Le consortium est formé d'institutions scientifiques de 10 pays : Italie, Allemagne, Royaume-Uni, France, Hollande, Norvège, Suède, Suisse, Danemark et Belgique.

Trois laboratoires de recherches français sont associés, l'Institut des géosciences pour l'environnement, IGE, le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, LSCE et le Centre européen de recherche et d'enseignement en géosciences de l'environnement, CEREGE. Ce projet est également composé de deux institutions logistiques : l'ENEA pour l'Italie et l'Institut polaire français pour la France. Le budget européen du projet est de 11 millions d'euros, auxquelles viennent s'ajouter des contributions nationales. Le projet est constitué de 7 groupes de travail « Work Packages » (WP) (Figure 3). Le responsable du projet européen est Carlo Barbante (Consiglio Nazionale delle Ricerche, CNR, Italie) alors que le responsable français est Frédéric Parrenin. Frédéric Parrenin est également responsable du WP5 (science support), alors que Jérôme Chappellaz est co-responsable du WP2 (logistique), qu'Olivier Alemany est co-responsable du WP3 (forage) et qu'Amaëlle Landais est co-responsable du WP4 (science sur la carotte). À noter également la forte implication de l'Institut polaire dans le WP2 (logistique). Le groupe de foreurs français (plateforme Centre de carottage et de forage national, C2FN, glaciologie) a aussi un rôle clé dans ce projet grâce à son expertise unique et sa bonne connaissance du terrain et de ses contraintes.



◆ Figure 3 : Structure des Work-Packages du projet. Figure issue du projet Beyond EPICA (GA n°815384).

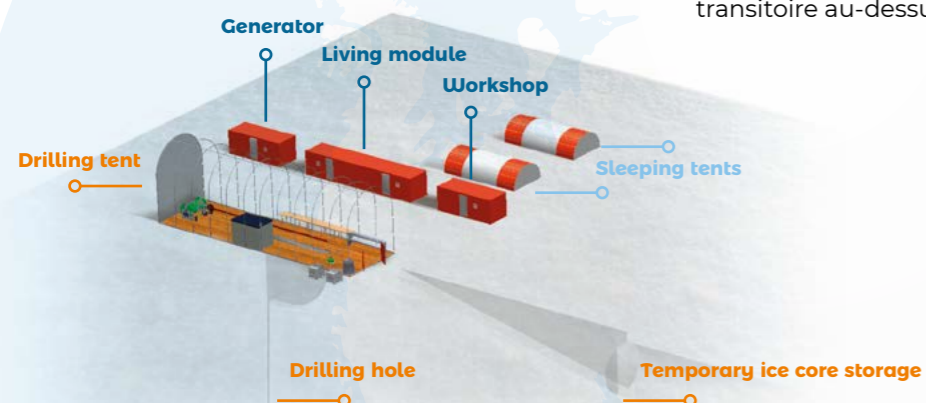
Logistique et le camp à Petit Dôme C

La durée de 6 ans est justifiée par les efforts logistiques extraordinaires qui doivent être accomplis pour installer un camp dans un environnement hostile et éloigné comme le plateau antarctique (température moyenne annuelle -54°C) et pour permettre d'effectuer les premières analyses pour en tirer les précieux enregistrements climatiques qui constituent le but du projet. Les conditions environnementales sur le terrain vont limiter les opérations de forage à environ 60-70 jours par an durant l'été austral. De plus, tout le matériel qui sera utilisé au camp de Petit Dôme C doit être transporté au moins un an en avance sur les stations côtières de Dumont d'Urville ou Mario Zucchelli et ensuite transporté par avions ou véhicules terrestres au lieu de forage. Tout le camp nécessitera un démontage et un nettoyage après la fin des opérations de forage, afin de se conformer aux règles du traité antarctique. Le site final sera sélectionné à la fin de l'année 2019 en se basant sur les dernières mesures de radar de surface effectuées au début de cette saison de terrain.

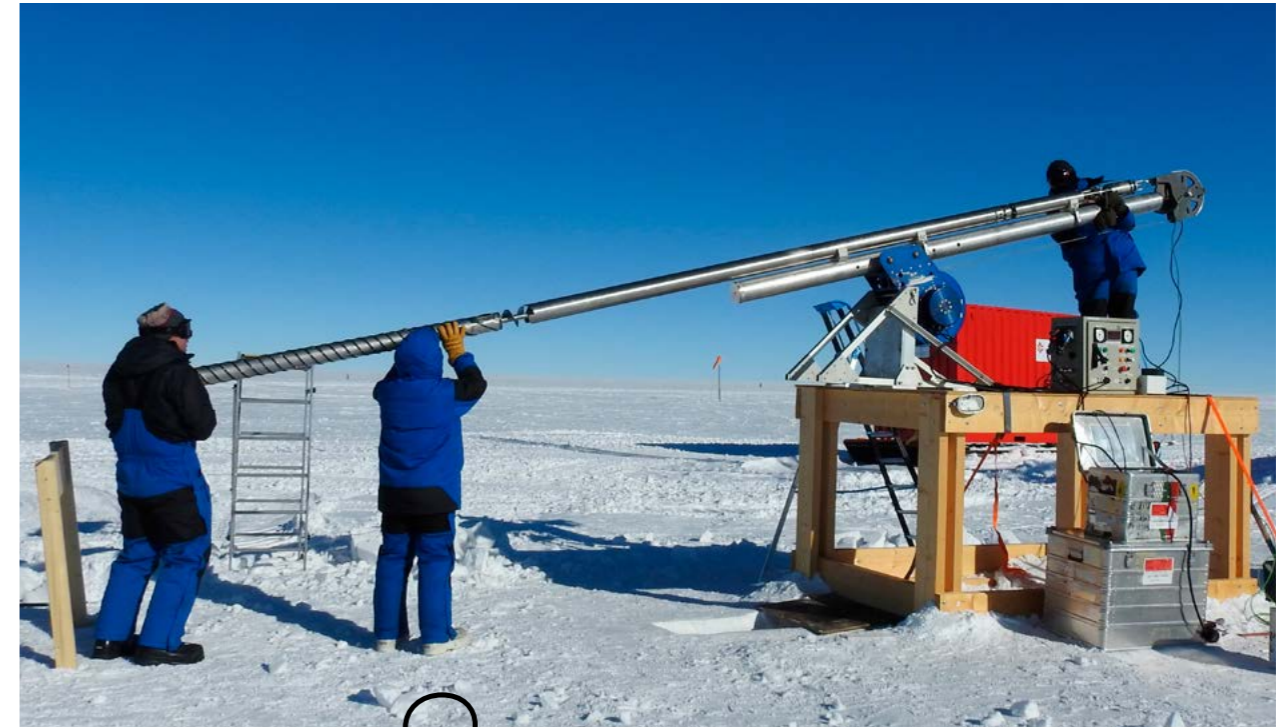
Pour accomplir une telle opération de forage dans l'un des endroits les plus reculés de notre planète, la chaîne logistique à partir de la côte doit être établie. Elle comprend un acheminement par traverse de tout le matériel, du fuel, du fluide de forage, etc. au site de forage, et un acheminement du personnel scientifique

et technique par avion à la station Concordia et ensuite par transport de surface au camp de Petit Dôme C. Un camp de forage mobile sera établi à ce site, et sera capable de faire vivre 12-14 personnes durant 2 mois lors des opérations d'été austral.

Un avantage majeur de Beyond EPICA sera qu'il bénéficiera du support logistique du PNRA (Italie) et de l'Institut polaire (France) dans le cadre des opérations régulières à la station Concordia. Cette station servira de point de jonction central pour les opérations de forage **profonds** dans le camp avancé de Petit Dôme C, et fera tourner les opérations scientifiques sur la glace (découpe, premières mesures et stockage). La capacité à supporter une telle opération de forage à Concordia a déjà été démontrée durant le projet EPICA. Ici la difficulté supplémentaire réside dans le besoin de supporter une opération dans un camp léger situé à 40 km de la station. Les transports par avions et bateaux seront fournis au travers des programmes italiens et français afin d'optimiser le retour des carottes de glace en Europe et de limiter la durée du transport transitoire au-dessus de -50°C .



◆ Figure 4 : Le camp prévu à Petit Dôme C. Figure issue du projet Beyond EPICA (GA n°815384).



Forage & opérations scientifiques

Le forage jusqu'au socle (implémenté dans le WP3) d'une carotte d'environ 2800 m, en incluant le forage et le tubage de la section de névé (les 100 premiers mètres de glace) devrait prendre 4 saisons d'été, en excluant la mise en place du camp et sa fermeture. Dans la dernière saison de forage, un forage répliqué des 300 m les plus profonds sera effectué pour obtenir plus de glace de cette période temporelle cruciale. Finalement, si possible dans le temps du projet Beyond EPICA et si l'absence de fonte basale est confirmée, nous tenterons d'échantillonner le socle/sédiment sous-glaciaire. Comme ce matériel ne sera disponible qu'à la toute fin du projet, l'analyse de ces échantillons ne sera pas effectuée dans le cadre du projet mais dans le cadre d'un projet ultérieur. Après la fin du forage, le camp sera entièrement démonté mais un accès au trou de forage sera maintenu afin d'effectuer d'autres campagnes de mesures dans les années suivantes.

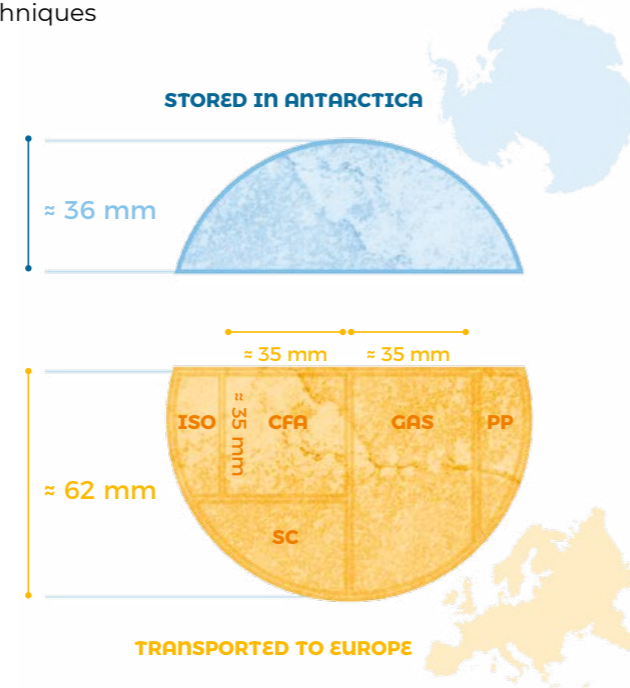


L'équipement déployé consistera en une version mise à jour de la conception qui a permis le succès des deux forages EPICA et des 3 forages au Groenland. Un carottier danois, qui est utilisé pour le forage profond à EGRIP (Groenland), sera amené à Petit Dôme C en 2020 en secours. Cela sécurisera la continuité des opérations de forage en cas de problème sur le premier carottier. Une équipe multinationale de personnel de forage a été entraînée durant les projets récents au Groenland et en Antarctique. Elle se réunit régulièrement pour échanger sur les points techniques à considérer pour ce nouveau défi technique.

Les carottes seront enregistrées et emballées en Antarctique. Cette partie du projet assurera une assignation continue et non ambiguë de la profondeur de chaque tronçon de carotte et nous permettra d'obtenir une première information stratigraphique le long de la carotte, qui sera ensuite datée, c'est-à-dire que nous travaillerons à l'établissement de la relation la plus précise possible entre profondeur et âge le long de la carotte. Le travail sur le terrain inclura aussi la mesure non-destructive du profil diélectrique ainsi qu'un scan visuel digitalisé. Ces mesures seront cruciales pour synchroniser la nouvelle carotte avec celle existante de Dôme C sur les 800 000 dernières années.

La partie principale de la carotte sera coupée en sections d'un mètre et emballées dans des boîtes isolantes. Pour la glace plus jeune que 700 000 ans, une section de la carotte sera transportée en Europe de telle façon que des mesures à haute résolution ou de nouveaux traceurs pas encore explorés sur la glace d'EPICA Dôme C soient effectuées par les différents partenaires. Le reste de la section sera stocké à Dôme C pour des analyses futures. La glace plus vieille que 700 000 ans sera transportée en Europe en utilisant un nouveau système réfrigérant à -50°C pour assurer la meilleure conservation possible du signal gaz. Une archive (environ 30%) de chaque mètre de glace plus vieille que 700 000 ans restera en Antarctique, sur la base Concordia, comme sauvegarde, dans un local de stockage qui sera construit sous la surface afin d'y maintenir une température de -50°C.

◆ Figure 5 : Plan de découpe prévu pour la carotte Beyond EPICA. Figure issue du projet Beyond EPICA (GA n°815384).



Un plan de découpe provisoire pour la carotte est donné Figure 5. Une section sera réservée à l'analyse en flux continu (Continuous Flow Analysis, CFA), une section sera consacrée à l'analyse des gaz, une section sera réservée aux propriétés physiques, une section à l'isotope et une dernière section sera attribuée par le Steering Committee du projet.

Remerciements :

Ce projet a récemment reçu un financement de l'union Européenne sous le programme **Horizon 2020 recherche et innovation** avec l'accord de financement n° 815384.

