

Prospective “Chantier Arctique”

Préambule (sera enlevé dans le document final)

Ce document propose un cadre de réflexion pour l'élaboration du volet « Chantier Arctique » du rapport de prospective OA. Il a été écrit à partir des contributions de trois groupes de travail (« Atmosphère », « Océan-Glaces de mer » et « Glaces et hydrologie continentale ») réunis lors du colloque « Chantier Arctique » qui s'est tenu les 6-7 juillet 2010 à Paris. Les comptes-rendus des trois groupes de travail sont aussi accessibles sur le site du Chantier Arctique.

Le présent document est une ébauche **destinée à être complétée / corrigée** par l'ensemble de la communauté. Nous avons essayé d'y faire émerger les questions scientifiques majeures qui sont ressorties des discussions du colloque de juillet mais cette liste n'est pas exhaustive. Nous vous invitons à contribuer à l'amélioration de ce document en apportant vos remarques, corrections et additions. Notez que votre réflexion doit faire ressortir des enjeux spécifiques au Chantier Arctique tout en s'appuyant sur la réflexion menée par ailleurs sur les « enjeux scientifiques majeurs » tels que définis dans la prospective. Lors de la récente réunion de la CSOA des 5 et 6 octobre, il a été décidé que le présent travail de prospective devrait se focaliser sur la contribution de la communauté OA. Les interactions avec les communautés SIC, ST et INEE sont à identifier mais la réflexion sur leur pertinence et leur mise en œuvre ne sera envisagée que dans un deuxième temps, après élargissement aux communautés concernées.

Une première version du document de l'ordre de 5 pages devra être finalisée pour fin novembre. Puis un étape de consolidation (décembre-janvier) permettra de recueillir les réactions de notre communauté. Un enjeu important de cette prospective sera de dégager les priorités en termes de thématiques scientifiques, mais aussi de moyens (systèmes observations, technologiques innovantes, flotte, avions, ballons, instrumentation nationale et ressources humaines). Ces priorités seront discutées lors du colloque Prospective organisé début mars 2011.

Positionnement du problème scientifique : spécificité de l'Arctique et argumentaire pour une approche intégrée.

En comparaison du reste de la planète, l'Arctique est le siège de changements climatiques particulièrement marqués qui ont été clairement mis en évidence sur les dernières décennies et sont encore à l'œuvre actuellement. Ces changements se manifestent de façon aiguë dans la diminution progressive de la banquise estivale qui, selon les prévisions des modèles de climat, devraient conduire à sa disparition quasi totale à une échéance de quelques décennies, voire moins si l'on anticipe des erreurs de prévision inhérente à ces modèles (Rapport AR5 du GIEC, 2007). La diminution des glaces ainsi que le recul du pergélisol sont susceptibles de conduire le système climatique Arctique vers des « points de non retour » qui pourraient avoir des impacts profonds sur le climat global au travers de rétroactions physiques et biogéochimiques mettant en jeu tous les compartiments du système climatique.

Ces spécificités de l'Arctique (sensibilité particulière au changement climatique et lien avec les échelles globales du système climatique) justifient tout à la fois l'intérêt qu'il suscite dans la communauté scientifique et la complexité des problèmes à traiter. Peu observé de manière globale jusque récemment (les réseaux de mesure n'ont pris un réel essor que depuis les années 80-90 avec l'avènement des satellites, le maintien de stations autonomes fixes ou dérivant sur la glace et des programmes d'observations in-situ d'envergure), il s'agit maintenant d'étudier un système évoluant dans un contexte de forte tendance mais dont on connaît mal l'état non perturbé. D'un autre côté, les liens très forts de l'Arctique avec le climat global, via notamment la rétroaction de l'albédo sur le bilan radiatif, l'élévation du

niveau des mers (fonte de la calotte Groenlandaise), la circulation océanique globale (via notamment sa composante thermohaline sensible à l'apport d'eau douce en provenance de l'océan Arctique ou des calottes glaciaires), la composition de l'atmosphère planétaire (via notamment les transports de polluants, la modulation des sources/puits de gaz à effets de serre) ou la circulation atmosphérique (via la modulation des échanges océan-atmosphère par les glaces de mer) rendent difficile une approche exclusivement « régionale » du problème.

Au-delà de ces spécificités, se fait jour en Arctique la nécessité d'une approche intégrée de questions scientifiques majeures, ajoutant à la complexité du problème. En Arctique cohabitent un milieu océanique contraint par les terres (notamment par le cycle hydrologique continental) et des surfaces continentales pénétrant dans l'océan au travers de larges marges particulièrement sensibles aux changements océaniques (instabilité des hydrates de méthane en conditions de réchauffement, dégel du pergélisol, élévation du niveau des mers). Ces différents compartiments interagissent étroitement avec l'atmosphère, les grands cycles biogéochimiques et la biosphère. Des changements majeurs des cycles biogéochimiques et de la biodiversité terrestre, marine et des lacs et rivières sont attendus sous l'effet de perturbations affectant par exemple la déposition de l'azote ou la disponibilité de la lumière sous la banquise. Ces changements ont un impact potentiel sur le cycle du carbone et de l'azote qui implique des rétroactions sur le climat global. A la modification potentielle des émissions de ces gaz au niveau des sols ou des fonds océaniques, s'ajoutent des perturbations de leur cycle en lien avec l'activité biologique ou les processus physiques et biogéochimiques atmosphériques et océaniques. Il est difficile de dissocier ces processus les uns des autres et il est donc urgent de comprendre les interactions entre les différents compartiments si l'on veut être en mesure de prévoir l'évolution du milieu arctique et ses impacts majeurs tels les événements extrêmes (de type tsunamis ou glissements de terrain) ou l'évolution de la composition atmosphérique en GES.

Répondre à ces défis implique de mieux comprendre les processus qui contrôlent l'évolution de l'Arctique aux échelles du mois à la décennie. Une difficulté supplémentaire est certainement que cette évolution implique à la fois une variabilité naturelle et une réponse au forçage radiatif atmosphérique d'origine anthropique dans l'atmosphère (accroissement de la concentration en GES ou d'autres constituants tels que les aérosols et l'ozone). L'impact respectif des contributions naturelle et anthropique reste à élucider. Les archives glaciaires (Groenland) ou marines, y compris celles issues de la banquise, sont aussi une opportunité d'explorer la variabilité passée : événements rapides, dernier interglaciaire où prévalait un Arctique « chaud ».

A quelles questions scientifiques la communauté française est-elle à même de répondre (points forts anticipés pour le futur)?

Sont listés ici les axes de recherche en cours qui sont ressortis des discussions des groupes de travail. Les orientations majeures pour les années à venir devraient émerger de ces axes qui sont distingués ici suivant trois approches :

- Compréhension des processus
- Effet du changement d'origine anthropique
- Approches intégrées de problématiques couplées

En parallèle, deux aspects devront faire l'objet d'une attention particulière :

- Le développement de stratégies d'observations intégrées
- L'amélioration de la représentation du système climatique arctique dans les modèles

1. Compréhension des processus

1.1 Cycle de l'eau

Dans le cycle de l'eau on distingue trois parties évidemment en fort lien : l'atmosphère, la neige, l'hydrologie continentale (eau liquide, incluant les glaces saisonnières).

1.1.1 Cycle de l'eau dans l'atmosphère :

- Caractériser les variations grande échelle des *bilans d'eau* de l'atmosphère arctique et *identifier les contributions* respectives de l'évapo-transpiration, de la convection et du transport
- Comprendre la formation des *nuages polaires* (processus, durée de vie) et leur contribution au bilan radiatif

1.1.2 Neige

- Comprendre les processus physiques et chimiques (isolation thermique, albédo et bilan radiatif, contrôle de la stabilité de la couche limite atmosphérique, rôle du carbone suie et autres absorbants sur l'albédo) aux *interfaces neige-sol et neige-atmosphère*
- Identifier les *interactions neige-végétation* et leur impact sur la répartition spatiale de la neige à petite échelle
- Comprendre le *transport* de la neige et notamment le rôle du vent
- Evaluer l'impact de la neige sur les *ressources en eau*
- Evaluer l'impact de la neige sur la *biologie et les écosystèmes*

1.1.3 Hydrologie continentale : lacs, rivières, zones humides à saturées, pergélisol

Enjeux :

- Comprendre les *échanges entre les différents compartiments* de l'eau : neige, pluies, rivières et retenue/redistribution dans les lacs, marécages, zones humides (isotopie stable)
- Comprendre la variabilité pour le *pergélisol* et processus d'activation du *thermokarst*
- Etudier la *dynamique des rivières englacées*.

1.2 Atmosphère

1.2.1 Dynamique et chimie de la stratosphère

- Comprendre la variabilité saisonnière et interannuelle de la *circulation stratosphérique de grande échelle* et son impact sur la troposphère.
- Comprendre les mécanismes de *mélange et de transport méridien*
- Documenter et comprendre les *variations de la température stratosphérique*
- Etudier les *couplages avec l'activité solaire* (UV, protons) et le *champ magnétique terrestre*
- Comprendre la *formation des nuages polaires stratosphériques*
- Documenter la variabilité de la *composition de la stratosphère*, notamment l'ozone, les composés chlorés et bromés et les particules volcaniques
- Comprendre la *chimie hétérogène* en milieu froid et son impact sur la composition chimique de la stratosphère et notamment l'ozone.

1.2.2 Dynamique troposphérique

- Etudier les mécanismes *de formation des « polars lows »* et leur lien avec la circulation de grande échelle
- Comprendre l'origine de la recrudescence de *tempêtes et d'événements sévères*

1.2.3 Chimie troposphérique

- Déterminer les *sources locales et globales de GHG et des contaminants et des émissions en particules* (feux, volcanisme, industrie) et leur *devenir* (transport, déposition, transformation).
- Identifier *l'origine des espèces* ayant un impact direct et indirect sur la composition de la troposphère et le bilan radiatif et thermique, et notamment séparer la *part anthropique de la part naturelle*

1.3 Dynamique des calottes et glaciers

- Identifier les processus d'*interaction océan-glace* ayant un impact sur les glaciers émissaires
- Documenter *l'hydrologie sous-glaciaire* et l'impact du *flux géothermique* sur la dynamique des calottes et glaciers
- Evaluer *l'impact des aérosols* sur l'évolution des calottes et glaciers
- Quantifier *l'impact de la fonte des calottes/glaciers sur l'océan* : élévation du niveau des mers, modification de la stratification par apport d'eau douce

1.4 Océan

1.4.1 Rôle des processus physiques dans les changements récents

- Comprendre les processus contrôlant la *physique de la couche de surface* en conditions englacées : pénétration du rayonnement solaire, mélange vertical, flux océan-glace-atmosphère et son impact sur le stockage de chaleur
- Documenter le processus de *formation d'eau dense* en océan profond et sur les plates-formes continentales en lien avec le forçage atmosphérique et les conditions d'englacement. Identifier les *mécanismes d'export* en lien avec la topographie (cascades, overflows)
- Evaluer l'impact de la *petite échelle et de la mésoéchelle* sur la circulation océanique et la *structure de la halocline* : transport par les courants de bord, tourbillons, mélange
- Documenter *l'origine et les temps de résidence* des masses d'eau océaniques.
- Identifier les mécanismes contrôlant le *bilan d'eau douce* de l'Arctique et *l'export d'eau douce* vers la circulation globale.

1.4.2 Processus biogéochimiques et leur couplage avec la dynamique, biodiversité, cycle du carbone

- Documenter la *production primaire, l'activité bactérienne* et la *production secondaire* en milieu polaire. Comprendre les *interactions avec le milieu physique* : ruissellement, lumière
- Documenter les *flux verticaux de matière organique* en lien avec le mélange vertical et leur impact sur les apports de nutriments vers la surface
- Documenter *l'activité benthique* : production biologique et diagénèse
- Identifier les processus biogéochimiques et dynamiques contrôlant la *biodiversité* et les implications pour *l'écologie littorale*

1.4.3 Marges continentales

- Documenter les *échanges de carbone côte-large* et leur lien avec l'évolution du pergélisol
- Evaluer la contribution *des hydrates de gaz* (méthane) au dégazage vers l'atmosphère.
- Comprendre les processus aux *interfaces océan-sédiments* ainsi que les *échanges marges-océan profond*

1.5 Glaces de mer

1.5.1 *Etudes de processus : observation / paramétrisation / modélisation*

- Comprendre les *processus thermodynamiques* contrôlant le bilan de masse des glaces de mer, leur structure thermique et haline et leur impact sur les échanges océan-glace-atmosphère.
- Améliorer notre connaissance de *l'épaisseur de la banquise* dans différents types de glace (physique de la mesure, calibration par mesures in-situ dans différents types de glace), et de sa structure (crêtes de pression)
- Comprendre la *dynamique haute fréquence du système couplé océan-glace* : impact de la rhéologie sur les oscillations de marée / inertielles, impact des vagues sur la structure de la banquise
- Développer de *nouvelles rhéologies* pour les glaces de mer à partir d'observations et améliorer leur prise en compte dans les modèles.
- *Valider les modèles climatiques de glace de mer* au regard d'observations dédiées : épaisseur, taux de déformation, contraintes
- Développer *l'assimilation des observations* (micro-ondes/diffusiomètre) dans les modèles de glace de mer
- Evaluer la *production primaire* dans les glaces

1.6 Variabilité

1.6.1 *Comprendre les modes de variabilité atmosphériques et leurs liens avec l'océan et les glaces de mer*

- Evaluer *l'impact des rétroactions océan-glace-atmosphère sur la variabilité atmosphérique*
- Comprendre la structure spatiale et saisonnière de la *variabilité de la température de l'air* en Arctique

1.6.2 *Mécanismes de variabilité océan-glace aux différentes échelles de temps (mensuelles à multi décennales)*

- Déterminer l'origine de la *variabilité océanique décennale à multi-décennale* en Arctique
- Déterminer les causes de *l'évolution du réservoir d'eau douce* en Arctique en lien avec les échanges vers le Pacifique et l'Atlantique, le ruissellement et les apports atmosphériques
- Comprendre et documenter la variabilité du *cycle du carbone*
- *Suivre l'évolution de la banquise* par une approche d'observations conjointes spatiales et in situ : épaisseur, concentration, âge, dérive, déformation

1.6.3 *Variabilité passée*

- Développer et calibration de *nouveaux proxies spécifiques* des régions polaires (isotopes, glaces de mer,...)
- Exploiter les *archives glaciaires et sédimentaires* pour documenter et comprendre la variabilité passée Arctique, documenter la variabilité du climat actuel et passé du *Groenland*

2. Climat global et changement anthropique

2.1 Impact des émissions anthropisées sur le climat de l'Arctique

- Comprendre et quantifier les *incertitudes dans les effets du forçage radiatif* d'origine naturelle et anthropique
- Identifier et quantifier les *effets des polluants et aérosols de faible durée de vie*
- Documenter et comprendre *l'anthropisation des cycles naturels* comme ceux associés au cycle de l'eau et à la formation nuageuse et des cycles biogéochimiques (CH₄, CO₂, Halogénés,...)
- Evaluer l'impact des émissions anthropisées sur les *écosystèmes sub-Arctiques* (forêt, neige, taux de mercure,...)

2.2 Influence de l'Arctique sur l'évolution du climat global

2.2.1 *Atmosphère : Quantifier les impacts du changement en Arctique sur le climat global aux échelles du mois à la décennie :*

- Emissions accrues de *méthane* en lien avec la fonte des glaces
- Modification de la *couverture nuageuse et de la stratosphère* en lien avec l'augmentation du CO₂
- *Transport à longue distance* des émissions spécifiques arctiques et subarctiques et impact sur la composition atmosphérique et le rayonnement au-dessus de l'Europe

2.2.2 *Océan-glaces de mer : Evaluer l'impact du changement en Arctique sur la circulation de retournement méridienne Atlantique et l'impact en retour de cette dernière sur l'Arctique*

- Déterminer l'impact des sources d'eau douce arctiques sur la convection océanique et la *circulation méridienne de retournement* dans les modèles et les observations
- Etudier le lien entre la *variabilité Atlantique* (oscillation multi-décennale Atlantique) et la variabilité Arctique

2.2.3 *Système couplé océan-atmosphère-surfaces continentales : Evaluer le changement climatique en Arctique dans les modèles de climat:*

- Identification des *rétroactions spécifiques* à l'Arctique (albédo, nuages) et leur impact sur l'évolution du climat global

2.2.4 *Climat du Groenland et climat global*

3. Approches intégrées de problématiques couplées

3.1 Interfaces mobilisant les communautés océan-atmosphère-cryosphère et hydrologie terrestre au sein de OA

- Flux air-mer (glace) et leur évolution dans le cadre du changement climatique
- Ruissellement et son impact sur le bilan en eau douce de l'océan Arctique
- Impact de l'océan sur le devenir des calottes
- Rôle de la couche limite pour les flux et interactions atmosphère – surface (océan, glace de mer, continent)

3.2 Interfaces avec SIC et ST

- Erosion du permafrost
- Devenir des hydrates de méthane en lien avec le réchauffement des eaux en Arctique

- Observations eau liquide (lacs, rivières, zones humides)

3.3 Interfaces avec INEE

- devenir de la biodiversité en lien avec l'évolution du milieu physique
- écosystèmes littoraux en lien avec l'évolution du milieu physique
- interactions neige-biologie (microbiologie et végétation)
- contamination des écosystèmes (p.ex. mercure, POPs) et impact sur les ressources en nourriture et la santé humaine
- processus biogéochimiques en lien avec l'évolution du pergélisol. La communauté nous semble à renforcer en France dans ce domaine.
- Impact éventuel de la diminution d'ozone et de l'augmentation du rayonnement UV sur la faune et la flore
- Impact du changement climatique dans le secteur socio-économique : pêche, exploitation, transport, protections des animaux, tourisme
- Interactions microbiologie dans les sédiments marins et ventilation du méthane

De quels moyens la communauté scientifique française a-t-elle besoin pour mener à bien ces objectifs ?

Comme indiqué dans le préambule des priorités pour les moyens peuvent être indiqué ici. Les demandes pour les moyens spécifiques dans la prospective OA (systèmes observations, technologiques innovantes, flotte, avions, ballons et instrumentation nationale) feront l'objet d'une réflexion coordonnée avec les groupes de travail concernés.

4.1 Moyens d'observation : quels types d'observations, quelles plateformes ?

4.1.1 : Quelles observations sont nécessaires ?

- Maintien des campagnes intensives in situ (sur sol, ballon, avions, ...) pour la composition (ozone, espèces réactives, aérosol, nuages polaires stratosphériques, ...) et la dynamique atmosphérique (paramètres thermodynamiques, ...)
- Développement d'approches intégrées (atmosphère, océan, cryosphère, continent) campagnes in situ - suivi temporel de type observatoire, incluant les données satellites (GES, aérosols, ...)
- Télédétection : validation de nouveaux capteurs (CRYOSAT, SMOS, ...), évaluation de la continuité temporelle entre les instruments successivement mis en orbite, développement d'algorithme
- Nouveau type de mesure : isotope des espèces d'intérêt atmosphérique, halogènes, ...
- Observations eau liquide avec nouveaux systèmes d'observation : SMOS, GRACE, CRYOSAT, COREH2O

4.1.2 Quelles plates-formes sont à maintenir, renforcer ou développer ?

- Nécessité de systèmes observations dédiés pour le monitoring du système couplé océan-glace-atmosphère
- Développement d'une instrumentation autonome (profileurs, équipements ancrés sur la glace, ...)
- Accès à des navires scientifiques de type polaire
- Besoin de pérenniser les dispositifs avion et de disposer d'avions capables de voler au-delà de 75°N
- Envisager l'utilisation de drones (particulièrement au Canada et en Sibérie où se produisent les feux de forêt et la réduction du permafrost)

- Maintenir et développement de réseaux sol européens et de mesures depuis l'espace

4.2 Maintien d'observatoires

- Le système des observatoires (SOERE) est un élément fort à maintenir et développer.
- Réseau SAOZ-NDACC, réseau ICOS à étendre
- Maintenir la présence française au Svalbard.

4.3 Modèles : développement et validation

4.3.1 Incorporation de processus spécifiques à l'Arctique dans les modèles :

- Représentation sous maille des nuages polaires stratosphériques
- Modélisation de la neige (régimes polaires et sub-polaires) : processus physiques et chimiques, interaction avec végétation
- Modélisation pergélisol : processus biogéochimiques et rétroactions sur climat global
- Hydrologie polaire et sub-polaire à développer (avec compétences existantes)
- Intégration des processus liés aux particules solaires (extension verticale des modèles de Chimie-Climat)
- Modélisation des isotopes stables de l'eau et assimilation des données
- Amélioration de la représentation de la déformation dans les modèles de glace de mer
- Amélioration du couplage dynamique et thermodynamique océan-glace
- Développement de modèles océaniques haute résolution en Arctique. Approche régionale couplée océan-atmosphère

4.3.2 Validation des modèles en Arctique

- Perfectionnement des modèles de Chimie-Climat dans le cadre des programmes internationaux d'intercomparaison (CCMVal)
- Validation des modèles de glace de mer sur l'évolution récente du couvert de glace : étendue, épaisseur et dérive
- Approche de modélisation numérique (LMDz-INCA, LMDZ-iso, Chimère-Polaire, Polar-WRF, Orchidée-Arctique) pour étudier l'impact des émissions anthropisées sur le climat de l'Arctique dans laquelle il faudra être capable de tester plusieurs scénarii
- Modélisation de transport à longue distance à l'Europe (Polar-WRF, DESCAM, mimosa)

4.4 Ressources humaines

Comme indiqué dans le préambule des priorités pour les positions de chercheurs et ITA peuvent être indiquées ici.

Structuration nationale

- Il s'agit d'un enjeu national. Le pilotage par des organismes nationaux nous semble donc INDISPENSABLE : CNRS (INSU-INEE pour ce qui nous concerne mais aussi autres instituts SHS etc.) ; IPEV ; AllEnvi ?

-renforcer les collaborations internationales indispensables en Arctique, tant pour le renforcement des expertises que pour l'accès aux sites expérimentaux : Europe (ESFRI, ..), UMIs, NSF , bilatérales, ...Rôle MAE, IPEV, CNRS

- maintenir et renforcer une compétence forte et reconnue en télédétection : soutenir projets COREH2O, SWOT, Icesat par ex. (rôle du CNES)