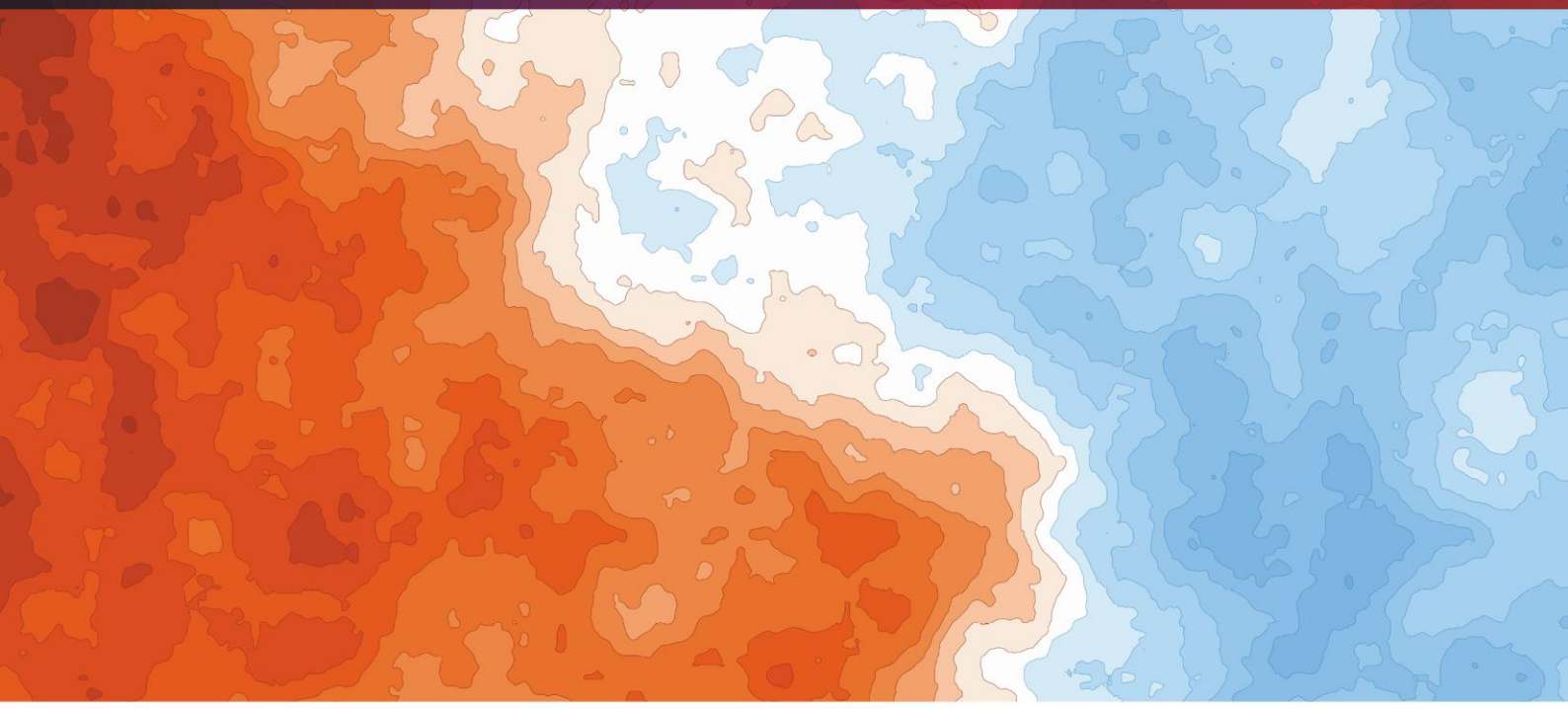
OBSERVATOIRE Défense & Climat

Note

IMPLICATIONS SÉCURITAIRES ET DE DÉFENSE DES POINTS DE BASCULE CLIMATIQUE

AMOC

Juin 2025



DGRIS

IRIS INSTITUT DE RELATIONS INTERNATIONALES ET STRATÉGIQUES

L'Observatoire Défense & Climat, lancé en décembre 2016, a pour objectif d'étudier les enjeux de sécurité et de défense liés au climat.

Il est coordonné par l'IRIS dans le cadre du contrat réalisé pour le compte de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) du ministère des Armées. Fort d'une équipe pluri et transdisciplinaire, l'Observatoire est composé de chercheurs spécialisés en relations internationales, sécurité, défense, migrations, énergie, économie, climatologie et santé. Il est dirigé par Julia Tasse et François Gemenne.

L'Observatoire a initié de nombreuses collaborations avec des partenaires européens (Pays-Bas, Luxembourg) et internationaux (Australie, États-Unis, Inde), des ONG internationales, des organismes publics nationaux et internationaux. Ces initiatives ont permis de renforcer la coopération sur les enjeux climatiques et leurs implications sécuritaires.

L'Observatoire Défense & Climat propose des rapports et notes, organise des séminaires restreints et des conférences ouvertes au public, et anime le podcast « Sur le front climatique ».

www.defenseclimat.fr

Le ministère des Armées fait régulièrement appel à des études externalisées auprès d'instituts de recherche privés, selon une approche géographique ou sectorielle venant compléter son expertise externe. Ces relations contractuelles s'inscrivent dans le développement de la démarche prospective de défense, qui, comme le souligne le dernier Livre blanc sur la défense et la sécurité nationale, *« soit pouvoir s'appuyer sur une réflexion stratégique indépendante, pluridisciplinaire, originale, intégrant la recherche universitaire comme des instituts spécialisés »*.

Une grande partie de ces études sont rendues publiques et mises à disposition sur le site du ministère des Armées. Dans le cas d'une étude publiée de manière parcellaire, la Direction générale des relations internationales et de la stratégie peut être contactée pour plus d'informations.

AVERTISSEMENT : Les propos énoncés dans les études et observatoires ne sauraient engager la responsabilité de la Direction générale des relations internationales et de la stratégie ou de l'organisme pilote de l'étude, pas plus qu'ils ne reflètent une prise de position officielle du ministère des Armées.

© IRIS - Tous droits réservés

À PROPOS DES AUTEURS ET AUTRICES DE LA NOTE

Julia Tasse / IRIS

Directrice de recherche et responsable des programmes Océan et Climat, environnement, sécurité à l'IRIS. Elle s'est spécialisée sur les enjeux maritimes après avoir travaillé sur ces sujets au service de diverses structures.

Martin Collet / IRIS

Étudiant en master 2 Environmental Policy à Sciences Po Paris. Il occupe le poste d'assistant de recherche au sein du programme Climat, environnement, sécurité de l'IRIS depuis août 2024.

© IRIS - Tous droits réservés

TABLE DES MATIÈRES

Introduction 5

PARTIE 1 - COMPRENDRE L'AMOC ET SES IMPLICATIONS SÉCURITAIRES 6

A – Croiser changements climatiques et points de bascule 9

B – Comprendre l'AMOC 13

PARTIE 2 - INTÉGRER LE BASCULEMENT DE L'AMOC DANS LES STRATÉGIES DE DÉFENSE 20

A – Mettre en place des outils pour détecter le basculement de l'AMOC 21

B – Documenter les implications sécuritaires des effets en cascade de l'AMOC 24

Conclusion 29

ANNEXES 30

BIBLIOGRAPHIE 36

Introduction

L'Observatoire Défense et Climat a publié de nombreux rapports sur les répercussions géopolitiques ou de défense des perturbations liées aux changements climatiques. Les changements climatiques sont souvent perçus comme des **phénomènes à évolution lente, graduelle et prévisible, permettant une adaptation progressive des systèmes humains et notamment des appareils de défense**. Cette perception oblitère les risques sécuritaires de **certains phénomènes à cinétique forte ou impliquant des boucles de rétroaction (*cf* Partie 1.B), tels que les points de bascule climatique**. Consciente de ces enjeux, la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) a financé en 2022 un projet – AI-assisted Climate Tipping-point Modeling (ACTM) – portant sur l'utilisation de l'intelligence artificielle pour améliorer la modélisation de **phénomènes climatiques interconnectés, en particulier les points de bascule, les seuils et les bifurcations associées**. Au sein d'un système climatique complexe[1] et aux composantes fortement interconnectées, **des seuils ont été identifiés**, à partir desquels **des boucles de rétroaction s'autoalimentent et accélèrent brutalement les changements climatiques**. Dès lors, la compréhension des facteurs **accélérateurs et des basculements associés** est cruciale pour compléter les études de sécurité climatique déjà réalisées.

Les points de bascule étudiés dans cette série de notes seront ceux identifiés par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (GIEC, 2018). Cette première note s'intéresse tout particulièrement **au ralentissement, voire à l'effondrement, de la circulation méridienne de retournement atlantique nord (*Atlantic meridional overturning circulation* ou AMOC).** Ce système de courants océaniques redistribuant la chaleur accumulée autour de l'équateur vers l'Atlantique Nord est central dans l'équilibre du système climatique. Il est à ce titre étudié depuis plusieurs décennies. Il a ainsi été au cœur d'une étude de sécurité étatsunienne dès 2003 (cf Partie 2). Si les **incertitudes scientifiques ont longtemps été un frein à son intégration dans les documents stratégiques portant sur la sécurité climatique**, la récente **convergence des résultats des modèles climatiques** autour d'un ralentissement de l'AMOC a relancé la dynamique de recherche.

À travers **une revue de littérature**, **des cartes et des outils de visualisation**, cette note a pour objectif **d'éclairer les décideurs politiques et économiques sur les implications sécuritaires et de défense que pourrait représenter le ralentissement, voire l'effondrement de l'AMOC.** Une note annexe offre une méthodologie d'approche des points de bascule, qui sera commune aux différentes notes de cette série.

[1] Le système climatique est un système très complexe, composé de cinq éléments majeurs : l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la lithosphère et la biosphère, et les interactions entre eux.

PARTIE 1
COMPRENDRE L'AMOC ET SES IMPLICATIONS SÉCURITAIRES

Les points de bascule climatique

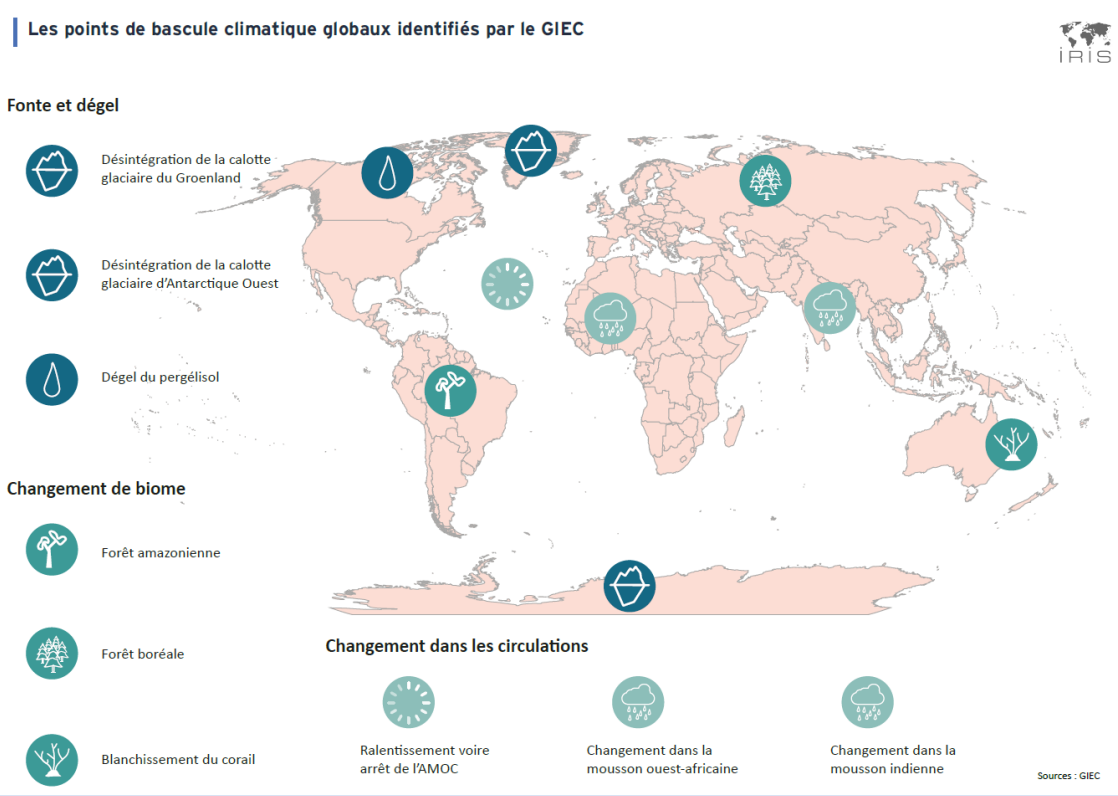
On entend par point de bascule **un degré de changement de propriétés d'un système au-delà duquel on assiste à une réorganisation**, potentiellement **chaotique**, de ce dernier (GIEC, 2019). Une **annexe à cette note** précise comment un système peut basculer d'un état à un autre et les approches pour en détecter le basculement.

Lorsque l'on se réfère au système climatique, un **point de bascule se définit par un seuil critique qui, une fois dépassé, conduit à un basculement** de tout ou partie du système vers un nouvel état de stabilité.

Il est important de souligner que **l'état initial n'est pas nécessairement retrouvé si les facteurs de basculement sont interrompus**. Dans le cas d'un basculement climatique, les facteurs de basculement sont liés à la hausse de la température moyenne globale causée par les émissions anthropiques de gaz à effet de serre. La notion de seuil comporte très souvent l'idée **d'un effet d'entraînement**, à travers lequel le système auto-entretient les dynamiques amorcées (Lenton et *al.*, 2023).

Les points de bascule climatique identifiés par le GIEC qui structurent cette série de notes couvrent des **phénomènes de fonte et dégel de glaces et de sols gelés** (désintégration de la calotte de glace du Groenland, dégel du pergélisol subarctique et désintégration de la calotte glaciaire d'Antarctique Ouest), **des changements importants de circulations globales** (ralentissement voire effondrement de l'AMOC, changement dans la mousson ouest-africaine, changement dans la mousson indienne) ou encore **des changements de biomes** (tels que le blanchissement du corail, la réduction de la surface de la forêt boréale et celle de la forêt amazonienne).

Figure 1 – Carte représentant les points de bascule climatique globaux identifiés par le GIEC



Ces points de bascule climatique sont associés à des incertitudes, tant sur la **temporalité** de leur passage qu'aux **répercussions** de leur basculement. Ces **incertitudes ne doivent pas invalider la pertinence de l'intégration des points de bascule climatique au sein des politiques de sécurité et de défense. Exclure d'un radar stratégique un événement à la probabilité d'occurrence faible[2] mais aux effets dévastateurs serait un choix risqué.**

Incertitudes scientifiques préexistantes autour de l'AMOC

Quatre états permettent de comprendre les mécanismes d'un point de bascule (Harper et *al,* 2024), à savoir **un état initial stable**, **un état intermédiaire à l'instabilité croissante**, qui peut aboutir à un **point de bascule** qui conduit à **un nouvel état de stabilité**.

La difficulté à modéliser précisément l'évolution de l'AMOC tient au manque **de données historiques** (Ben Yami, 2024a), **limitant ainsi la capacité à définir clairement un état initial et donc à détecter un potentiel ralentissement critique (cf annexe)**. De plus, **les difficultés d'intégration de phénomènes complexes** (effets des tourbillons, itinéraire de cette circulation, effets des changements de caractéristiques biochimiques des eaux au large de Terre-Neuve… (Jackson et *al.*, 2023)) **aux modèles limitent la compréhension des interactions entre les différents éléments constitutifs de l'AMOC**. Comme pour tous les points de bascule climatique, des **incertitudes persistent** autour de l**a temporalité de l'AMOC et les répercussions** de son potentiel effondrement. Ces dernières constituent l'objet de cette note. Concernant l'évolution temporelle, les incertitudes sont **liées au rythme du ralentissement** : les hypothèses vont **de l'effondrement d'ici 2095** (Ditlevsen et *al,* 2023) **à un maintien de la circulation à travers d'autres mécanismes** (courants circumpolaires antarctiques (Baker et al, 2025)), en passant par un ralentissement progressif aboutissant à un effondrement brutal sur une centaine d'année (van Westen et al, 2024). Le rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère affirme qu'un **ralentissement est très probable au cours du 21e siècle**, et qu'un **effondrement de l'AMOC ne peut être exclu** (GIEC, 2019). Les auteurs de cette note considèrent l'effondrement de l'AMOC comme une éventualité nécessitant une réflexion stratégique.

Les dernières conclusions scientifiques abondent dans le sens d'un ralentissement substantiel de l'AMOC. Cela s'explique **1)** par le développement continu de nouveaux outils de mesure et **2)** l'amélioration constante des capacités de modélisation. Ainsi, de nombreux travaux présumaient d'une grande stabilité de l'AMOC dans la modélisation qu'ils utilisaient. Or, les modèles CMIP[3], qui font partie des bases d'études prises en compte par le GIEC, n'intègrent pas les conséquences de la fonte des calottes glaciaires, et les apports d'eau douce associés, sur l'évolution de l'AMOC[4]. **Les travaux les plus récents (2020-2025) convergent vers l'hypothèse d'un ralentissement marqué d'ici la fin du 21e siècle, voire d'un effondrement de l'AMOC, dont la temporalité reste beaucoup plus incertaine**. Cette **diminution de l'incertitude quant à la temporalité et l'ampleur du ralentissement l'AMOC** constitue un motif supplémentaire pour intégrer l'étude des répercussions du point de bascule dans les réflexions autour de la sécurité nationale et la défense.

[2] « The AMOC is projected to weaken during the 21st century (*very likely*), but a collapse is deemed *very unlikely* (albeit with *medium confidence* due to known biases in the climate models used for the assessment). », 6ème rapport du GIEC, p188. (Masson-Delmotte et *al*., 2021). L'incertitude scientifique est souvent mal interprétée : ainsi, comme le souligne la Commission de préparation nationale britannique (National Preparedness Commission, 2024), le GIEC a établi un cadre de référence pour le traitement de l'incertitude qui implique qu'un événement ou un phénomène soit décrit comme « improbable » (unlikely) si sa probabilité d'occurrence est inférieure à 33 % et très improbable si elle est inférieure ou égale à 10 % (GIEC, 2007).

[3] Les CMIP, ou *Coupled Model Intercomparison Project*, sont des programmes de recherche de modélisation climatique visant à coordonner et archiver des simulations du climat sur la base du partage des données de modèles par des équipes de recherche du monde entier. Ces données constituent la base des rapports d'évaluation du GIEC.

[4] La calotte glaciaire groenlandaise perd pourtant 280 millions de tonnes de glace par an en raison des changements climatiques (Mouginot, 2019).

A – Croiser changements climatiques et points de bascule

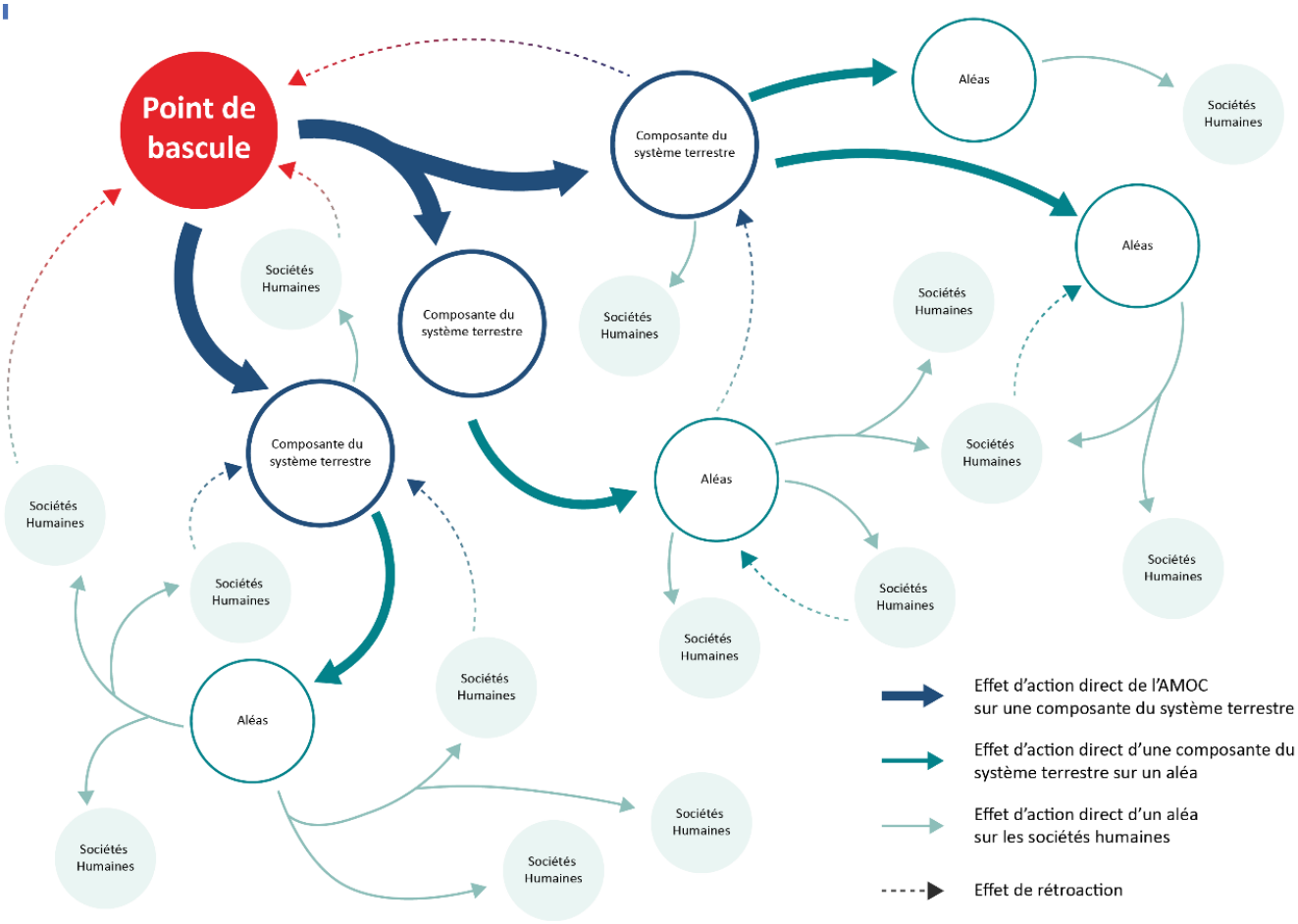
1. Effets de premier ordre et en cascade

Les changements climatiques d'origine anthropique se manifestent par **des modifications globales ou régionales des composantes du système climatique**. Ces composantes peuvent être résumées de la manière suivante : l'atmosphère, la lithosphère (les continents), l'hydrosphère, la cryosphère (les glaces) et la biosphère (les écosystèmes). Ces modifications auront par exemple pour corollaire l'augmentation de la température de surface du sol et des océans, une concentration plus importante d'eau dans l'atmosphère, ou encore des changements de répartition de certaines niches écologiques. Les **aléas environnementaux liés à ces modifications** peuvent se manifester sous la forme d'événements climatiques extrêmes (cyclones, vagues de chaleur, etc.) ou écologiques (extinction d'une ou plusieurs espèces). Ces **modifications des composantes et les aléas associés seront dits « effets de premier ordre »**.

Ces phénomènes modifient les conditions de vie des populations. Les rendements agricoles, la productivité des travailleurs, le fonctionnement des infrastructures sont tout autant de paramètres qui dépendent des pluies, de la température de l'air et de l'eau, ou encore de la survenue ou non de tempêtes. Ces effets de premier ordre ont dès lors des **effets en cascade** sur les systèmes humains[5]. Ces **impacts sur les sociétés humaines seront dits « effets en cascade » dans le reste de ce document**.

[5] Les réponses apportées à ces effets en cascade rétroagissent sur les changements climatiques à travers les solutions adoptées et les émissions de gaz à effet de serre qui y sont associées (déploiement de la climatisation pour lutter contre les vagues de chaleur constitue un exemple de mal adaptation, renforçant le phénomène contre lequel elles sont censées lutter).

Figure 2 – Effets en cascade : liens entre un point de bascule climatique, les composantes du système terrestre et les sociétés humaines



2. Collecte et analyse des données

Les acteurs de la défense et de la sécurité sont **exposés aux effets de premier ordre des changements climatiques.** L'anticipation de ces effets de premier ordre est intégrée à la *Stratégie Climat & Défense* (ministère des Armées, 2022). Cependant, ces acteurs doivent également avoir une bonne connaissance **des effets en cascade potentiels pour en anticiper les répercussions sécuritaires**.

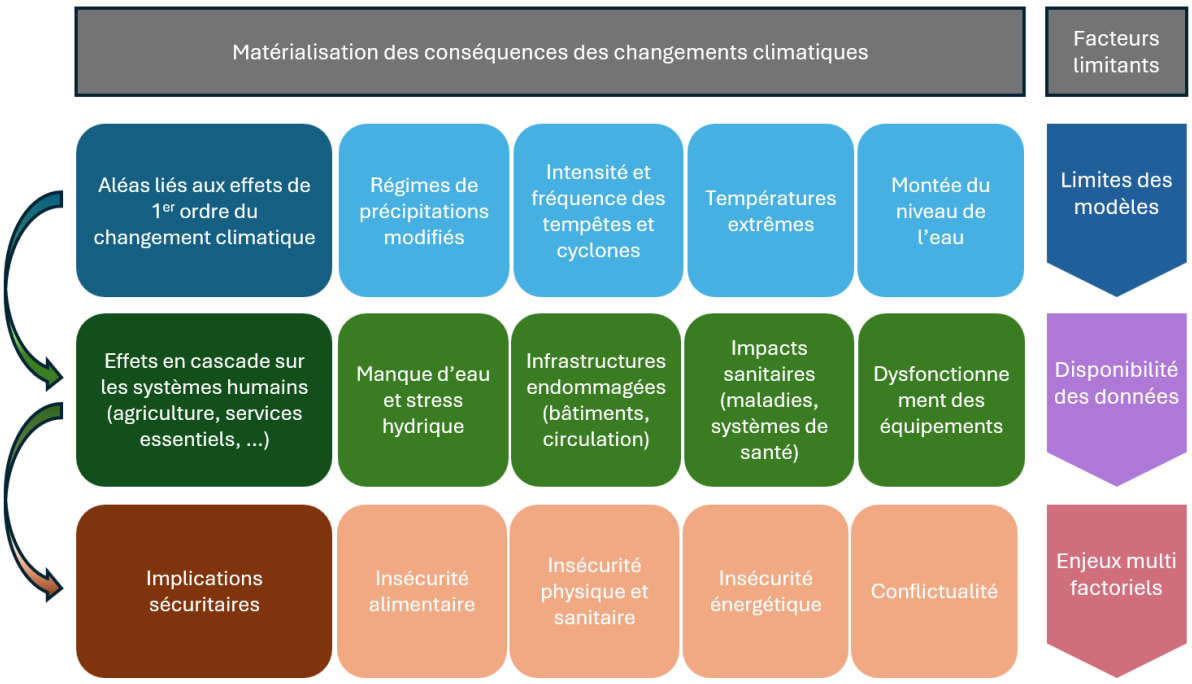
Les effets de premier ordre des changements climatiques font l'objet de nombreuses études, souvent basées sur la modélisation, et de méta-études (Projets CMIP, Rapports d'évaluation du GIEC…). Ils sont donc davantage **documentés et l'incertitude est limitée par le recoupement des résultats.** Des groupes de travail comme le GIEC et la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), des institutions comme l'Organisation météorologique mondiale, ont

pour objectif de rassembler les données et d'affiner la connaissance de ces effets de premier ordre.

Une deuxième étape consiste à cartographier les effets en cascade, qui participent souvent à **renforcer des phénomènes multifactoriels**. Il est souvent utile de fixer une zone d'étude à cette étape. En effet, si les effets de premier ordre peuvent avoir une échelle globale, **la majorité des effets en cascade seront régionaux, dépendant des écosystèmes présents, des caractéristiques géographiques et des climats préexistants**. Ces effets en cascade sont associés à **l'exacerbation de vulnérabilités**, qui résultent à la fois des effets de premier ordre mais également de **la préparation, l'adaptation et aux capacités de résilience** des systèmes humains exposés. Les effets de premier ordre auront des impacts qui peuvent être dans un premier temps **absorbés** par les mesures d'adaptation prises en anticipation, puis **atténués** par la préparation des institutions et des populations à la potentialité de chocs. **Ces systèmes humains perdureront tant que leur capacité de résilience n'est pas dépassée**. Les effets en cascade ont des implications en termes de sécurité et de défense. Ces implications sont d'autant plus importantes que l'on s'approche des **limites des capacités de résilience des systèmes**.

Les différentes **phases de cette étape de compréhension** des effets des changements climatiques ainsi que les incertitudes associées, sont présentées ci-dessous.

Figure 3 – Effets de premier ordre et en cascade, et facteurs limitants, dont l'incertitude (du plus faible en bleu au plus élevé en rouge), associés aux changements climatiques

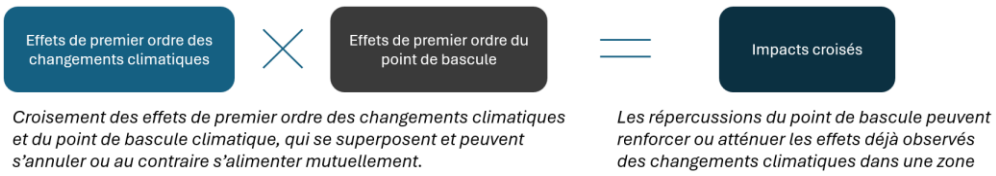


Source : auteurs

Les couleurs associées aux facteurs limitants, dans la colonne de droite de ce schéma, sont représentatives du niveau d'incertitude, lié à la quantité de données disponibles et concordantes. Nous avons souhaité représenter cette incertitude car **plus un phénomène est multifactoriel, plus il est difficile d'y associer de la causalité**. Par ailleurs, certains éléments du système climatique ou **certains points de bascule sont associés à de plus grandes incertitudes, en raison d'un manque de données ou difficulté d'intégration aux modèles**.

Une deuxième étape consiste ensuite à **intégrer** à ces effets en cascade des changements climatiques les **répercussions d'un point de bascule**. L'étude des points de bascule en tant que partie intégrante des changements climatiques à travers cette catégorisation en effets de premier ordre et effets en cascade vise à répondre à l'objectif suivant : **éclaircir les répercussions sécuritaires et de défense spécifiques à ce point de bascule**, selon qu'il renforce ou atténue certains effets des changements climatiques.

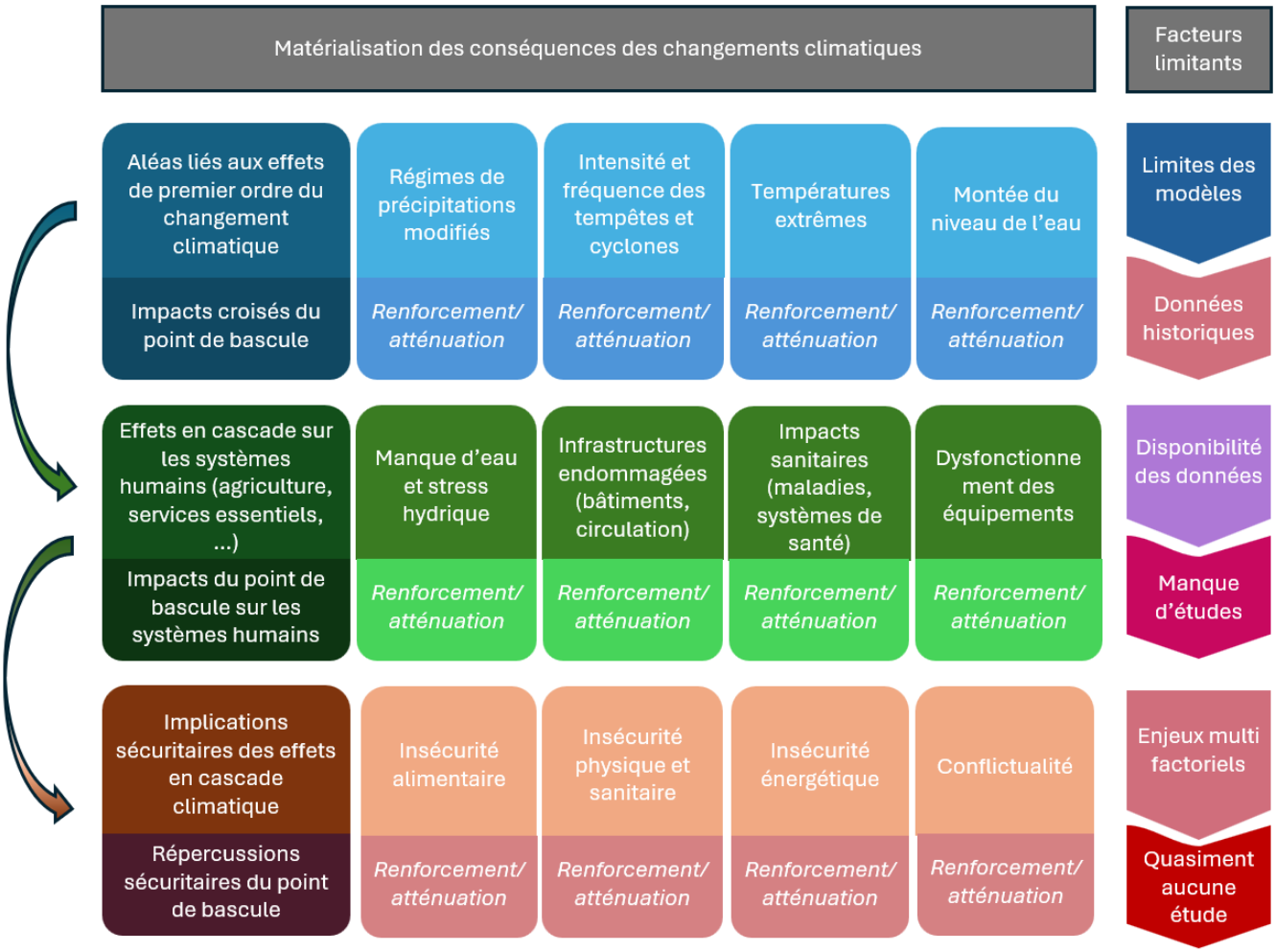
Figure 4 – Lien entre les effets de premier ordre des changements climatiques et les effets de premier ordre du passage d'un point de bascule



Source : auteurs

Le croisement **Changement climatique X Point de bascule** peut impliquer une incertitude croissante, en raison du peu de données disponibles.

Figure 5 – Les effets de premier ordre, les effets en cascade et les facteurs limitants, dont l'incertitude, associés à un point de bascule climatique.



Source : auteurs

B – Comprendre l'AMOC

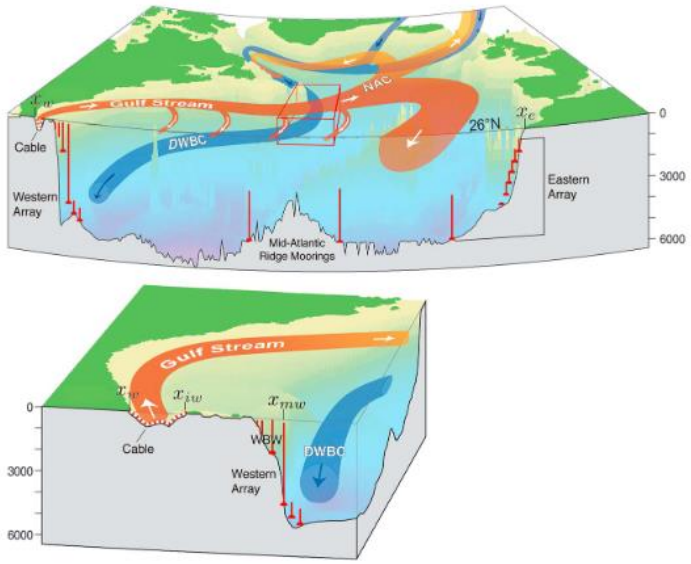
1. L'AMOC et ses moteurs

L'AMOC constitue **une des branches de la circulation océanique globale**. Elle se caractérise par un transport d'eau chaude et salée en surface, depuis l'Afrique du Sud jusqu'au nord de l'Atlantique (Buckley et *al.*, 2016), et, en profondeur, des eaux froides depuis le nord de l'Atlantique jusqu'à l'équateur[6]. Lorsque les eaux de surface chaudes remontent vers le nord

[6] L'AMOC ne doit pas être confondue avec le Gulf Stream : ce dernier est un courant de surface dont l'existence dépend de la rotation terrestre. Il transporte des masses d'eau chaudes de la Floride vers le nord du continent américain avant de s'orienter vers l'Est, et ainsi de participer au transfert de chaleur vers l'Europe. Le Gulf Stream fait donc partie de l'ensemble complexe qui constitue l'AMOC, mais il n'est pas dépendant des mêmes mécanismes et n'est pas soumis au risque d'effondrement de l'AMOC (Cailloce, 2021).

de l'Atlantique, une partie de la chaleur est transférée à l'atmosphère et les eaux deviennent plus froides et plus denses. En arrivant dans les hautes latitudes, les eaux très salées remontant depuis l'Atlantique se mélangent aux eaux polaires plus douces, mais très froides (Abot et al, 2023). La conjonction du froid des eaux arctiques et de la salinité apportée par les eaux remontant de l'Atlantique renforce la densité des eaux de surface. Cette densité peut dépasser celle des eaux de la couche inférieure, ce qui mène les eaux de surface à plonger. Ce processus, appelé **formation des eaux profondes**, constitue **un des principaux moteurs[7] de la circulation océanique globale**. Ce transfert de chaleur depuis les tropiques vers l'Atlantique Nord permet entre autres à l'Europe de connaître un climat plus tempéré que l'Amérique du Nord à des latitudes similaires (Buckley et *al*, 2016).

Figure 6 – Représentation schématique des circulations océaniques de l'Atlantique Nord



En orange sont représentés les courants de surface (Gulf Stream, Courant Atlantique Nord (NAC), transportant de la chaleur vers l'hémisphère Nord. En bleu, les courants profonds circulent en sens inverse (Courant de Contour Occidental Profond (en anglais Deep Western Boundary Current, DWBC).

Source : Buclkey et al., 2016

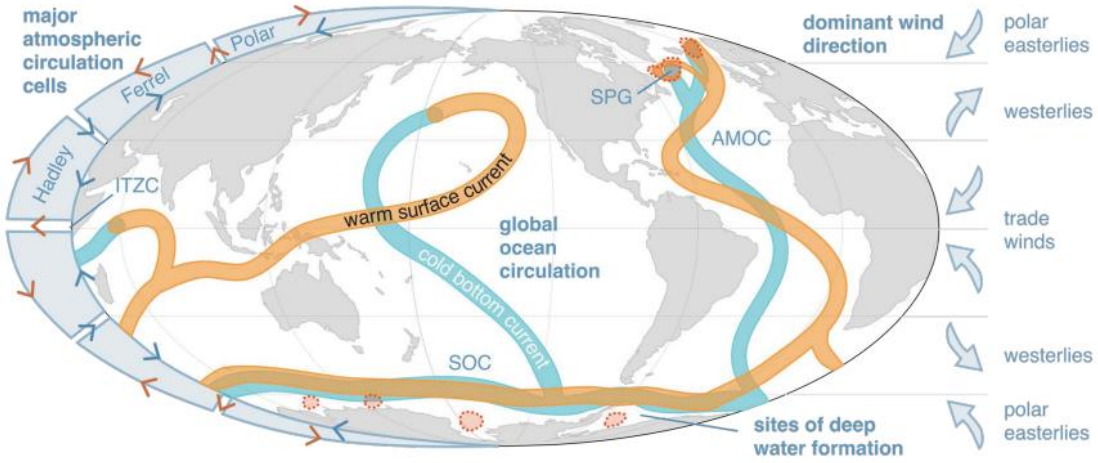
L'état de l'AMOC, soit la puissance de la circulation et du transfert de chaleur ainsi que la formation d'eaux profondes, constitue donc **un élément clé de la stabilité du système climatique** tel que nous le connaissons aujourd'hui. Mais **les conséquences des changements climatiques** (réchauffement plus intense des pôles, fonte des calottes glaciaires, perturbations des précipitations…) **altèrent le fonctionnement de ce mécanisme** qui, s'il s'effondrait, pourrait bouleverser complètement le climat global (Benton, 2020 ; Drijfhout, 2015). C'est pourquoi le ralentissement, voire l'effondrement de l'AMOC est considéré

[7] Si l'AMOC est étroitement liée à la formation d'eaux profondes dans les régions subarctiques, il existe un débat sur le rôle d'autre mécanismes dans le fonctionnement de cette circulation et leur capacité à compenser un affaiblissement de la formation d'eaux profondes dans les régions subarctiques. C'est notamment le cas du courant circumpolaire et des vents de l'Antarctique, qui permettraient le maintien d'un certain niveau de circulation (Baker et *al.,* 2025)

comme **un point de bascule** qui, du fait de la dimension globale de cette circulation, pourrait interagir fortement avec d'autres points de bascule (Boot et *al.*, 2025, Lenton et *al.*, 2008) (voir figures 8 et 9).

Figure 7 – Circulation océanique globale, zones de formation des eaux profondes et cellules atmosphériques.

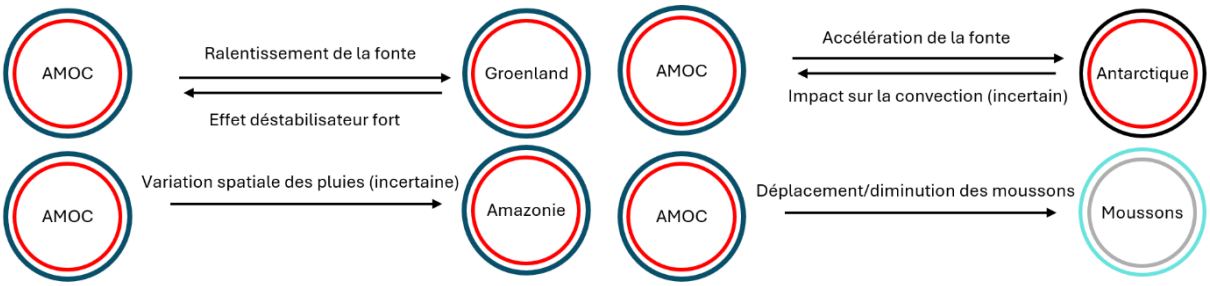
***ITZC** : Inter-Tropical Convergence Zone ; **SOC** : Southern Ocean Circulation ; **SPG** : Sub-Polar Gyre (cf Partie 2. 1.1)*



Source : Lenton et *al.*, 2023

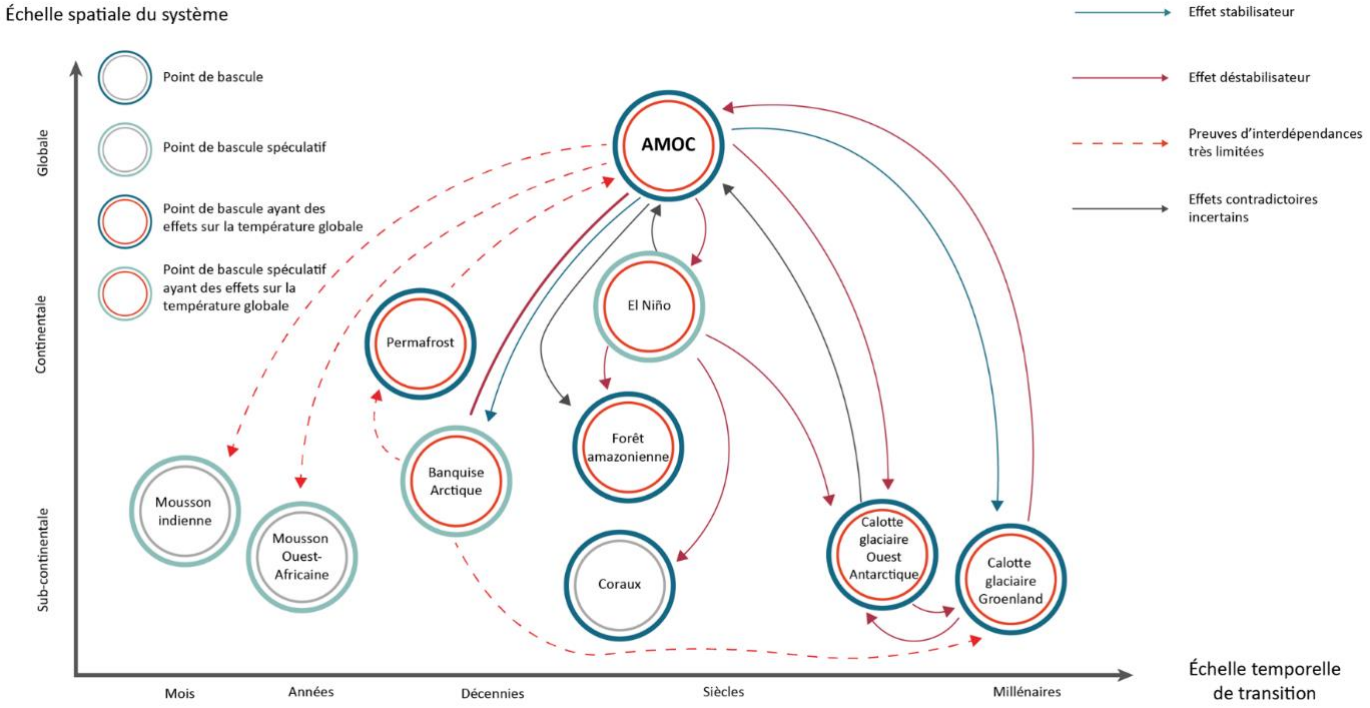
Compte tenu de sa dimension globale, **l'AMOC présente donc de nombreuses interactions avec d'autres points de bascule du système climatique**. Ces **boucles de rétroactions** peuvent être **positives** (l'action de *A* accentue l'action de *B*), **négatives** (l'action de *A* limite l'action de *B*), ou **incertaines** tant au niveau de leur dynamiques que de leur existence, en l'état actuel des connaissances scientifiques (Lenton et *al.*, 2023). Le schéma ci-dessous synthétise les principales interactions entre l'AMOC et les autres éléments clés du système climatique.

Figure 8 – Principales interactions entre l'AMOC et certains points de bascules identifiés par le GIEC



Sources : Lenton et *al.,* 2023 ; Ben Yami et *al.,* 2024

Figure 9 – Ensemble des boucles de rétroaction entre les différents points de bascule.



Certains systèmes restent spéculatifs quant à leur capacité à présenter plusieurs états de stabilité.
Adapté de Lenton et *al*., 2023

2. Effets de premier ordre du ralentissement voire effondrement de l'AMOC[8]

Le ralentissement, voire l'effondrement, de l'AMOC affecterait l'ensemble des composantes du système climatique. Les capacités océaniques d'absorption et de redistribution de chaleur et de CO_2 seraient fortement altérées (Buckley et *al.*, 2016), conduisant à **une accélération des changements climatiques**[9]. Ces modifications ne seraient pas réparties de manière homogène : l'hémisphère Nord se refroidirait, en particulier le continent européen, tandis que l'hémisphère Sud connaîtrait un réchauffement substantiel (Drijfhout, 2015). Les changements de températures, ainsi que l'interruption de la pompe de carbone océanique, conduiraient à **une accélération de l'acidification océanique**[10] (Lenton et *al.*, 2023) et au

[8] Les publications scientifiques constituant la base des conclusions présentées ci-dessous modélisent pour la plupart un effondrement de l'AMOC. Leurs résultats permettent de dégager les grandes tendances climatiques, physiques et biologiques des répercussions de cet effondrement. Les conséquences d'un ralentissement substantiel, quoique d'ampleur moindre, répondraient aux mêmes dynamiques.

[9] L'arrêt de l'AMOC altérerait les capacités d'absorption océanique de carbone à travers une baisse de la solubilité du dioxyde de carbone. Celui-ci ne serait alors plus transporté par la formation d'eau profondes. Dès lors, à trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre constantes, la diminution du puit de carbone océanique augmenterait la part de CO_2 restant dans l'atmosphère (Rahmstorf et *al.*, 2024a).

[10] L'arrêt de l'AMOC concentrerait la totalité du CO_2 capté par l'océan à la surface, accélérant l'acidification des océans et les conséquences du phénomène [blanchiment des coraux, extinction d'espèces marines, augmentation de la corrosion des navires… (OTAN, 2024)]

risque d'une baisse marquée de la production de ressources halieutiques dans l'océan Atlantique Nord (Boot et *al.*, 2025), même si des incertitudes persistent à ce sujet (Tagliabue et *al.*, 2021). Le refroidissement de l'Atlantique Nord pourrait également entraîner une augmentation de la formation de glace de mer en hiver (Liu et *al.*, 2022), affectant les voies maritimes autour de l'Arctique. Enfin, **le ralentissement voire l'effondrement de l'AMOC accroîtrait la stratification océanique[11], ce qui pourrait fortement altérer les capacités de défense anti-sous-marine** : en étudiant les évolutions de la propagation acoustique dans six zones de l'océan Atlantique Nord et de l'Ouest du Pacifique à partir des projections climatiques du GIEC (SSP5-8.5), Gilli et *al* (2024) constatent une augmentation marquée de la perte de transmission acoustique dans l'Atlantique Nord. Si les conclusions des différentes études doivent être limitées aux zones étudiées, la région Arctique semble particulièrement touchée (OTAN, 2024).

Concernant les conditions climatiques du continent européen, nous assisterions à une saisonnalité accrue, à travers **des étés plus secs et des épisodes caniculaires plus fréquents et intenses, en même temps que des hivers plus rudes et tempétueux** (Lenton et *al.*, 2023). À l'échelle pluriannuelle, certaines projections estiment **une baisse des températures moyennes allant de -4°C (Ritchie et *al.*, 2020) à -10°C (Van Westen et *al.*, 2024) à l'échelle du continent**. La baisse drastique des précipitations en Europe occidentale, particulièrement au nord, et le raccourcissement de la saison de végétation entraîneraient des **conséquences négatives pour la production agricole** (Ritchie et *al.*, 2020).

Le ralentissement voire l'effondrement de l'AMOC entraînerait également des conséquences sur les circulations atmosphériques globales, notamment un déplacement vers le Sud de la zone de convergence intertropicale[12]. Un tel phénomène aurait pour effet une **diminution importante des moussons en Afrique de l'Ouest et en Asie du Sud**, entraînant de **20 à 30 % de réduction des volumes de précipitations annuels** (Ben Yami et *al.*, 2024). De telles perturbations **impacteraient massivement des régions extrêmement dépendantes de l'agriculture de subsistance**, de même que la production globale de certaines denrées alimentaires intégrées aux marchés internationaux. Les conditions environnementales pour la culture du maïs en Europe s'effondreraient ; le même constat peut être dressé pour le blé, cette fois à l'échelle de l'ensemble des continents (OCDE, 2021).

[11] « Dans l'océan, les masses d'eau sont disposées en différentes couches, selon leur densité. La densité varie en fonction de la salinité et de la température ». Institut universitaire européen de la mer.
[12] Une forme d'équateur météorologique, zone où les alizées des hémisphères nord et sud convergent et où les cellules de Hadley se rencontrent (cf figure 6, figuré à gauche). Source : Encyclopedia Universalis., Jean-Pierre Chalon.

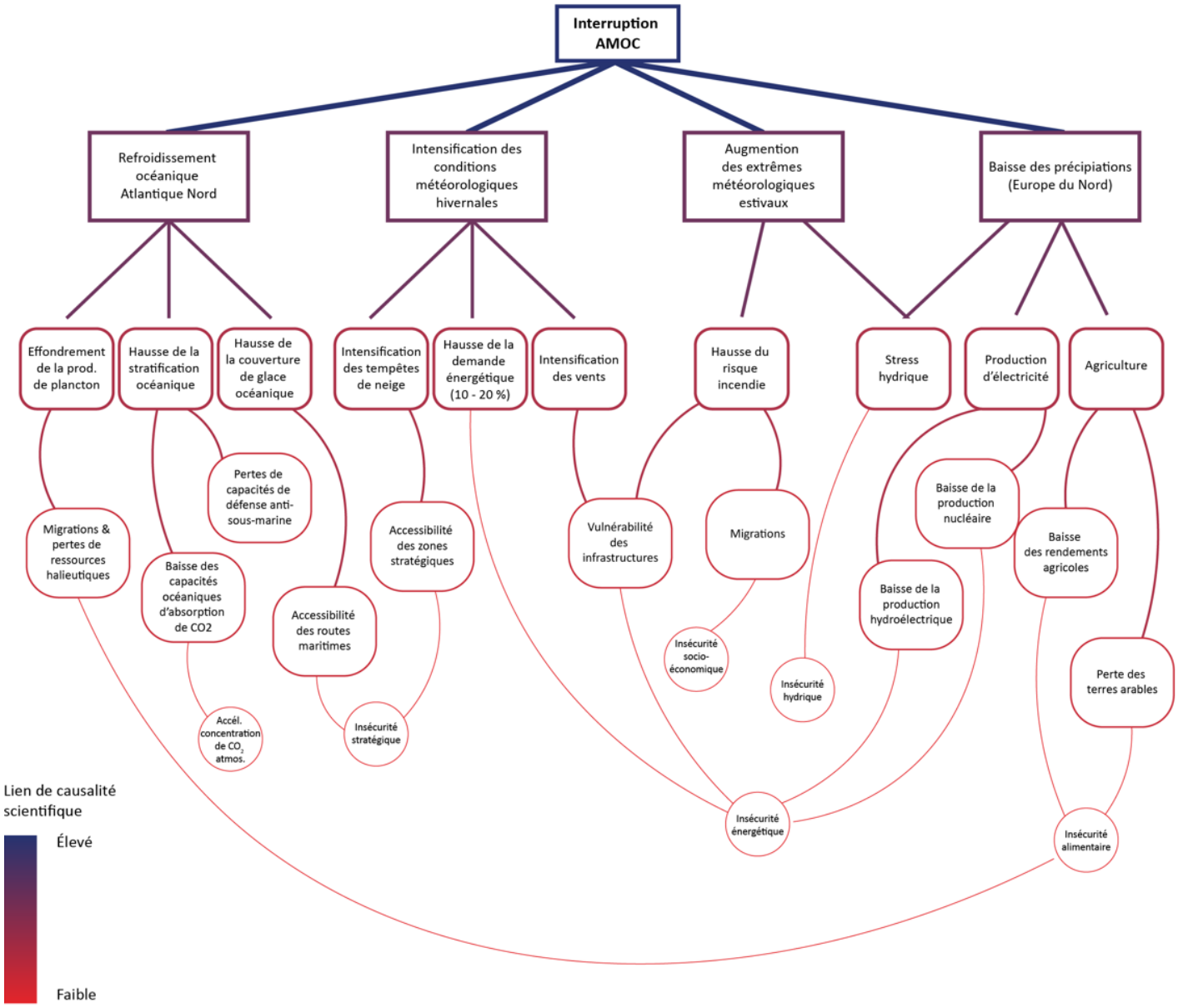
3. Effets en cascade du ralentissement voire l'effondrement de l'AMOC

Compte tenu de son rôle dans la stabilité du climat, et particulièrement au niveau du continent européen, **le ralentissement voire effondrement de l'AMOC entraînerait des répercussions en cascade majeures** sur l'ensemble des systèmes humains. La **polarisation des conditions météorologiques estivales** (plus chaudes) et hivernales (plus froides) conduirait selon toute vraisemblance à une **multiplication et une intensification des phénomènes extrêmes** (Drijfhout, 2015). Au-delà d'accentuer des catastrophes déjà renforcées par les changements climatiques, et pour lesquelles le niveau de préparation est variable, **de tels changements exposent les sociétés européennes à des risques jusqu'alors peu, voire pas considérés** (Laybourne et *al.*, 2024). Le durcissement des conditions et des tempêtes hivernales pourrait par exemple sérieusement porter atteinte aux **infrastructures énergétiques**, en même temps qu'il conduirait à une hausse de la demande énergétique. L'accentuation des dérèglements du cycle de l'eau impliquerait **des conséquences en termes de santé publique**, l'effondrement de l'AMOC accroissant le phénomène de stress hydrique que connaissent déjà de nombreux pays européens (Duffau et *al.*, 2024).

La sécurité alimentaire mondiale se trouverait également altérée. La production agricole européenne serait très fortement impactée par la réduction de la période de végétation, induite par la baisse des températures, de même que par la diminution des précipitations (*cf. infra)*. À ce risque s'ajouterait celui de **l'effondrement de la production de nombreux greniers à grains du monde**, induite notamment par la modification des régimes de moussons en Afrique de l'Ouest et en Asie du Sud (Lenton et *al.*, 2023). De telles conséquences pourraient conduire à des **flux migratoires importants des pays d'Europe du Nord vers le sud du continent,** afin de pallier les dégradations climatiques que subiraient les zones septentrionales de l'Europe, les plus exposées aux modifications du climat (Schwarz et *al.*, 2003). C'est l'ensemble **des systèmes économiques européens** qui seraient mis à mal par une dégradation globale des conditions d'habitabilité, les conséquences locales ayant des effets en cascade dans un contexte de **forte interpénétration des marchés des pays membres de l'Union européenne** (Hald-Mortensen, 2024).

Les conséquences géopolitiques pourraient également être nombreuses : le champ des éventualités s'étend d'un **accroissement de la coopération,** notamment dans les cadres plus globaux traitant de l'action climatique, **face à des coûts de l'inaction devenant plus élevés**, à **une fragmentation régionale et des stratégies d'adaptations unilatérales,** telles que la géoingénierie, au potentiel conflictuel très élevé (Dimsdale et *al.,* 2022 ; De Guglielmo Weber et *al.*, 2023). Les effets en cascade de l'AMOC sont plus précisément détaillés dans le schéma suivant.

Figure 10 – Schéma des principaux effets en cascade du ralentissement voire de l'effondrement de l'AMOC et représentation des certitudes de causalité scientifiques associées



Source : Auteurs

PARTIE 2
INTÉGRER LE BASCULEMENT DE L'AMOC DANS LES STRATÉGIES DE DÉFENSE

A – Mettre en place des outils pour détecter le basculement de l'AMOC

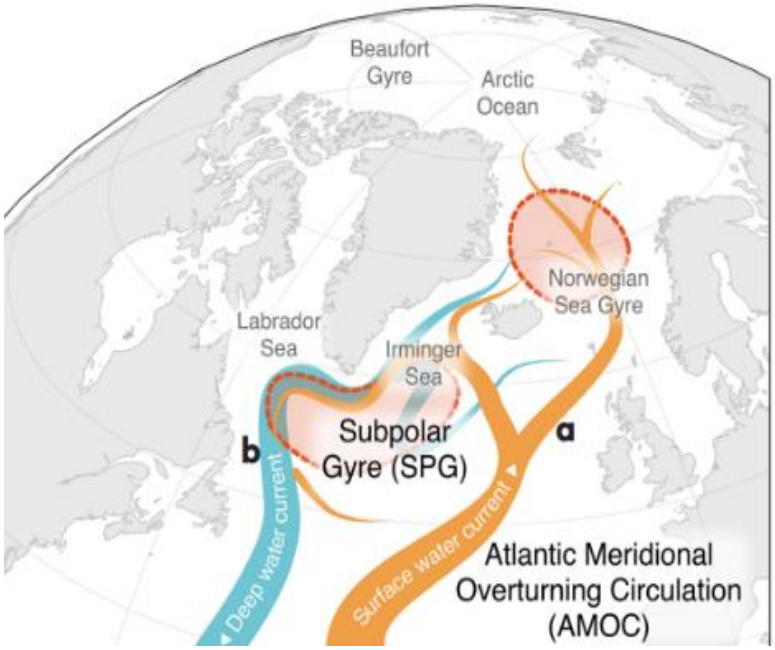
L'étude des points de bascule climatique à des fins de prospective de défense implique la préparation des systèmes à la survenue de cet événement. Cette préparation est double : elle nécessite d'une part de **disposer des capacités de détection de la déstabilisation** du système climatique mais également de **prévoir l'adaptation des infrastructures, équipements et pratiques** au durcissement consécutif des conditions de vie et d'opération.

1. Outils méthodologiques de détection du basculement

1.1. Les signaux d'alerte précoce

L'identification de signaux d'alerte précoce peut permettre de déceler la déstabilisation du système AMOC. Si la complexité de cette circulation **ne nous permet pas d'identifier avec certitude un paramètre ou un phénomène** qui puisse faire office de signal d'alerte précoce**, la gyre subpolaire** apparaît néanmoins dans nombres d'articles scientifiques comme un candidat potentiel prometteur.

Figure 11 – Représentation schématique de la gyre subpolaire, située au cœur du processus de formation d'eaux profondes de l'AMOC



Source : Lenton et al., 2023

La gyre subpolaire est un phénomène de courants océaniques qui se situe au sud du Groenland (cf. figure 11) et qui est clé pour la **convection des eaux profondes, la plongée des eaux qui est intrinsèque au fonctionnement de l'AMOC**. Cette gyre est étudiée par de

nombreuses institutions. Il a longtemps été estimé que toute déstabilisation de cette gyre constituerait un signal d'alerte précoce fiable du basculement de l'AMOC.

Le suivi des avancées scientifiques concernant la gyre subpolaire constitue donc la piste la plus sérieuse concernant un possible signal d'alerte précoce d'une déstabilisation importante de l'AMOC. L'agence britannique ARIA, construite sur le modèle de la DARPA en étant rattachée au ministère pour les Sciences, a **investi 81 millions de livres début 2025** dans un projet visant à identifier des signaux d'alerte précoce des points de bascule. **Il étudiera la possibilité que la gyre subpolaire** puisse être un signal d'alerte de plusieurs points de bascule.

1.2. L'intervalle de transition

Le passage du seuil d'un point de bascule est crucial à anticiper, mais il doit s'accompagner d'une **fine connaissance de la durée de transition** entre l'enclenchement du point de bascule et le changement définitif du système. Pour l'AMOC, il s'agit de comprendre en combien de temps on assisterait au refroidissement massif des climats européens. Certaines publications envisagent **une durée de transition de 15 à 300 ans** pour passer de la circulation à l'effondrement (Armstrong McKay et *al.*, 2022). D'autres publications mentionnent un intervalle de transition **de quelques décennies, à quelques années**, selon les mécanismes qui pousseraient l'AMOC vers son basculement (Rahmstorf et *al.*, 2024a ; KuhlBrodt et *al.*, 2001). Cependant, **l'AMOC étant un courant de transport de chaleur vers l'hémisphère Nord, un affaiblissement de ce dernier serait suffisant pour engendrer des modifications climatiques importantes**.

La combinaison de signaux d'alerte précoce, de la durée de transition et des effets intermédiaires permettront de calibrer au mieux les adaptations nécessaires au maintien des capacités opératives.

2. Suivi des travaux scientifiques pour détecter le basculement

Sont reportés ci-dessous quelques grands projets de recherche en cours, dont les résultats à venir auront probablement des répercussions sur notre compréhension de l'AMOC. Ces projets peuvent constituer le socle d'un **suivi des avancées scientifiques autour des signaux d'alerte précoce et de la période de transition de l'AMOC.**

Figure 12 – Principaux projets de recherche en cours visant à améliorer la compréhension de l'AMOC et les conséquences de son effondrement potentiel.

Financeur	Nom	Durée	Budget	Coordination	Objectif
Union européenne	**EPOC** (*Explaining and Predicting the Ocean Conveyor*)	2022-2027	4,8 M €	Université de Hambourg (Allemagne)	Développer des modèles pour comprendre les conséquences d'un ralentissement de l'AMOC sur la météo et le climat à des échelles de temps courtes (quelques jours à quelques années). Pour en savoir plus.
	ROVER (*Resilient Northern Overturning in a Warming Climate*)	2024-2028	3 M€	Université de Bergen (Norvège)	Comprendre si le retrait de la banquise pourrait avoir un impact sur l'AMOC, notamment en le renforçant (contre toute attente). Pour en savoir plus.
	TipESM (*Exploring Tipping Points and Their Impacts Using Earth System Models*)	2024-2027	4,8 M€	13 consortiums et institutions	Comprendre les points de bascule, notamment les signaux d'alerte précoce et les trajectoires d'émissions qui minimisent les risques. Pour en savoir plus**.**
	Joint Action on AMOC	2024-2026	/	JPI Climate et JPI Ocean	Réaliser un rapport mettant à jour l'état de la science autour de l'AMOC depuis le 6ème rapport du GIEC ainsi que les impacts potentiels sur les populations.
Royaume-Uni	Forecasting Tipping Points	2025-2030	81 M£	27 équipes	Identifier des signaux d'alerte précoce des points de bascule. Pour en savoir plus.
Allemagne	**TIPMIP** (tipping point modelling intercomparison project)			Institut de Postdam, institut Max Planck et Earth Commission	Identifier des signaux d'alerte précoce et étudier les risques associés au basculement simultané de plusieurs points de bascule climatique. Pour en savoir plus.
États-Unis	Quantifying Global and Regional Impacts of the AMOC Slowdown in the 21st century	2021-2026	324K€	Université de Yale (États-Unis)	Comprendre les impacts locaux et lointains du ralentissement de l'AMOC, notamment le refroidissement de la région nord-atlantique (North Atlantic Warming Hole). Pour en savoir plus.
	EXPLANATIONS *(Exploring AMOC controls on the North Atlantic carbon sink using novel inverse and data-constrained models)*	2024-2027	440K€	MIT (États-Unis)	Estimer plus finement les capacités de capture, transport et stockage du dioxyde de carbone dans l'Atlantique nord, ainsi que le rôle de l'AMOC dans la variabilité de ces capacités. Pour en savoir plus.

B – Documenter les implications sécuritaires des effets en cascade du ralentissement voire de l'effondrement de l'AMOC

L'adaptation des forces armées au basculement de l'AMOC doit s'appuyer à la fois sur **la mise en place de veilles et de partenariats** permettant **la détection éventuelle du passage du seuil du point de bascule** mais aussi **l'anticipation des effets en cascade**. Ceux-ci peuvent entraîner des répercussions économiques, politiques et géopolitiques. Ces répercussions sont peu documentées. Les travaux d'anticipation sécuritaire des conséquences de l'interruption de l'AMOC sont rares à l'échelle internationale. Les **institutions aux projets les plus développés se trouvent aux États-Unis et au Royaume-Uni**. Dans le contexte géopolitique prédominant au moment de la rédaction de cette note (désengagement des études climatiques de l'administration Trump), l'Union européenne, à travers la récente note du Centre commun de recherche de l'Union européenne, sera sans doute un acteur important dans les années à venir.

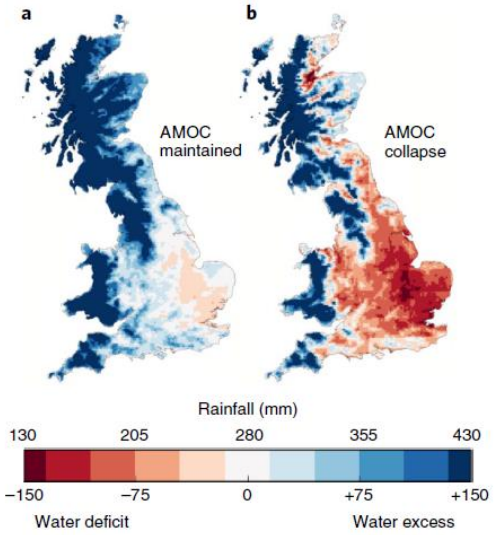
À travers la revue des conclusions et des approches des travaux existants, cette partie vise à proposer des **pistes de réflexions pour la cartographie des impacts de l'AMOC sur le territoire national français**. Ces travaux peuvent être de nature scientifique ou être issus de centres de prospective.

1. Pour commencer : l'exemple britannique

Le ralentissement voire l'effondrement de l'AMOC expose l'Europe à une diminution des rendements agricoles d'environ 30 % (Benton et *al.*, 2017). Pour autant, ce sont **les régions les plus septentrionales** qui seront les plus gravement affectées, ce qui a conduit à une étude scientifique (Ritchie *et al*., 2020) à s'intéresser aux effets d'un effondrement de l'AMOC sur le secteur de l'agriculture **au Royaume-Uni**. Cette étude nous semble utile à présenter en ce qu'elle illustre clairement l'intérêt d'obtenir davantage de données sur les impacts d'un ralentissement voire d'un effondrement de l'AMOC sur les secteurs agricoles ou industriels français.

Ces régions seront en effet exposées à une **diminution drastique des précipitations lors de la période de végétation** (cf figure 13).

Figure 13 – Bilan hydrique britannique en 2080 pendant la saison de croissance, avec irrigation disponible, selon les scénarios climatiques où l'AMOC est soit maintenue, soit effondrée

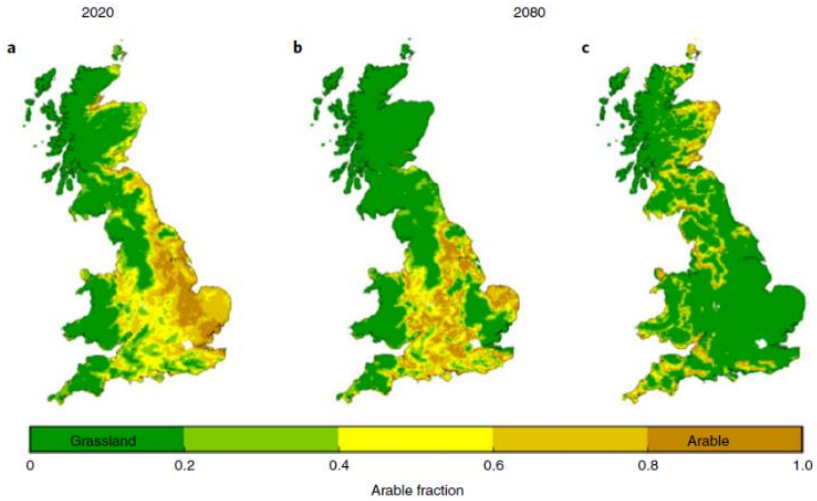


Déficits hydriques (<280 mm) durant la saison de croissance (avril à septembre) dans les zones où l'irrigation a lieu (en rouge), et zones avec excédent d'eau (>280 mm) (en bleu), pendant la saison de croissance. **Sur la carte (a), l'AMOC est maintenue**, tandis qu'elle est **effondrée sur la carte (b).**

Source : Ritchie et *al.,* 2020

L'effondrement de l'AMOC et la baisse drastique des précipitations associées sont liés sans équivoque à la **diminution de la surface des terres arables (de 32 % à 7 % de la surface totale des terres agricoles).** Ainsi, la figure 14 montre bien que les terres arables, représentées en marron, disparaissent quasiment totalement en 2080 dans un scénario de réchauffement global et d'effondrement de l'AMOC. **Les pertes économiques associées s'élèvent à près de 415 000 000 € par an** (Ritchie et *al.*, 2020).

Figure 14 – Facteurs limitants sur les terres arables liés à un effondrement de l'AMOC.



Source : Ritchie et al., 2020.

La carte (a) représente les terres arables en 2020.

Les deux cartes suivantes cherchent à isoler les variables climatiques (précipitations et températures) afin d'estimer celle dont l'impact serait le plus important en cas d'interruption de l'AMOC :

(b) Terres arables en 2080, températures liées à un effondrement de l'AMOC et précipitations correspondant à un scénario de réchauffement standard.

(c) Terres arables en 2080, températures basées sur un scénario de réchauffement standard et précipitations basées sur un effondrement de l'AMOC.

Figure 15 – Projections économiques du secteur de l'agriculture au Royaume-Uni en fonction d'un effondrement de l'AMOC

	Changement climatique progressif ; pas de changement technologique	Changement climatique progressif avec changement technologique	Changement climatique abrupt ; pas de changement technologique	Changement climatique abrupt avec changement technologique
AMOC	Maintenu	Maintenu	Effondrement	Effondrement
Irrigation	Non	Oui	Non	Oui
Valeur du changement agricole *(en millions de livres/an)*	40	125	−346	79
Coût de l'irrigation *(en millions de livres/an)*	0	−284	0	−807
Changement de valeur nette *(en millions de livres/an)*	40	−159	−346	−728

Source : Ritchie et al., 2020

Cette étude scientifique permet de visualiser les impacts de l'AMOC sur le secteur agricole et d'avoir un aperçu précis des répercussions sur les rendements. De tels travaux ne semblent pas exister à l'heure actuelle pour la France.

2. Géographie des travaux

Au vu de la prise en compte par d'autres États des répercussions d'un effondrement de l'AMOC, il nous a semblé utile de rassembler ici un **aperçu des travaux les plus intéressants**, de manière à **engager le même travail au niveau français**.

Aux États-Unis, ce sont les administrations publiques qui ont porté la thématique. Ainsi, le Département de la Défense étatsunien, à travers le conseiller aux affaires étrangères Andrew Marshall, a commandé **dès les années 2000** une étude sur l'impact d'un effondrement de l'AMOC, le rapport des prospectivistes Schwartz et Randall, 2003. Cela a été suivi par un rapport du National Intelligence Council en 2021 (2021).

Sur le continent européen, l'effondrement de l'AMOC a été signalé comme un sujet d'importance majeur auprès **du gouvernement britannique** (Moulsecoomb, 2024), ainsi qu'au **conseil des ministres scandinaves** (Rahmstorf et *al.*, 2024b). Dans le premier cas de figure, une question parlementaire a été adressée au département de la sécurité énergétique et de l'objectif net zéro du gouvernement concernant **l'évaluation sur les risques sécuritaires induits par l'effondrement potentiel de l'AMOC d'ici la fin du siècle.** Toujours au Royaume-Uni, certains *think tanks* ont travaillé sur le sujet, notamment à travers la publication d'un

rapport récent (octobre 2024), rédigé par des chercheurs de **Chatham House**, de l'Institut des Systèmes Globaux de **l'Université d'Exeter**, et de deux autres *think tanks* implantés au Royaume-Uni (Strategic Climate Risks Initiative et Institute for Public Policy Research) (Laybourne et *al.*, 2024). Les universités britanniques sont également très actives. Ainsi, au-delà du projet initié par l'ARIA (Agence de recherche stratégique britannique), Timothy Lenton (Université d'Exeter), chercheur référent sur les enjeux de points de bascule climatique, a ainsi dirigé une **méta-étude (répertoriant l'état de l'art scientifique) faisant date,** publié en 2023 et financé par le Fond Bezos pour la planète (Lenton et *al.*, 2023).

Concernant le conseil des ministres scandinaves, **une lettre d'alerte signée par 43 scientifiques** souligne le risque majeur que représente le passage des points de bascule en général, et l'AMOC en particulier. Les auteurs insistent sur la probabilité croissante d'un effondrement de l'AMOC dans les prochaines décennies au vu des dernières publications scientifiques, et des conséquences dévastatrices, quoiqu'encore mal caractérisées, pour l'Europe du Nord.

Enfin, au **niveau européen**, une note de politique publique (*policy brief*) a été rendue publique le 28 février 2025 par le **Centre commun de recherche de l'Union européenne** (Joint Research Center) en coopération avec l'Université d'Olso et l'Institut de Postdam pour la recherche sur les impacts du climat (Potsdam Institute for Climate Impact Research – PIK) (Roman-Cuesta et *al.*, 2025). Elle vient compléter **un rapport** portant sur les points de bascule et les risques géopolitiques associés publié par le ***think tank* E3G en 2022** et financé par la fondation suédoise pour la recherche stratégique sur l'environnement (Dimsdale, 2022).

3. Scénarii des travaux

Les travaux mentionnés précédemment font face aux mêmes difficultés que cette note : la faible disponibilité des données sur les effets en cascade de l'AMOC et l'incertitude concernant à la fois la temporalité d'un passage de seuil et la durée de transition. Ils proposent donc des scénarii, pour permettre aux lecteurs de mieux comprendre les effets en cascade de l'AMOC.

Le rapport des prospectivistes Schwartz et Randall (2003) exprime clairement son objectif : « our aim is to **further the strategic conversation** rather than to accurately forecast what is likely to happen with a high degree of certainty. Even the most sophisticated models cannot predict the details of how the climate change will unfold […]. There appears to be general agreement in the scientific community that **an extreme case like the one depicted below is**

not implausible[13].». Il propose des scénarii tels que des **tensions autour des ressources hydriques**, notamment liées au Rhin, entre la France et l'Allemagne ; une **émigration massive des populations septentrionales de l'Europe vers le sud et les États-Unis**, menant à des tensions et des politiques de régulation migratoire ou encore des répercussions sur le prix des énergies et le **déploiement d'opérations de sécurisation des approvisionnements**. Ces scénarii ont suscité de vives réactions de la presse et de l'opinion publique (Kempf, 2005).

Le *Global Tipping Point Report* dirigé par Timothy Lenton (2023) est une recension scientifique des principaux travaux ayant traits aux points de bascule. Ce rapport propose un scénario d'effondrement de l'AMOC, qui se manifesterait en quelques décennies. Le refroidissement de l'Europe engendré par cet effondrement serait d'abord perçu comme un soulagement par l'opinion publique. Cependant, **la rapide dégradation des conditions d'habitabilité provoquerait un ressentiment croissant des populations** qui dénonceraient l'incapacité des gouvernements à préparer la survenue de tels événements. La succession d'aléas et ce ressentiment conduiraient à une **dégradation profonde de la stabilité des sociétés**, qui s'enfermeraient dans des « cercles vicieux qui entament sérieusement les perspectives de la civilisation humaine ». (Lenton et *al*, 2023. p. 192)

Enfin, sans proposer de scénario, le rapport d'évaluation du National Intelligence Council étatsunien (2021) étudiant les risques des changements climatiques sur la sécurité nationale reconnaît que l'effondrement de l'AMOC constitue **un des cas de figures qui pourrait fondamentalement bouleverser leurs évaluations géopolitiques**. Ainsi, le risque croissant de l'occurrence d'un tel évènement pourrait **brutalement accélérer les efforts de l'action climatique**, et ainsi bouleverser les **équilibres de puissance** en fonction du niveau de préparation préalable des Etats à une transition écologique rapide.

4. Conclusions

L'anticipation des conséquences d'un effondrement de l'AMOC sur le cycle DORESE du ministère des Armées passerait notamment par **1) la mise en place d'une cellule de veille** au sein de directions stratégiques et d'anticipation, ou d'une direction scientifique telle que le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (Shom). Les projets listés dans la Figure 12 peuvent constituer une base de réflexion initiale pour l'élaboration de cette veille. Une telle cellule doit travailler sur les signaux d'alerte précoce et leurs évolutions, les connaissances relatives à la temporalité de la transition de l'AMOC ou encore les

[13] « Notre objectif est de faire progresser la réflexion stratégique plutôt que de chercher à faire des prévisions précises de ce qui a de grandes chances d'advenir. Même les modèles mathématiques les plus sophistiqués ne peuvent prévoir précisément l'évolution du changement climatique […]. Or, il semble y avoir un consensus au sein de la communauté scientifique sur le fait qu'un scénario extrême tel que celui présenté ci-dessous n'est pas à exclure. » Traduction par les auteurs de la présente note d'un passage du rapport Schwartz & Randall, 2003.

conséquences d'un tel effondrement. Le renforcement de l'anticipation des conséquences de l'AMOC doit également considérer **2) le financement ou la commande d'études sur les répercussions socio-économiques** du passage d'un point de bascule. Enfin, **3) l'intégration des points de bascule climatique** par des institutions telles que **RADAR/RED TEAM** peut permettre d'approcher les enjeux par de nouvelles méthodologies et d'explorer différents scénarii qui s'accompagneraient de réflexions à l'échelle décisionnelle.

Conclusion générale

Cette note opérationnelle sur les conséquences sécuritaires d'un arrêt de l'AMOC s'inscrit dans une série plus large qui vise à **exposer les principaux enjeux de sécurité associés aux différents points de bascule climatiques identifiés par le GIEC**. À travers le modèle proposé d'intégration des points de bascule aux réflexions stratégiques, ces différentes notes auront pour objectif de **couvrir un angle mort des études liant enjeux climatiques et de sécurité**. Ce faisant, cette série doit donc participer à nourrir les capacités d'anticipation stratégique des armées françaises sur les questions climatiques.

Ce premier travail doit permettre **une visualisation rapide des conséquences potentielles d'un arrêt de l'AMOC**, tant en termes économiques que politiques et géopolitiques. Les infographies et cartes démontrent bien, en parallèle des chiffres et des scénarii issus de multiples travaux, que l'effondrement de l'AMOC pourrait déstabiliser la sécurité énergétique de l'Europe du Nord et de l'Ouest, sa sécurité alimentaire, mais également **remettre en cause des enjeux de défense cruciaux tels que l'efficacité des capacités de défense et d'attaque sous-marine**. Dès lors, il convient d'établir des mécanismes de suivi des résultats scientifiques sur ce sujet et d'élaborer des scénarii de réponse à de telles perturbations.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Points de bascule : définition et typologie

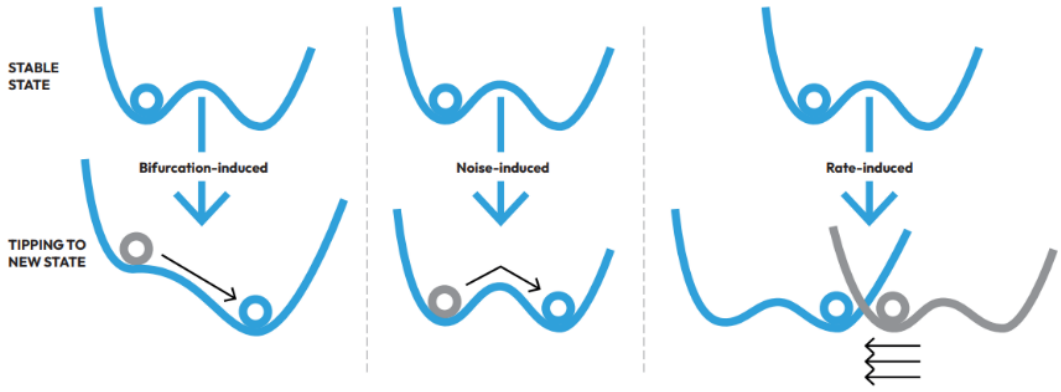
Lorsqu'un système est perturbé, on assiste à une perte de résilience de celui-ci. Dès lors, différents mécanismes de basculement peuvent s'enclencher (Lenton et *al.*, 2023).

On peut généralement considérer **quatre états** pour comprendre les mécanismes d'un point de bascule (Harper et *al.*, 2024), à savoir un **état initial stable**, un **état à l'instabilité croissante** dû à des pressions externes, le **point de bascule** qui conduit enfin à un **nouvel état de stabilité**.

Les mécanismes de basculement peuvent se mettre en œuvre :

- **Par bifurcation** : Les pressions externes conduisent à un changement suffisant des caractéristiques du système pour que celui-ci quitte son état de stabilité initial. Dans ce cas de figure, les boucles de rétroactions entretiennent et accentuent le phénomène de basculement.
- **Par le bruit** : Dans un système soumis à des pressions externes mais n'ayant pas encore atteint un seuil de rupture, la variation de leur intensité peut suffire à pousser le système dans un nouvel état de stabilité. Le retour à la normale des pressions ne permet pas de retrouver l'état initial du système, malgré la persistance de ses caractéristiques.
- **Par l'intensité des pressions** : Le changement brutal de l'intensité des pressions externes, qui dépassent les capacités d'amortissement du système, peut entraîner un basculement de ce dernier.

Figure 16 – Différents types de basculement



Source : Lenton et al., 2023

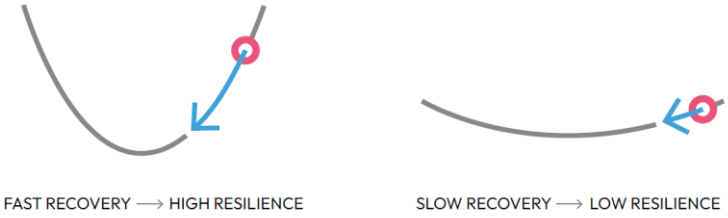
ANNEXE 2 : Méthodologies d'anticipation du basculement

Pour **anticiper le seuil de passage d'un point de bascule**, il convient de présenter la théorie du ralentissement critique, qui constitue la principale méthode **d'évaluation de stabilité** d'un système donné. Celle-ci cherche à en **étudier les caractéristiques dans le temps et/ou dans l'espace**, afin de déceler le potentiel rapprochement vers le seuil de basculement. Nous introduirons ensuite les différentes formes d'application de cette théorie, à travers les concepts d'autocorrélation, d'analyse spatiale et d'analyse structurelle.

Théorie du ralentissement critique

Cette théorie repose sur le raisonnement suivant : à mesure qu'un système approche un point de bascule, le temps nécessaire pour que celui-ci retrouve son état initial après avoir subi une perturbation augmente. Les deux notions qui la soutiennent sont **la perte de résilience**, qui correspond, pour une perturbation donnée, à une **augmentation du temps de retour à l'état initial**. La **variance** correspond quant à elle à une **augmentation de l'amplitude des réactions du système pour une perturbation donnée** (Drake et al, 2020). Les limites de cette théorie reposent principalement sur la nécessité d'un état initial ainsi que d'un élément perturbateur clairement définis. Plusieurs méthodes peuvent être employées pour détecter un ralentissement critique.

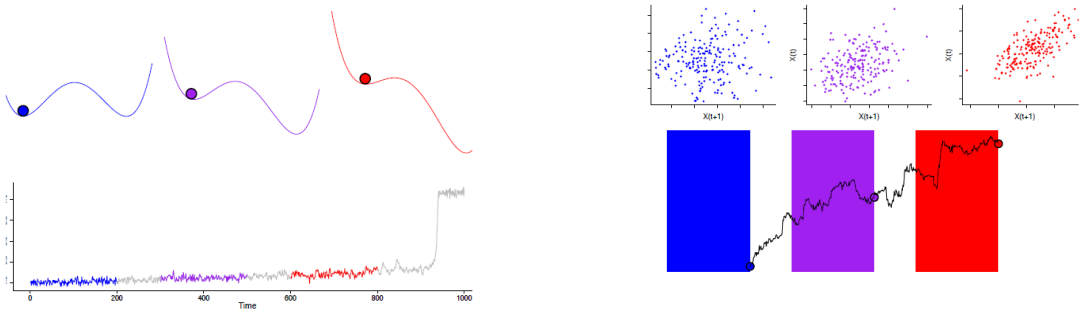
Figure 17 – Représentation schématique du ralentissement critique



Source : Lenton et al., 2023. Global Tipping Point Report

Figure 18 – Autocorrélation

La concentration progressive des nuages de points représentés sur la partie supérieure droite exposent la corrélation croissante entre l'état actuel du système et sa situation préalable.



Source : Lenton et al., 2023. Global Tipping Point Report.

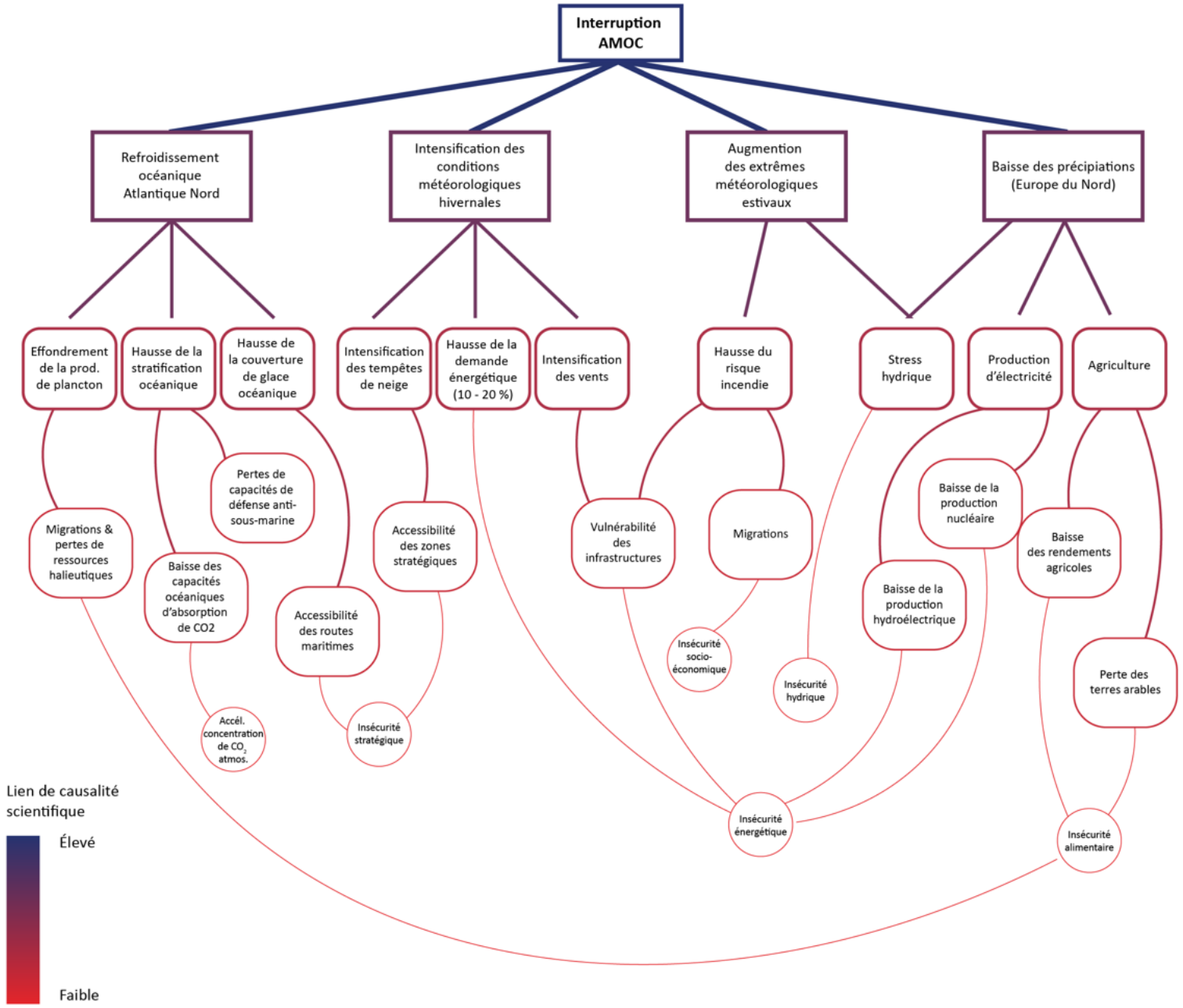
Autocorrélation
Cette approche consiste à analyser l'évolution temporelle d'un système. À mesure que ce dernier s'approche d'un point de bascule, son état est davantage dépendant de sa situation préalable (Dakos et al., 2024). Cette méthode implique la disponibilité de séries de données suffisamment complètes sur une échelle de temps cohérente avec le système étudié pour pouvoir en analyser les évolutions.

Analyse spatiale
Cette approche cherche à **se substituer à la dimension temporelle** précédemment présentée par une **analyse de l'organisation du système dans l'espace**. De nombreux systèmes présentent des caractéristiques spatiales qui permettent d'accroître leur résilience (Dakos et al., 2024). Par exemple, la répartition d'infrastructures énergétiques sur un territoire peut accroître ou limiter son exposition à certains types de risques. Cette méthode présente l'avantage de ne pas reposer sur des séries de données temporelles conséquentes (et donc chronophages à constituer). En revanche, **elle permet uniquement de capturer l'état d'un système à un instant donné.**

Analyse structurelle
La définition des éléments qui composent un système ainsi que leurs interactions peut également constituer un outil d'analyse de la propension de ce dernier à basculer vers un nouvel état de stabilité. Cette méthode repose d'abord sur une **phase de caractérisation des interactions** entre les composantes du système étudié (Lenton et al., 2023). Celle-ci permet ensuite de conduire une **analyse temporelle de l'évolution de ces interactions**, autrement dit la réorganisation du réseau lorsque celui-ci est mis sous contrainte.

Ces approches méthodologiques structurent l'étude des points de bascule climatique. Ces différentes analyses permettent en effet d'éclairer **les grands marqueurs de l'approche d'un seuil** au-delà duquel le système climatique se transforme irréversiblement.

ANNEXE 3. Effets en cascade de l'interruption de l'AMOC et des incertitudes associées



Source : auteurs

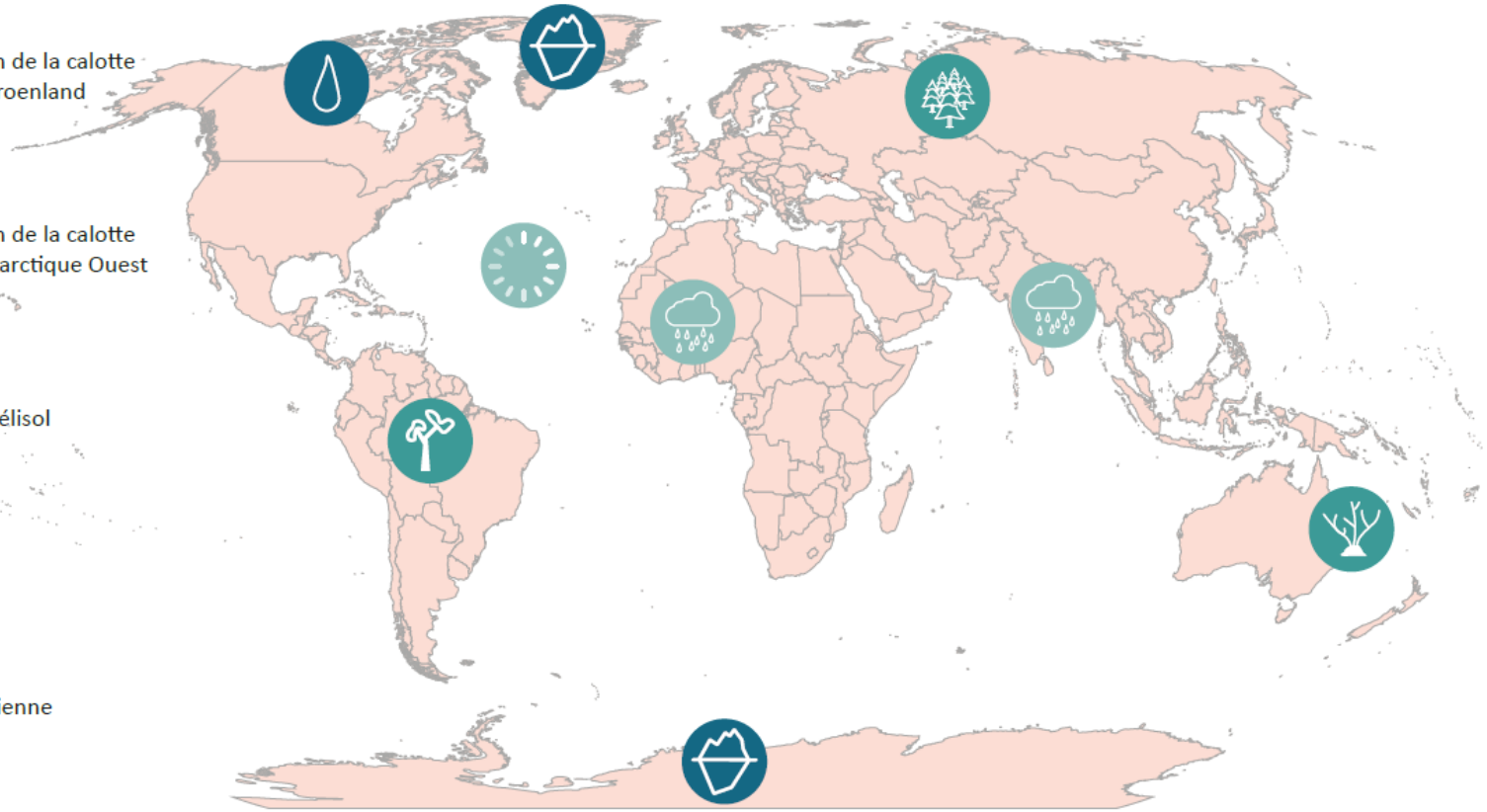
ANNEXE 4. Carte : Les points de bascule climatique globaux identifiés par le GIEC

Fonte et dégel

- Désintégration de la calotte glaciaire du Groenland
- Désintégration de la calotte glaciaire d'Antarctique Ouest
- Dégel du pergélisol

Changement de biome

- Forêt amazonienne
- Forêt boréale
- Blanchissement du corail



Changement dans les circulations

- Ralentissement voire arrêt de l'AMOC
- Changement dans la mousson ouest-africaine
- Changement dans la mousson indienne

Sources : GIEC

BIBLIOGRAPHIE

Articles scientifiques et autres analyses

Abot, L., Provost, C., & Poli, L. (2023). Recent convection decline in the Greenland Sea: Insights from the Mercator ocean system over 2008–2020. Journal of Geophysical Research: Oceans, 128, e2022JC019320. https://doi.org/10.1029/2022JC019320

Armstrong McKay, D. I., Staal, A., Abrams, J. F., Winkelmann, R., Sakschewski, B., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockström, J., & Lenton, T. M. (2022). Exceeding 1.5 C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377(6611), eabn7950. https://doi.org/https://doi.org/10.1126/science.abn7950

Andrea G., Mauro G., Antonio R., Aniello R., and Sandro C. . (2022, 4 mars).*Climate Change and Military Power: Hunting for Submarines in the Warming Ocean*, Texas National Security Review. https://doi.org/10.26153/tsw/52240

Benton, T.G. (2020). Running AMOC in the farming economy. *Nat Food*. 1, 22–23 . https://doi.org/10.1038/s43016-019-0017-x

Ben-Yami, M., Good, P., Jackson, L. C.,Crucifix, M., Hu, A., Saenko, O., et *al.* (2024). Impacts of AMOC collapse on monsoon rainfall: A multi-model comparison. *Earth's Future*, 12, e2023EF003959. https://doi.org/10.1029/2023EF003959

Ben-Yami, M., Loriani, S., Fetzer, I., Cornell, S. E., Rockström, J., & Lenton, T. M. (2024). Uncertainties too large to predict tipping times of major Earth system components from historical data. Science Advances, *10*(32), eadl4841. https://doi.org/10.1126/sciadv.adl4841

Boot, A. A., Steenbeek, J., Coll, M., von der Heydt, A. S., & Dijkstra, H. A. (2025). Global marine ecosystem response to a strong AMOC weakening under low and high future emission scenarios. *Earth's Future*, 13(1), e2024EF004741. https://doi.org/10.1029/2024EF004741

Buckley, M. W. and J. Marshall (2016), Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review, *Rev. Geophys.*, *54*, 5–63, doi:10.1002/2015RG000493

Dakos, V., Boulton, C. A., Buxton, J. E., Abrams, J. F., Arellano-Nava, B., Armstrong McKay, D. I., Bathiany, S., Blaschke, L., Boers, N., Dylewsky, D., López-Martínez, C., Parry, I., Ritchie, P., van der Bolt, B., van der Laan, L., Weinans, E., & Kéfi, S. (2024). Tipping point detection and early warnings in climate, ecological, and human systems. *Earth System Dynamics*, 15(4), 1117–1135. https://doi.org/10.5194/esd-15-1117-2024

Drake, J. M., O'Regan, S. M., Dakos, V., Kéfi, S., Rohani, P., Drake, J. M., O'Regan, S. M., Dakos, V., Kéfi, S., and Rohani, P. (2020). Alternative stable states, tipping points, and early warning signals of ecological transitions, in: *Theoretical Ecology: Concepts and Applications*, edited by: McCann, K. S. and Gellner, G., Oxford University Press, 263–284, https://doi.org/10.1093/oso/9780198824282.003.0015

Drijfhout, S. (2015) Competition between global warming and an abrupt collapse of the AMOC in Earth's energy imbalance. *Sci Rep,* 5, 14877. https://doi.org/10.1038/srep14877

Hald-Mortensen, C. (2024). Applying the Rumsfeld Matrix: Unknown Unknown Climate Risks in an AMOC Collapse Scenario. *Journal of Ecology & Natural Resources*, 8(1): 000364.

Jackson, L. C., Beadling, R. L., Danabasoglu, G., Mecking, J. V., Hirschi, J. J.-M., Robson, J. I., ... & Wood, R. A. (2023). Challenges simulating the AMOC in climate models. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 381(2265), 20220187. https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0187

Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *105*(6), 1786–1793. https://doi.org/10.1073/pnas.0705414105

Liu, W., Fedorov, A. (2022). Interaction between Arctic Sea ice and the Atlantic meridional overturning circulation in a warming climate. *Clim Dyn,* 58, 1811–1827. https://doi.org/10.1007/s00382-021-05993-5

Mouginot J. et al. (2019). "Forty-six years of Greenland Ice Sheet mass balance from 1972 to 2018", *Proc. Natl. Acad. Sci*. 116 (19) 9239-9244, https://doi.org/10.1073/pnas.1904242116 (2019).

Rahmstorf, S. (2024a). "Is the Atlantic Overturning Circulation Approaching a Tipping Point?" *Oceanography*. https://doi.org/10.5670/oceanog.2024.501

Shearer, A.-W. (2005). Whether the weather: comments on 'An abrupt climate change scenario and its implications for United States national security', *Futures,* 37, 445–463.

Tagliabue, A., Kwiatkowski, L., Bopp, L., Butenschön, M., Cheung, W., Lengaigne, M. and Vialard, J. (2021). Persistent Uncertainties in Ocean Net Primary Production Climate Change Projections at Regional Scales Raise Challenges for Assessing Impacts on Ecosystem Services. *Frontiers in Climate*. 3:738224. doi :10.3389/fclim.2021.738224

van Westen, R. M., Kliphuis, M., & Dijkstra, H. A. (2024). Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course. Science Advances, 10(6), eadk1189. https://doi.org/10.1126/sciadv.adk1189

Zimmerman, C. C., Wagner, T. J. W.,Maroon, E. A., & McNamara, D. E. (2025). Slowed response of Atlantic meridional overturning circulation not a robust signal of collapse. *Geophysical Research Letters*, 52, e2024GL112415. https://doi.org/10.1029/2024GL112415

Rapports, notes et documents institutionnels

Collins M., M. Sutherland, L. Bouwer, S.-M. Cheong, T. Frölicher, H. Jacot Des Combes, M. Koll Roxy, I. Losada, K. McInnes, B. Ratter, E. Rivera-Arriaga, R.D. Susanto, D. Swingedouw, and L. Tibig, 2019: Extremes, Abrupt Changes and Managing Risk. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 589–655. https://doi.org/10.1017/9781009157964.008.

De Guglielmo Weber, M., Kabbej, S., Boutang, L. (2023). Géo-ingénierie solaire : Enjeux géostratégiques et de défense. *Observatoire Défense et Climat*. https://defenseclimat.fr/wp-content/uploads/2023/11/Note_5_Obs-DC_Geo-ingenierie_VF.pdf

Dimsdale, T., Cecilio, C. et Benomar, I. (2022). *Living on the edge: how climate tipping points will reshape geopolitics*.

Duffau, E., Jourde, M., Collet, M. (2024). Les enjeux sécuritaires du stress hydrique en Europe du Sud. *Observatoire Défense et Climat*. https://defenseclimat.fr/wp-content/uploads/2024/11/note_7_fr.pdf

GIEC, 2018 = Hoegh-Guldberg, O., et *al.* (2018). *Impacts of 1.5ºC Global Warming on Natural and Human Systems. In: Global Warming of 1.5°C*. University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 175-312.

GIEC, 2019 = Collins M., et *al* (2019): Extremes, Abrupt Changes and Managing Risk. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA,pp. 589–655. https://doi.org/10.1017/9781009157964.008

GIEC, 2021 = Masson-Delmotte et *al.* (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896

Kuhlbrodt, T., Titz, S., Feudel, U. et al. (2001). « A simple model of seasonal open ocean convection", *Ocean Dynamics* 52, 36–49

Lenton, T.M., Armstrong McKay, D.I., Loriani, S., Abrams, J.F., Lade, S.J., Donges, J.F., Milkoreit, M., Powell, T., Smith, S.R., Zimm, C., Buxton, J.E., Bailey, E., Laybourn, L., Ghadiali, A., Dyke, J.G. (2023). *The Global Tipping Points Report 2023*. University of Exeter, Exeter, UK. https://global-tipping-points.org/resources-gtp/

Laybourne et al. (2024). *The security blind spot, cascading climate impacts and tipping points threaten national security*. https://ippr-org.files.svdcdn.com/production/Downloads/The-security-blind-spot-October-24_2024-10-14-121035_uryr.pdf?dm=1728907836

Ministère des Armées, 2022, *Stratégie Climat & Défense*.

National Intelligence Council. (2021). Climate Change and International responses increasing challenges to US National Security through 2040. *Office of the director of the National Intelligence Council*. NIC-NIE-2021-10030-A https://www.dni.gov/files/ODNI/documents/assessments/NIE_Climate_Change_and_National_Security.pdf

Organisation de Coopération et de Développement Economique (2021). *Gérer les risques climatiques et faire face aux pertes et dommages.* Éditions OCDE, Paris, https://doi.org/10.1787/be5c2857-fr

OTAN (2024) *NATO Climate Change and Security Impact Assessment (Third edition 2024)*. https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2024/7/pdf/240709-Climate-Security-Impact.pdf

Ritchie, P.D.L., Smith, G.S., Davis, K.J. *et al.* Shifts in national land use and food production in Great Britain after a climate tipping point. *Nat Food,* 1, 76–83 (2020). https://doi.org/10.1038/s43016-019-0011-3

Roman-Cuesta, R. M., et al (2025). *Earth System Tipping Points are a threat to Europe*, Science for Policy Brief, JRC140827.

Schwartz, Peter et Randall, Doug. (2003). *An Abrupt Climate Change Scenario and Its Implications for United States National Security*.

Actualités, Presse et Revues

Kempf, H., (2006, 10 février). « Le scénario climatique d'apocalypse. . . que voulait cacher le Pentagone », *Le Monde*.

Rahmstorf, S., Uotila, P., & 44 leading experts on ocean circulation. (2024b, October 19). *Open letter by climate scientists to the Nordic Council of Ministers*. https://en.vedur.is/media/ads_in_header/AMOC-letter_Final.pdf

Cailloce, L., (2021) « Ne l'appelez plus jamais Gulf Stream », *CNRS le journal*. https://lejournal.cnrs.fr/articles/ne-lappelez-plus-jamais-gulf-stream

Pages internet

Encyclopedia Universalis, Jean-Pierre Chalon, *Atmosphère*, https://www.universalis.fr/encyclopedie/atmosphere-la-couche-atmospherique-terrestre/

GIEC. (2007). *Rapport de synthèse du quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/fr/mainsrds-1.html

National Preparedness Commission. (2024). *Blind spots on climate tipping points reveal complacency on climate change security threats*. https://nationalpreparednesscommission.uk/publications/blind-spots-on-climate-tipping-points-reveal-complacency-on-climate-change-security-threats/

United Kingdom Parliament, written questions, answers and statements. (2024) *Climate Change: Atlantic Ocean. Question for Department for Energy Security and Net Zero.* https://questions-statements.parliament.uk/written-questions/detail/2024-09-02/hl634

L'ANALYSE DES ENJEUX SÉCURITAIRES ET DE DÉFENSE LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

PUBLICATIONS | PODCAST « SUR LE FRONT CLIMATIQUE » | ÉVÈNEMENTS

OBSERVATOIRE Défense & Climat

www.defenseclimat.fr