

Projet AMIGAS (Région/SAD 2020)

Pierre Tandeo, enseignant-chercheur, IMT Atlantique et Lab-STICC

Titre

“Analog Methods to Identify Global Atmospheric Simulations” ou “Méthodes analogues pour l’identification de simulations atmosphériques globales”.

Résumé

Décrire avec précision l'évolution future du climat est une question et un défi clés pour la communauté scientifique. Pour anticiper les changements climatiques, des simulations globales du système terrestre sont fournies par plusieurs agences environnementales nationales. Ces simulations sont issues de modèles climatiques, qui diffèrent principalement selon les paramétrisations représentant des processus non résolus comme par exemple, la convection océanique ou la dynamique des nuages. De plus, les projections climatiques sont évaluées, pour chaque modèle climatique, selon une gamme de scénarios d'émission de gaz à effet de serre possibles pour le futur. La réponse de ces modèles climatiques à ces scénarios d'émission, ainsi que la variabilité interne et externe du système, conduit à une large incertitude des projections climatiques pour les prochaines décennies. **Ce projet AMIGAS vise à réduire l'incertitude des projections climatiques décennales en extrayant les projections les plus probables à partir de métriques climatiquement pertinentes.** En pratique, ces métriques climatiques sont faciles à manipuler et à extraire des simulations numériques. Nous profiterons également du fait que certaines de ces métriques sont surveillées depuis plusieurs années par des réseaux de mesures in situ ou par satellites. Un exemple emblématique est la température de surface atmosphérique qui, moyennée à l'échelle du globe, a montré le réchauffement climatique du siècle dernier. On peut aussi penser à des métriques plus en adéquation avec les demandes socio-économiques comme la température moyennée sur l'Europe, ou encore les précipitations et l'activité des tempêtes. Dans le but d'extraire les projections les plus probables (par rapport à une gamme de paramètres climatiques observés, comme la température de surface atmosphérique), **le projet AMIGAS évaluera la probabilité de chaque simulation et lui attribuera un poids. A partir de ces poids, il sera ensuite possible de proposer une gamme de projections pondérée avec un degré d'incertitude réduit** et donc de fournir une projection probabiliste optimale. Le critère pour calculer les probabilités, et donc les poids, est l'adéquation entre les observations et les simulations climatiques. Ici, la probabilité de chaque modèle est calculée à l'aide de techniques d'assimilation de données, en se basant sur des outils de la théorie des événements extrêmes. Dans ce projet AMIGAS, l'idée est d'utiliser des simulations atmosphériques globales déjà existantes (à partir des bases de données CMIP5 et CMIP6) et la méthode par analogues pour éviter d'effectuer de nouvelles simulations de

modèles, comme cela est fait en assimilation de données classique. En effet, la méthode des analogues est capable de produire des prévisions à faible coût à partir de données historiques et peut directement prévoir une métrique climatique, sans avoir à passer par l'état complet du système. Enfin, la prévision par analogues peut être facilement interfacée avec des méthodes d'assimilation de données pour calculer les probabilités de chaque modèle, dans le but de fournir les projections les plus probables.

Projet de recherche

Simulations et scénarios climatiques - Dans ce projet AMIGAS, nous utiliserons les **simulations climatiques du projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP)**. Ces simulations numériques sont produites en résolvant des équations physiques représentant le système terrestre (Eyring et al., 2016). Cependant, l'évolution du système climatique est très incertaine pour plusieurs raisons (Hawkins et Sutton, 2009). Aux échelles de temps interannuelles, la principale source d'incertitude est le comportement chaotique du système, ce qui signifie que l'évolution peut être différente lorsque les conditions initiales sont légèrement perturbées. À des échelles de temps décennales, les modèles sont principalement sensibles aux paramètres physiques qui contrôlent divers schémas physiques, mis en œuvre pour représenter la dynamique manquante. À l'échelle centenaire, la principale source d'incertitude est l'activité humaine. Il correspond à un terme de forçage externe du système terrestre et est principalement dû aux gaz à effet de serre, principalement le CO₂ et le CH₄. Pour quantifier l'incertitude associée à l'activité humaine et aux politiques, et pour mieux comprendre son impact sur le système climatique, CMIP fournit une gamme de simulations utilisant plus de 20 modèles et quatre scénarios d'émissions de gaz à effet de serre différents (Meinshausen et al., 2011). Ces scénarios vont du plus optimiste, où les rejets d'émissions sont réduits de façon rapide et significative, au cas "business as usual", où aucun effort à l'échelle internationale n'est supposé. Les simulations CMIP montrent que le climat de la fin du 21^{ème} siècle est contrôlé par ces scénarios et donc par ces émissions humaines. Mais, dans la pratique, même si l'on connaît bien les émissions de gaz à effet de serre, il est difficile de savoir quel scénario climatique nous suivons actuellement et quels modèles représentent correctement la dynamique du système terrestre. Dans ce projet AMIGAS, **nous évaluerons les modèles et les scénarios les plus probables pour une gamme de métriques climatiques atmosphériques observés**. Cela nous permettra de réduire l'incertitude et de projeter l'évolution future de ces métriques au cours du 21^e siècle.

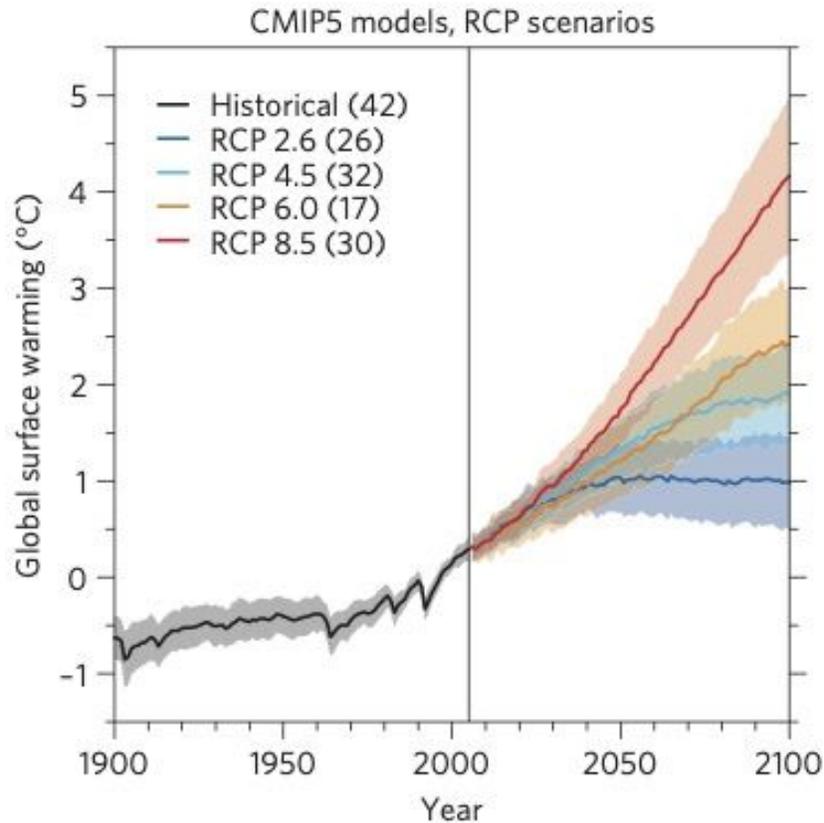


Figure 1 : Anomalies de température de surface atmosphérique moyennée sur le globe, pour la période historique 1900-2005 et pour les projections 2005-2100, selon plusieurs scénarios et modèles climatiques : en considérant une réduction significative des gaz à effet de serre (bleu) en passant par le scénario "business as usual" (rouge). Les traits représentent les moyennes et les aplats représentent les incertitudes des projections. Source : Knutti et Sedláček, Nature Climate Change, 2013.

Métriques climatiques atmosphériques - Les métriques climatiques que nous allons considérer seront basées sur leur importance environnementale et socio-économique. Ainsi, la métrique la plus emblématique de réchauffement climatique est la température de surface atmosphérique moyennée sur le globe. Son évolution probable est donnée en figure 1, montrant une grande disparité de valeurs, par exemple entre +0.5°C et +5°C degrés pour l'horizon 2100. Cette large incertitude est principalement conditionnée par les différents scénarios climatiques. De plus, au sein d'un même scénario, la température de surface atmosphérique moyennée sur le globe peut être significativement différente entre différents modèles, comme par exemple une variation de +3.5°C à +5°C pour le scénario "business as usual" (RCP 8.5). Néanmoins, il convient de ne pas s'arrêter à la température globale, puisque cette métrique ne différencie pas quand et où ces changements auront vraisemblablement lieu. Ceci est illustré en figure 2 (panel de gauche) où l'on peut voir, pour le scénario "business as usual", des différences saisonnières et régionales importantes de changements de températures pour la fin du 21ème siècle.

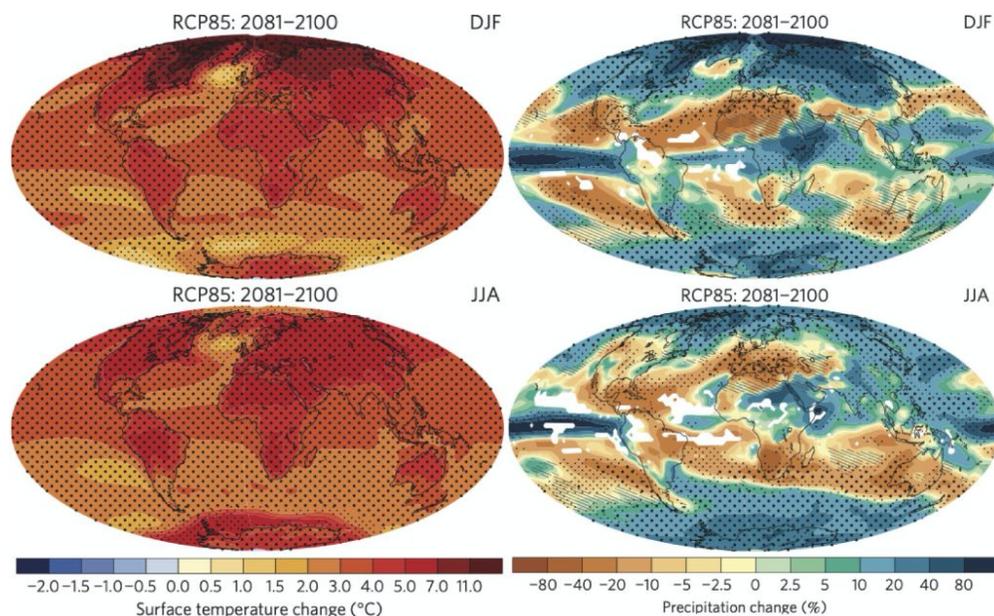


Figure 2 : Anomalies de température de surface atmosphérique (gauche) et de précipitation (droite) moyennées, pour la fin du siècle par rapport à la période préindustrielle. La projection suit le scénario "business as usual" avec en haut la projection de l'hiver (DJF, Décembre-Janvier-Février) et en bas de l'été (JJA, Juin-Juillet-Août). Les hivers européens apparaissent plus chauds et humides tandis que les étés apparaissent plus chauds et plus secs. Source : Knutti and Sedláček, Nature Climate Change, 2013.

Dans ce projet AMIGAS, nous étudierons plus précisément la **température de surface moyennée sur l'Europe de l'ouest et sur la saison hivernale et estivale** (indicatif de la rigueur des hivers et des vagues de chaleur d'été). Au-delà de la température, nous regarderons d'autres métriques climatiques qui ont un impact environnemental et socio-économique démontré. Dans ce cadre, nous pouvons citer le taux de précipitations, donné en figure 2 (panel de droite). Il est intéressant de noter que les projections suggèrent que l'Europe va vers des étés plus chauds et secs. De plus, nous notons des précipitations hivernales plus importantes dans le futur, ceci étant possiblement lié à une augmentation du nombre et de l'intensité des tempêtes. Ces changements climatiques préconditionnent l'apparition d'événements extrêmes (comme les vagues de chaleur décennales, Sévellec et al., 2016). Ainsi, le risque de périodes de réchauffements décennaux (appelé "surge") a augmenté au cours du dernier siècle et risque de devenir la norme pour la fin du siècle (voir la figure 3, panels du haut). En parallèle, les chances d'un refroidissement décennal, même modéré, disparaissent pour la fin du siècle. A l'échelle régionale, le réchauffement climatique rend l'Europe particulièrement propice à un réchauffement climatique soutenu (voir la figure 3, panel du bas). Tout ceci pose la question de la résilience des écosystèmes et de la société face à **l'effet combiné des tendances et des événements météorologiques sévères ou extrêmes**, tel que les tempêtes ou les vagues de chaleur, dont **l'impact est particulièrement à surveiller en région Bretagne**.

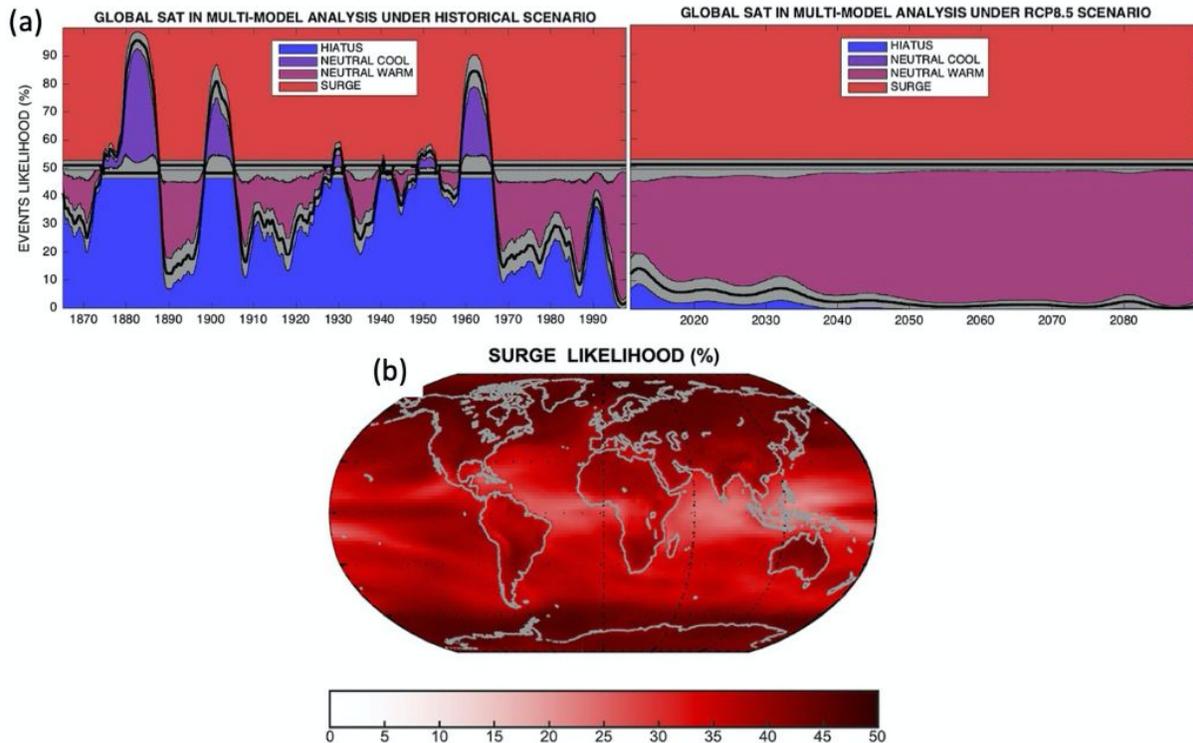


Figure 3 : Variations de la vraisemblance des réchauffements ("surge") et refroidissements ("hiatus") décennaux de la température moyenne globale pendant la période historique (1860-2000, en haut à gauche) et en suivant le scénario "business as usual" (2000-2100, en haut à droite). Variation spatiale de la probabilité des réchauffements décennaux ("surge") sur la période de projection 2000-2100 suivant le scénario "business as usual" (en bas). L'Europe apparaît particulièrement propice à ces vagues de chaleur décennales, avec une intensité potentiellement 10 fois plus forte que le réchauffement global du dernier siècle (~1°C). Source : Sévellec et al., Geophysical Research Letter, 2016.

Vraisemblance des différents modèles et scénarios - La question scientifique dans ce projet AMIGAS est : **sur la base de métriques climatiques données, comment inférer qu'un scénario climatique et un modèle sont plus probables qu'un autre ?** Mathématiquement parlant, ceci nécessite de calculer la probabilité que les observations actuelles correspondent à la distribution de chaque scénario et modèle. Ce calcul de ces probabilités se fait naturellement dans les algorithmes d'assimilation de données, dont le but est de mélanger les informations d'un ou plusieurs modèles avec des observations, mesurées partiellement et potentiellement bruitées. La question qui se pose est : **avec quelle précision un modèle est-il capable de reproduire ce qui est observé ?** C'est ce qu'on appelle le Contextual Model Evidence (CME), qui a été défini mathématiquement dans Carrassi et al. (2017). Cette technique vise à attribuer une probabilité pour chacun des modèles en compétition dans l'assimilation de données. Or, l'exécution de plusieurs modèles climatiques est infaisable en pratique, du fait du nombre de modèles différents et de la complexité numérique. Une alternative à ces prévisions de modèle consiste à utiliser une procédure basée sur les données, appelée la prédiction par analogues,

introduite par Lorenz (1969) en météorologie. Elle vise à obtenir une prévision probabiliste à partir d'une condition initiale au temps t . La prévision par analogue utilise des données historiques et recherche dans cet historique, en utilisant une distance appropriée, les analogues les plus proches de la condition initiale. Ensuite, les successeurs de ces analogues les plus proches sont combinés pour obtenir une prévision au temps $t+dt$. Cette procédure par analogues s'est avérée particulièrement efficace dans de nombreuses études environnementales (voir par exemple Ayet et Tandeo 2018 ou Sévellec et Drijfhout 2018). Récemment, la combinaison de l'assimilation de données et de la prédiction par analogues a été proposée dans Tandeo et al. (2015) et Lguensat et al. (2017). Cette méthode est connue sous le nom d'**assimilation de données par analogues** (AnDA). C'est un cadre flexible et peu coûteux, pouvant être appliqué à un sous-domaine de variables (par exemple, un domaine local ou une certaine quantité intégrée, afin d'éviter d'étudier le système terrestre dans son ensemble). L'idée de cette proposition AMIGAS est d'appliquer la méthodologie AnDA aux indices climatiques extraits des simulations CMIP, en prenant l'exemple des températures européennes cumulées sur 3 mois (en hiver et en été). L'objectif est de calculer une probabilité pour chaque modèle et chaque scénario climatique à l'aide d'observations actuelles et récentes. Ces probabilités seront ensuite utilisées pour générer une projection pondérée des indices climatiques. Plusieurs aspects méthodologiques seront abordés dans ce projet AMIGAS. Le principal est l'**étude des événements extrêmes** dans les simulations climatiques et leur comparaison avec des observations réelles et actuelles.

Méthodes classiquement utilisées pour la pondération de modèles - Cette question de la **pondération des simulations climatiques** n'est pas nouvelle dans la communauté du GIEC et est parfois controversée (Knutti et al. 2019). Deux approches principales ont été proposées au cours des dernières décennies : les contraintes émergentes (Cox et al. 2018) et le moyennage bayésien (Hoeting et al. 1999). Ces méthodes sont principalement basées sur la comparaison entre les observations actuelles et les sorties climatologiques des simulations de modèles. Ces méthodes utilisent elles aussi des modèles statistiques afin de quantifier les incertitudes des prévisions. L'objectif sera de comparer ces deux méthodes à celle proposée dans AMIGAS et de voir si la prise en compte des événements extrêmes permet de mieux pondérer les simulations climatiques.

Références bibliographiques

- Ayet, A., & Tandeo, P. (2018). Nowcasting solar irradiance using an analog method and geostationary satellite images. *Solar Energy*, 164, 301-315.
- Carrassi, A., et al. (2017). Estimating model evidence using data assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(703), 866-880.
- Cox, P. M., Huntingford, C., & Williamson, M. S. (2018). Emergent constraint on equilibrium climate sensitivity from global temperature variability. *Nature*, 553(7688), 319.
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4), 369.
- Knutti, R., Baumberger, C., & Hadorn, G. H. (2019). Uncertainty Quantification Using Multiple Models—Prospects and Challenges. In *Computer Simulation Validation* (pp. 835-855). Springer, Cham.
- Lorenz, E. N. (1969). Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *Journal of the Atmospheric sciences*, 26(4), 636-646.
- Eyring, V., et al. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development* (Online).
- Hawkins, E., & Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 1095-1107.
- Hoeting, J. A., Madigan, D., Raftery, A. E., & Volinsky, C. T. (1999). Bayesian model averaging: a tutorial. *Statistical science*, 382-401.
- Lguensat, R., Tandeo, P., Ailliot, P., Pulido, M., & Fablet, R. (2017). The analog data assimilation. *Monthly Weather Review*, 145(10), 4093-4107.
- Meinshausen, M., et al. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic change*, 109(1-2), 213.
- Naveau, P., Hannart, A., & Ribes, A. (2020). Statistical Methods for Extreme Event Attribution in Climate Science. *Annual Review of Statistics and Its Application*, 7.
- Sévellec, F., Sinha, B., & Skliris, N. (2016). The rogue nature of hiatuses in a global warming climate. *Geophysical Research Letters*, 43(15), 8169-8177.
- Sévellec, F., & Drijfhout, S. S. (2018). A novel probabilistic forecast system predicting anomalously warm 2018-2022 reinforcing the long-term global warming trend. *Nature communications*, 9(1), 3024.
- Sévellec, F., & Drijfhout, S. S. (2019). The Signal-to-Noise Paradox for Interannual Surface Atmospheric Temperature Predictions. *Geophysical Research Letters*, 46(15), 9031-9041.
- Tandeo, P., Ailliot, P., Ruiz, J., Hannart, A., Chapron, B., Cuzol, A., ... & Fablet, R. (2015). Combining analog method and ensemble data assimilation: application to the Lorenz-63 chaotic system. In *Machine learning and data mining approaches to climate science* (pp. 3-12). Springer, Cham.
- Tandeo, P., Ailliot, P., Bocquet, M., Carrassi, A., Pulido, M., Miyoshi, T., & Zhen, Y. (2020). A review of innovation based approaches to jointly estimate model and observation error covariance matrices in ensemble data assimilation, *Monthly Weather Review* (in revision).