

## L'air collant en géodynamique

Modélisateur·trice·s aux prises avec les contraintes de la modélisation numérique

*The "sticky air method" in geodynamics. Modellers dealing with the constraints of numerical modelling*

*El aire pegajoso en la geodinámica. Los modelizadores se enfrentan a las limitaciones de la modelización numérica*

*Die Methode der klebrigen Luft in der Geodynamik. Modellierende im Umgang mit den Einschränkungen der Computermodellierung*

Lucie Babel et Dominique Vinck

---



### Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/rac/26939>

ISSN : 1760-5393

### Traduction(s) :

The "sticky air method" in geodynamics - URL : <https://journals.openedition.org/rac/27795> [en]

Die Methode der klebrigen Luft in der Geodynamik - URL : <https://journals.openedition.org/rac/27800> [de]

### Éditeur

Société d'Anthropologie des Connaissances

### Référence électronique

Lucie Babel et Dominique Vinck, « L'air collant en géodynamique », *Revue d'anthropologie des connaissances* [En ligne], 16-2 | 2022, mis en ligne le 01 juin 2022, consulté le 01 juin 2022. URL : <http://journals.openedition.org/rac/26939>

---

Ce document a été généré automatiquement le 1 juin 2022.



Les contenus de la *Revue d'anthropologie des connaissances* sont mis à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

---

# L'air collant en géodynamique

Modélisateur·trice·s aux prises avec les contraintes de la modélisation numérique

*The “sticky air method” in geodynamics. Modellers dealing with the constraints of numerical modelling*

*El aire pegajoso en la geodinámica. Los modelizadores se enfrentan a las limitaciones de la modelización numérica*

*Die Methode der klebrigen Luft in der Geodynamik. Modellierende im Umgang mit den Einschränkungen der Computermodellierung*

Lucie Babel et Dominique Vinck

---

## Introduction

- 1 Les chercheur·euse·s introduisent parfois des entités fictives dans leurs calculs, modélisations ou théories (Thill, 1973 ; Winsberg, 2006 ; Lenhard, 2007). Ainsi, en géodynamique, sous-discipline de la géophysique, de nombreux modèles numériques contiennent un composant absent du monde que nous connaissons, l'« air collant ». Dans les articles des géodynamicien·ne·s que nous avons lus et dans les discours de celles et ceux que nous avons rencontrés, cet « air collant » est conçu comme étant aussi visqueux que la roche partiellement fondue et aussi léger que l'air. Il recouvre, dans leurs modèles, toute la croûte terrestre sur plusieurs dizaines de kilomètres d'épaisseur. Cette entité fictive – qui ferait sens dans des récits de science-fiction – peut paraître bien étrange de la part de scientifiques qui tentent de décrire et de représenter les processus affectant la structure interne de notre planète. En rendant compte de ce que font les géodynamicien·ne·s avec cette entité fictive, l'article s'efforce d'éclairer quelques aspects des pratiques de modélisation.
- 2 L'astuce de l'« air collant » soulève un apparent paradoxe. Alors même que les géodynamicien·ne·s disposent de méthodes numériques leur permettant de modéliser le système terrestre comme iels le souhaitent, beaucoup n'implémentent pas ces méthodes. Iels semblent plutôt préférer intégrer à leur modèle cette étonnante entité

hybride, fictive de surcroît, pour atteindre leurs objectifs de représentation des interactions entre la croûte terrestre et le manteau. Avant de pousser plus avant notre enquête, nous pourrions penser à une tricherie d'étudiant·e trafiquant ses données ou son modèle pour arriver au résultat attendu par l'enseignant·e. Or l'intégration d'éléments visant à faciliter les calculs relève de pratiques habituelles, réfléchies et discutées entre chercheur·euse·s quant à la pertinence des procédés. La singularité de l'« air collant » ne tient dès lors pas à son caractère fictif, mais à la représentation qu'en font les géodynamicien·nes. Alors que la plupart de ces astuces demeurent dissimulées au sein du code informatique, celle-ci est nommée, dessinée, exhibée dans les articles et manuels. Ces représentations nous permettent de la suivre et par là-même de donner à voir une étape bien précise de la modélisation numérique.

- 3 C'est en effet lors du passage d'un modèle conceptuel à un programme informatique que surgissent l'astuce et le paradoxe dont il est ici question. Après avoir conceptualisé les processus à l'œuvre – notamment les mouvements de convection du manteau –, les modélisateur·trice·s rencontrés les traduisent en une série d'opérations exécutables par l'ordinateur afin de pouvoir simuler ces phénomènes et ainsi les étudier. Nous verrons que ce passage au code informatique est riche en négociations. Il n'est, en outre, pas spécifique à la géodynamique. Tous les modèles numériques des sciences de la Terre et de l'environnement, y compris les modèles climatiques aux forts enjeux sociétaux, requièrent l'écriture d'un code informatique pouvant être lu par l'ordinateur, dans un langage bien différent de celui employé pour décrire conceptuellement les systèmes à l'étude. Néanmoins, cette étape demeure l'une des moins étudiées par les travaux d'études des sciences consacrés à la modélisation, comme l'attestera l'état de la littérature présenté dans cet article. L'étape de construction du code informatique a pourtant un impact sur le « produit » final – le modèle numérique employé comme instrument de recherche – dont l'évaluation a, elle, été fortement discutée (voir notamment Oreskes, Shrader-Frechette & Belitz, 2004 ; Lahsen, 2005 ; Sundberg, 2011).
- 4 En étudiant le cas de la « méthode de l'air collant » employée en géodynamique, le présent article se propose d'explorer plus précisément ce qu'implique le fait, si peu étudié, de rendre le modèle exécutable. Quels choix, quelles négociations, quels cheminements les modélisateur·trice·s empruntent-ils dans ce domaine ? En répondant à ces questions, l'article suivra les trajectoires de modélisation empruntées par des réseaux de chercheur·euse·s, oscillant entre dépendances de sentier (David, 1985) et tentatives de déploiement des modèles vers de nouvelles applications. Par ailleurs, il tentera de cerner les logiques par lesquelles « l'air collant » a acquis des propriétés – un nom, une épaisseur, une viscosité, une représentation visuelle – et est devenu un objet de recherche à part entière en géodynamique. Notre recherche se fonde sur un matériau mixte composé principalement de l'analyse des articles scientifiques publiés sur le sujet au sein de la discipline, des manuels et ouvrages de référence, ainsi que d'entretiens avec des acteur·trice·s en géodynamique. Elle tire également profit d'un travail de terrain constitué de trente entretiens semi-dirigés avec des modélisateur·trice·s en sciences de la Terre et de l'environnement dans plusieurs pays européens et de l'observation participative lors de conférences.
- 5 L'article est découpé en cinq parties. Nous commencerons tout d'abord par présenter brièvement les principaux défis de la modélisation géodynamique identifiés dans ce matériau d'enquête. Nous définirons également la terminologie à laquelle nous aurons

recours et situerons notre enquête par rapport à la littérature STS existante. L'étude de cas et sa méthode seront introduites dans la deuxième partie. La troisième partie sera consacrée à l'apparent paradoxe portant sur l'utilisation des méthodes numériques dans le cas traité. Ce faisant, elle explorera les dynamiques antagonistes auxquelles les modélisateur·trice·s se heurtent en tentant de poursuivre leur objectif d'une mise en mouvement modélisée de la croûte terrestre. La « méthode de l'air collant », permettant de composer avec ces trajectoires de modélisation, est présentée dans la quatrième partie. Nous suivrons la circulation de cette astuce en géodynamique et analyserons plus précisément ce que les modélisateur·trice·s font de l'hybride créé, au travers de sa dénomination, de sa représentation visuelle et de la maîtrise de ses effets indésirables. Enfin, la conclusion reviendra sur ce que le recours à l'astuce de l'air collant révèle du type de pratique, créatrice de connaissances, qu'est l'étape de construction du code informatique.

## La modélisation numérique et son emploi en géodynamique

- 6 Les manuels de *sciences de la Terre* présentent ces sciences comme regroupant de nombreuses disciplines (géologie, géochimie, géomorphologie, géophysique, climatologie, hydrologie, océanographie, entre autres), possédant chacune un champ d'application et un angle analytique qui lui sont propres. Parmi elles, la *géophysique* s'intéresse principalement à la structure interne de la Terre, à ses propriétés physiques (p.ex. température, pression, densité) et aux phénomènes physiques en jeu (p.ex. gravité, magnétisme, ondes sismiques, convection du manteau). L'étude de l'évolution de cette structure interne, notamment sous l'angle des mouvements de ses composants est appelée *géodynamique*. C'est au sein de cette sous-discipline de la géophysique que s'inscrit notre étude de cas.
- 7 Les chercheur·euse·s en géodynamique s'intéressent aux dynamiques de l'intérieur du globe et de sa surface. Ces recherches ont vocation, d'une part, à comprendre la formation des structures terrestres existantes ; de l'autre, à appréhender les mécanismes à l'origine de certains phénomènes naturels (volcanisme, sismicité, etc.). Selon l'échelle de temps et la profondeur considérées, les recherches en géodynamique peuvent avoir des applications dans la prévention des risques naturels, le stockage de déchets, la géothermie et la localisation de ressources minérales et fossiles. Toutefois la plus grande partie de la recherche géodynamique, y compris les travaux dont traite le présent article, relève de la recherche fondamentale. Elle est réalisée dans un contexte universitaire ou au sein d'instituts de recherche et financée par des fonds publics. Si les justifications sociétales pour la recherche de financements relèvent parfois de la prévention de risques naturels, les recherches que nous décrivons n'ont pas d'application directe à cet égard ; il en va plus d'une compréhension des mécanismes et de leurs interactions. Le nombre de chercheur·euse·s en géodynamique demeure très limité en comparaison avec les effectifs d'autres disciplines des sciences de la Terre, telles que la climatologie ou l'hydrologie. En Europe, où s'est déroulée notre recherche, les chercheur·euse·s se connaissent généralement et partagent souvent un élément biographique commun : un passage (pour un doctorat ou une recherche post-doctorale) auprès de l'institut de géophysique de l'École Polytechnique Fédérale de Zurich (Suisse) ou une collaboration (recherche, publication) avec des professeurs qui y sont affiliés.

Les dynamiques concurrentielles entre groupes de recherche semblent peu exacerbées dans cette discipline. À l'inverse, nous avons acquis au fil de notre recherche l'image d'une petite communauté relativement soudée, peu divisée par des controverses et marquée par un fort dynamisme, axé à la fois sur le développement technique et la diversification des applications de ses méthodes (étendues p.ex. à d'autres planètes du système solaire). Les collaborations entre géodynamicien-ne-s d'instituts et de pays différents semblent par ailleurs très fréquentes et diverses, se recomposant au gré de nouveaux projets de recherche.

## Modéliser pour compenser l'absence de données

- 8 Étudiant les processus à l'œuvre à l'intérieur et à la surface du globe, les géodynamicien-ne-s font face à un défi majeur : un manque cruel de données. De la dynamique passée du système terrestre ne subsistent que certaines de ses conséquences sur la surface. Les phénomènes eux-mêmes ne peuvent être observés par les chercheur-euse-s, à cause des échelles de temps considérables (milliers, millions, voire milliards d'années – à l'échelle d'une vie humaine, tout cela paraît immobile) et l'inaccessibilité des profondeurs (la croûte terrestre s'étendant jusqu'à 50 km de profondeur, le manteau terrestre jusqu'à 3000 km). Les processus, leurs causes et leurs effets doivent donc être imaginés, faire l'objet d'hypothèses et reconstruits (*ex post* et *ex situ*). L'un des principaux outils employés par les géodynamicien-ne-s à cette fin est le modèle. Trois catégories de modèles se côtoient et se complètent dans cette discipline : le modèle analytique, le modèle analogique (de laboratoire) et le modèle numérique (sur ordinateur). L'article porte sur la troisième catégorie de modèles : les modèles numériques.
- 9 Dans les sections suivantes, nous emploierons alternativement les termes de modélisateur-trice-s et de géodynamicien-ne-s, pour souligner les deux faces du profil des acteur-trice-s rencontré-e-s. Dans cette discipline comme dans beaucoup d'autres des sciences de la Terre, la modélisation numérique n'est pas du ressort d'un personnel technique distinct des chercheur-euse-s. Les modélisateur-trice-s en géodynamique interviewé-e-s ou dont nous avons lu les travaux ont une formation initiale en géophysique, géologie ou géosciences, voire en physique. La modélisation numérique fait aujourd'hui partie des *curricula* de ces formations, mais de façon souvent optionnelle. Iels relataient ainsi avoir acquis la plus grande partie de leur savoir-faire pointu en modélisation « sur le tas », en découvrant et manipulant des modèles créés par d'autres.
- 10 Les modèles numériques de géodynamique décrivent les mouvements du manteau et de la croûte terrestre à l'aide de la mécanique des fluides. Fluides, les matériaux terrestres ne le sont pas à première vue, à l'échelle humaine. En revanche, à une échelle géologique, supérieure à des dizaines de milliers d'années, leur comportement est considéré comme visqueux – même celui de la croûte terrestre. Les équations de base de la mécanique des fluides (branche de la physique étudiant le comportement des fluides) peuvent alors s'appliquer. Il s'agit d'équations qui traduisent les lois de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement – ces quantités sont constantes ; si une quantité disparaît quelque part, on doit la retrouver ailleurs. D'un point de vue mathématique, ces équations appartiennent à la catégorie d'équations « différentielles partielles », très courantes en physique et en ingénierie.

Les inconnues (par exemple, la température) dans ces équations sont elles-mêmes des fonctions qui dépendent simultanément du comportement de plusieurs variables indépendantes. La grande majorité d'entre elles possèdent une particularité importante : celle de ne pas pouvoir être résolues analytiquement – c'est-à-dire en manipulant les termes et symboles de ces équations. Les équations sont si complexes que pour certaines d'entre elles (par exemple, les équations de Navier-Stokes, centrales en mécanique des fluides), l'existence-même de solutions n'a pas encore été prouvée et fait partie des défis mathématiques considérés comme les plus ardues. Ce défi est même l'un des « problèmes du prix du millénaire » de l'Institut Mathématique Clay, doté d'un million de dollars. Les chercheur·euse·s en géodynamique ne résolvent donc pas ces équations, mais tentent d'approximer leurs solutions à l'aide de calculs opérés sur l'ordinateur. Pour cela, iels ont recours à des *méthodes de résolution numérique*. Ces méthodes et les transformations qu'elles requièrent du système modélisé sont au cœur de notre enquête. Nous verrons dans la section suivante sur quelle littérature nous pouvons ou non nous appuyer pour étudier ces transformations.

## Les différentes étapes du travail de modélisation

- 11 Il n'existe à notre connaissance aucun travail d'études des sciences portant sur la modélisation géodynamique. Les chercheur·euse·s en sciences sociales s'étant intéressé·es à la modélisation numérique au sein des sciences de la Terre, toutes disciplines confondues, sont par ailleurs peu nombreux. Iels se sont plutôt concentré·es sur la modélisation numérique du climat, au fort enjeu sociétal et sujet de controverses en lien avec la problématique du changement climatique. Ces travaux sont *a priori* pertinents pour l'étude de la modélisation géodynamique dans la mesure où, en climatologie et en géodynamique, les modèles ont de nombreux points communs ; tout comme les modèles géodynamiques, les modèles climatiques « de circulation générale » (GCM) s'appuient sur la mécanique des fluides ; le défi de la résolution (approximée) des équations est partagé ; et les techniques mathématico-informatiques employées à cette fin sont similaires. Ces techniques mathématico-informatiques et les pratiques associées restent peu étudiées et sont un parent pauvre de la littérature STS consacrée à la modélisation.
- 12 Notre enquête porte sur une étape spécifique du travail de modélisation, que nous pouvons situer grâce au schéma du processus de modélisation (fig. 1) fréquemment employé dans la littérature géoscientifique. Nous ne pouvons espérer de ce type de schémas qu'il représente les pratiques réelles des modélisateur·trice·s, mais la terminologie employée nous sera utile pour la suite de cet article. Suivant ce schéma, un modèle numérique repose sur un modèle *conceptuel*, correspondant à la représentation qualitative du système étudié, ses composants, leurs caractéristiques et leurs relations. Un modèle *mathématique* traduit ce modèle conceptuel en un système d'équations, lesquelles sont traduites en un modèle *procédural* pouvant être exécuté sur ordinateur. Ces trois types de modèles (conceptuel, mathématique et procédural) correspondent à des objets différents : le modèle conceptuel prend le plus souvent la forme de croquis du système étudié<sup>1</sup> et reflète des idées, connaissances et hypothèses des chercheur·euse·s à son sujet ; le modèle mathématique est composé d'une série d'équations ; quant au modèle procédural, il s'agit d'un code informatique. Ce code informatique, lorsqu'il est exécuté (« lu ») par l'ordinateur, transforme un jeu de données, correspondant aux variables prises en compte dans le modèle, pour produire

des résultats qui sont ensuite visualisés par les modélisateur·trice·s sous forme de graphes, de cartes, d'images ou d'animations. Les résultats sont comparés aux éventuelles données existantes (issues de l'observation de l'activité sismique de la Terre), aux représentations en vigueur (le « modèle conceptuel ») ou aux résultats d'autres simulations.

Figure 1 : Représentation du processus de modélisation numérique

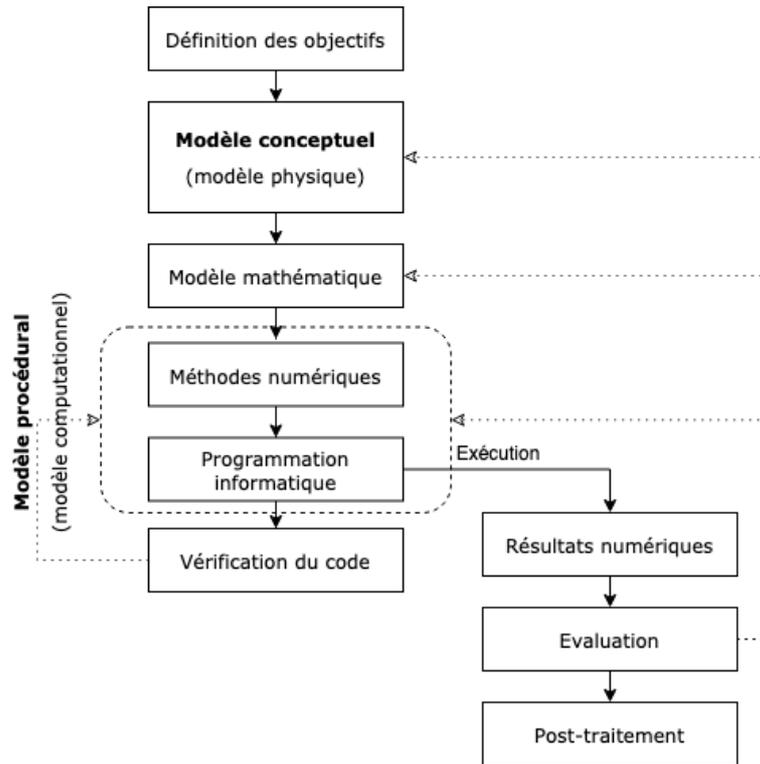


Schéma d'opérations adapté de Ismail-Zadeh et Tackley (2010, p. 16) représentant le processus de modélisation numérique. Les flèches pointillées du schéma représentent les éventuelles boucles d'itération, effectuées tant que la vérification du code et l'évaluation du modèle ne produisent pas les résultats escomptés.

Crédit : schéma de Ismail-Zadeh et Tackley (2010, p. 16), adapté par les auteurs.

- 13 L'évaluation des résultats du modèle est précisément l'étape qui a le plus retenu l'attention des auteur·trice·s en études des sciences, notamment l'historienne des sciences Naomi Oreskes, la philosophe Kristin Shrader-Frechette et l'hydrologue Kenneth Belitz (1994), l'anthropologue Myanna Lahsen (2005), l'historienne des sciences Hélène Guillemot (2009), les philosophes des sciences Johannes Lenhard et Eric Winsberg (2010), Elisabeth Lloyd (2010) et la sociologue Mikaela Sundberg (2011). Cet intérêt est lié à un contexte de controverses politiques ciblant la fiabilité des projections des modèles du climat. Aussi, l'évaluation des modèles numériques, sous l'angle de ses pratiques, de son vocabulaire, de sa relation à la vérité, à la réalité ou aux données, a représenté un enjeu majeur, tant au sein de la communauté scientifique des modélisateur·trice·s des sciences de la Terre et de l'environnement (*e.g.* Beven, 1993 ; Odenbaugh, 2005 ; Rykiel, 2006 ; Knutti, 2008) que dans les travaux STS consacrés aux modèles numériques.
- 14 La construction du code conduisant aux résultats analysés a quant à elle été uniquement traitée en surface. Certes, d'importants ouvrages et articles retraçant le

développement d'un modèle dans sa co-construction politique et institutionnelle (*e.g.* Armatta & Dahan Dalmedico, 2004 ; Dahan Dalmedico, 2007 ; Edwards, 2013) s'y sont intéressés. Néanmoins, il s'agit le plus souvent d'une présentation des grands principes mathématiques et informatiques utilisés pour la construction du code et de leur évolution dans le temps. Les pratiques elles-mêmes n'ont guère été étudiées de manière approfondie. De ce traitement majoritairement historique du modèle procédural se dégage une impression de linéarité du processus de modélisation, de non-choix et de techniques numériques s'imposant progressivement par leur efficacité.

- 15 Il faut s'écarter quelque peu des travaux portant sur les sciences de la Terre pour trouver chez l'anthropologue Matt Spencer (2012b) un travail ethnographique fouillé sur la modélisation traitant plus en profondeur des méthodes de résolution numérique et du code informatique. Bien que l'analyse de l'auteur soit principalement de nature épistémologique, sa recherche conduite en physique computationnelle nous intéressera pour le statut qu'elle accorde aux techniques numériques employées en modélisation aux prises avec le code et avec la notion de représentation. La philosophe des sciences Tarja Knuuttila, la sociologue Martina Merz et l'historienne et philosophe Erika Mattila (2006) notent qu'en se penchant sur la modélisation numérique, philosophes des sciences et STS dépassent leur ancienne division du travail entre analyse de la production conceptuelle et étude des pratiques expérimentales (Moreno & Vinck, 2021) ; l'étude de la modélisation rapproche les chercheur·euse·s dans la mesure où modélisation et simulation s'apparentent à du travail à la fois théorique et expérimental (Dowling, 1999 ; Morgan & Morrison, 1999 ; Sismondo, 1999). Le type d'objet sur lequel porte notre enquête rend bien compte de cette interaction entre philosophe des sciences et STS. Winsberg (2010), par exemple, traite du caractère « fictionnel » de la modélisation, ce qui sera pertinent pour interroger certaines pratiques entourant l'utilisation de la « méthode de l'air collant », présentée ci-après.

## Étudier des pratiques de modélisation : une étude de cas distribuée

- 16 L'étude de cas que nous présentons s'inscrit dans une recherche plus large portant sur les pratiques de construction de modèles numériques dans les sciences de la Terre. Dans ce cadre, nous avons assisté à deux conférences annuelles de l'Union Européenne des Géosciences (EGU) en tant que, pour la co-auteurice de cet article, chercheuse dans le domaine et dans un esprit d'observation participative. Réunissant plus de 15 000 chercheur·euse·s durant six jours à Vienne (Autriche), ces conférences se composent de plusieurs centaines de sessions uni- ou interdisciplinaires. C'est lors de l'une des sessions de géodynamique de l'édition 2019 que nous avons été confrontés pour la première fois à la « méthode de l'air collant ». La session en question consistait en un « *short course* » de 90 minutes sur les méthodes numériques, à l'attention de jeunes chercheur·euse·s en géosciences non familiarisé·e·s avec la modélisation numérique en géodynamique. Que la « méthode de l'air collant » soit abordée lors d'une session aussi brève et générale nous renseigne sur son statut relativement commun. Sa présentation ne suscita d'ailleurs aucune réaction dans l'assemblée, alors qu'il est question d'introduire dans le modèle une entité fictive.

## Démarche d'enquête

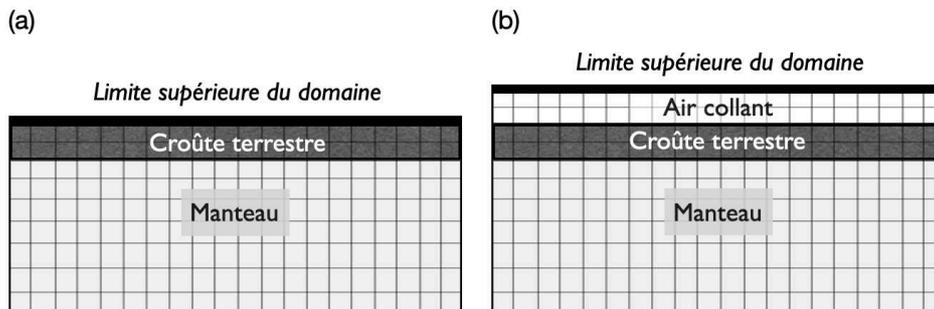
- 17 Notre aspiration à suivre les pratiques pour rendre compte de l'émergence de cette entité fictive et de ses usages nous confronte à un défi méthodologique récurrent dans les études des sciences consacrées à la modélisation. Comme souligné par Guillemot (2009) et Sundberg (2010), la modélisation numérique se prête peu à l'observation ethnographique. L'activité des modélisateur-trice-s, tapant sur leur clavier et cliquant sur leur souris devant des écrans d'ordinateur, peut rester particulièrement opaque pour l'observateur-trice. La construction souvent incrémentale des modèles, sur plusieurs décennies et dans de multiples sites de production (Lahsen, 2005), complique encore un peu plus la récolte de données empiriques. Guillemot (2009, p. 276) considère ainsi qu'en modélisation, « la description des pratiques des chercheurs passe inévitablement par leur propre discours lors d'entretiens ». Confronté aux méthodes numériques en physique computationnelle, Spencer (2012b, p. 12) refuse néanmoins de se limiter aux entretiens, dont il estime que les propos ne peuvent être compris que s'ils sont accompagnés d'une démarche ethnographique plus large. Nous le rejoignons ici. Un premier entretien avec l'une des spécialistes de l'« air collant » nous a rapidement montré que nous ne pourrions atteindre le niveau de détail requis pour reconstruire les pratiques en ne nous basant que sur ces échanges. Nous avons dû, comme Spencer (2012b), nous confronter personnellement à la technicité et aux spécificités de ce champ de recherche. Cet investissement allait au-delà du seul raisonnement ; il nous a fallu apprendre à lire et à manipuler les représentations graphiques et les équations afin de recouper et de reconstruire. Nous avons pour ce faire abondamment mobilisé les ressources qu'emploient les géodynamicien-ne-s : articles scientifiques du domaine, manuels de modélisation géodynamique et de méthodes numériques, extraits de cours, mais aussi sollicitations informelles de géodynamicien-ne-s et d'un mathématicien sur des détails mathématico-informatiques que nous rencontrions en chemin. Nous avons alors pu peu à peu nous rapprocher suffisamment des objets considérés pour entrevoir des choix, des bifurcations et les aborder lors d'entretiens. Le processus fut itératif : les pratiques esquissées par les géodynamicien-ne-s au cours des entretiens nous renvoyaient vers d'autres articles et travaux de géodynamique, à d'autres images et équations, qui dans certains cas nous poussaient à contacter les auteur-trice-s. À défaut de pouvoir étudier des pratiques situées – au sein d'un laboratoire ou dans le cours d'action d'un projet – puisque ce qui se joue se passe en des lieux et des temps dispersés, c'est ainsi par des itérations successives dans les matériaux de l'enquête et auprès de nos interlocuteur-trice-s que nous avons progressivement reconstitué leur univers, leurs pratiques, leurs évolutions, leurs enjeux et leurs points de friction.
- 18 Les géodynamicien-ne-s anonymisé-e-s auxquel-le-s nous donnons la parole au travers de citations issues d'entretiens travaillent toutes et tous dans des instituts et pays différents, mais ont en commun d'avoir manipulé l'« air collant » lors de précédents projets de recherche. Nous avons fait le choix de ne pas reproduire d'extraits de la correspondance échangée avec certain.e.s auteur-trice-s, dans la mesure où celle-ci a essentiellement concerné des objets en périphérie de l'« air collant » dont la manipulation et l'étude nous ont été nécessaires pour mieux approcher cette technique, mais que nous ne développons pas dans l'article. Enfin, les défis plus généraux de la modélisation numérique que nous sommes amené-e-s à relever se nourrissent d'un travail de terrain constitué de trente entretiens semi-dirigés avec des

modélisateur-trice·s en sciences de la Terre et de l'environnement, en France, en Suisse, aux Pays-Bas et en Allemagne, ayant porté sur les choix de certains composants des modèles et sur le transfert de pratiques de modélisation ; de l'observation participative à des conférences de l'Union européenne de géosciences (EGU) à Vienne (Autriche) en 2018 et 2019 ; et enfin des nombreux échanges formels et informels avec des modélisateur-trice·s, l'une des auteur-trice·s étant affiliée à un groupe de recherche en géographie computationnelle.

## Le cas de la « méthode de l'air collant »

- 19 Lorsqu'il s'agit de modéliser numériquement un système, les modélisateur-trice·s s'accordent, dans les manuels et dans leurs pratiques, sur le fait de devoir définir le *domaine* du modèle. Il s'agit de la portion de l'espace à modéliser et sur laquelle s'appliquent les équations considérées. Pour une modélisation en deux dimensions, majoritaire en géodynamique, le domaine du modèle prend le plus souvent la forme d'un rectangle. Il contient, dans le cas qui nous intéresse, une partie de la croûte terrestre et du manteau (fig. 2a).

Figure 2 : Représentation du domaine du modèle avant et après insertion de la couche d'« air collant »



Comparaison schématique du domaine de modèles géodynamiques avant (a) et après (b) insertion de la couche d'« air collant ». Le quadrillage représente la « grille » du modèle, composée de mailles sur chacune desquelles s'appliquent les équations considérées.

Crédits : élaboré par Lucie Babel.

- 20 La « méthode de l'air collant » consiste à rajouter, au sein du domaine du modèle, une couche surmontant la croûte terrestre (fig. 2b). Cette couche, qualifiée d'« air collant », possède tout à la fois la densité de l'air (zéro) et une viscosité cent mille milliards de milliards de fois supérieure à celle de ce dernier. Aucun élément connu ne possède une telle combinaison de propriétés aussi contradictoires. La couche d'« air collant » n'a ainsi pas vocation à représenter une « réalité » physique, laquelle ne fait d'ailleurs pas partie du modèle conceptuel, mais surgit uniquement lors de la construction du modèle procédural. Cette pratique nous permet alors de porter spécifiquement notre attention sur cette étape du processus de modélisation numérique.

## La modélisation numérique entre verrouillage et déploiement : représenter une croûte terrestre en mouvement

- 21 La méthode dite « de l'air collant » n'est pas utilisée dans tous les modèles géodynamiques. Elle n'apparaît que dans des modèles incluant l'interaction entre la croûte terrestre et le manteau sous-jacent. L'intérêt pour cette interaction a été motivé dès le milieu des années 1980 (voir p.ex. Hager *et al.*, 1985 ; Koons, 1989) par des recherches démontrant que la convection du manteau terrestre était à même de soulever et d'abaisser la croûte terrestre par endroits<sup>2</sup>. L'exploration collective de l'interaction entre la croûte et le manteau terrestres s'est accélérée durant les années 1990, parallèlement à l'obtention de mesures particulièrement détaillées des déformations et des mouvements de la surface terrestre (Burbank & Pinter, 1999). Dès la fin des années 1990, de nombreuses méthodes numériques et de laboratoire ont été développées pour parvenir à simuler ces mouvements de manière dynamique (voir Schmeling *et al.*, 2008).
- 22 Dans les modèles géodynamiques, la croûte terrestre représente généralement la limite supérieure du domaine du modèle (voir fig. 2a). Cela signifie que si la croûte terrestre est mise en mouvement – ce qui est l'objectif de la plupart des modélisateur·trice·s prenant en compte l'interaction entre la croûte et le manteau<sup>3</sup> – le domaine du modèle ne serait plus rectangulaire comme sur notre figure. Il se déformerait dans sa partie supérieure.

### Le coût computationnel

- 23 Les déformations du domaine du modèle ont néanmoins un coût. Pour leurs modélisations, les géodynamicien·ne·s divisent le domaine en petites entités géométriques et constituent ainsi la *grille* du modèle. Avec les déformations de la croûte terrestre, ce sont tous les éléments de ce pavage qui sont amenés à se déformer également. En comparaison avec une grille fixe, un nombre bien supérieur de calculs doit être effectué et stocké par l'ordinateur tout au long de la modélisation. Pour les modélisateur·trice·s, la vitesse de calcul et la capacité de mémoire à disposition, loin d'être des entités abstraites, sont des ressources matérielles installées dans les instituts recherche et leurs réseaux sociotechniques. Le travail dépend alors du type d'ordinateurs dont iels disposent et auxquels iels ont accès, de leur collaboration avec les personnes qui gèrent ces ressources numériques et de la maintenance des ordinateurs. Pendant combien de temps une modélisateur·trice peut-iel faire « tourner » son modèle avant d'empiéter sur les activités d'autres membres de l'institution ou sur son agenda, lui aussi négocié institutionnellement (Fujimura, 1987) ? L'institut a-t-il accès aux super-ordinateurs d'un centre national de calcul ? Ces conditions relatives à l'infrastructure de la modélisation sont omniprésentes dans les réflexions sur les choix des techniques numériques. L'historien Paul Edwards les agrège sous le terme de « friction computationnelle » (Edwards, 2013, p. 84). Ce concept inclut « non seulement les limites physiques et économiques de la vitesse des processeurs et de la capacité de mémoire », prises en compte et comparées dans les articles scientifiques sous les termes d'« efficacité » ou de « coût computationnel » des techniques numériques, « mais aussi le travail humain nécessaire pour programmer, faire fonctionner, déboguer et

*réparer les ordinateurs* ». Le concept de « friction computationnelle » est peu connu en géodynamique. L'utilisation que font les acteur·trice·s en géodynamique de la notion de « coût computationnel » durant nos entretiens se rapproche néanmoins de cette définition élargie et va au-delà des seules ressources matérielles mobilisées. Elle est par ailleurs l'un des premiers arguments avancés spontanément par les modélisateur·trice·s lors de nos entretiens pour justifier le choix d'une méthode. C'est ainsi à un « coût computationnel » incluant le travail de programmation que fait référence le géodynamicien A. lorsqu'il rejette, lors d'un entretien, l'utilité d'une grille déformable :

Pour les modèles de la convection du manteau... il y a tellement de déformations qu'il faudrait redéfinir la grille (du modèle) durant l'évolution, alors ça ne fait pas vraiment de sens. (A., géodynamicien, 12 mars 2020).

- 24 Si A. mentionne spécifiquement les modèles de la convection du manteau, c'est bien parce que tous les modèles géodynamiques s'intéressant aux déformations de la croûte ne le font pas avec la même échelle de temps et d'espace. Les modèles de la convection du manteau étudient les dynamiques du manteau jusqu'à de grandes profondeurs et sur des durées allant de plusieurs dizaines de milliers à des millions d'années. À ces échelles, les déformations du manteau sont si importantes que les difficultés de programmation liées à l'implémentation d'une grille déformable semblent insurmontables pour nos interlocuteur·trice·s. Le « coût computationnel » est en revanche bien plus abordable lorsque les modèles opèrent à de plus petites échelles. La géodynamicienne S., qui travaille elle aussi sur des modèles de la convection du manteau, avait collaboré avec ce qu'elle nomme « les gens des tremblements de terre » (« *Earth quake people* »), qu'elle estime former une communauté distincte. Leurs modèles simulent des processus durant quelques minutes seulement.

Ils n'ont jamais eu le moindre besoin de rechercher des méthodes permettant d'accommoder de nombreuses déformations... Toute cette communauté n'avait jamais entendu parler de l'« air collant », parce qu'ils n'en ont pas besoin. Ils n'étudient pas des processus sur le long terme. (S., géodynamicienne, 25 mai 2021).

- 25 La problématique du coût computationnel inabordable de la grille déformable est, en fait, spécifique aux géodynamicien·ne·s modélisant la convection du manteau. C'est à ce groupe que nous nous référerons pour la suite de l'article lorsque nous parlons de « géodynamicien·ne·s » pour des questions de place.

## Des enjeux de compatibilité

- 26 L'utilisation d'une grille entièrement déformable n'est pas considérée comme une option abordable par les géodynamicien·ne·s. Afin de représenter tout de même les mouvements de la croûte terrestre, d'autres techniques de modélisations ont été développées. L'une d'entre elles, intitulée « *Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method* » (ALE), empruntée à l'ingénierie, ne permet qu'une déformation verticale de chaque élément de la grille, ce qui est bien moins coûteux en termes de ressources numériques que s'il s'agissait de calculer aussi les déplacements horizontaux. Or tous les codes informatiques ne sont pas compatibles avec ce genre de technique. Aussi, l'ALE, qui permet une déformation partielle de la grille, n'est employée qu'avec la méthode de résolution numérique<sup>4</sup> dite « des éléments finis » car sa principale méthode concurrente, la méthode « des différences finies », repose sur l'utilisation d'une grille entièrement fixe.

27 Ce n'est donc pas uniquement le coût computationnel, mais également le choix effectué en amont quant à la méthode de résolution numérique, qui contraint la marge de manœuvre des géodynamicien·ne·s. Les méthodes de résolution conditionnent l'écriture du code informatique, car elles discrétisent (c'est-à-dire découpent le domaine du modèle) de façon différente. La méthode « des différences finies » approxime les résultats des équations à chaque croisement (nœud) de la grille du modèle. La méthode « des éléments finis », elle, le fait sur toute la surface de chaque élément de la grille. Cette différence est si fondamentale du point de vue de l'écriture mathématique que les modélisateur·trice·s ne peuvent passer de l'une à l'autre au sein du même modèle. Aussi, une modélisateur·trice employant un modèle basé sur les différences finies sera contraint·e, par l'écriture mathématique, à une géométrie fixe, rendant impossible toute déformation (même partielle) de la grille du domaine. Nous pourrions donc nous attendre à ce que toutes les géodynamicien·ne·s souhaitant représenter les mouvements de la croûte terrestre emploient l'autre méthode de résolution (des éléments finis), permettant une déformation. Ce n'est pourtant pas le cas. Notre recherche permet de proposer plusieurs explications possibles des raisons de cet apparent paradoxe, qui sont développées ci-après.

## Des modèles et des méthodes numériques en héritage

28 Les modélisateur·trice·s ne choisissent pas forcément les méthodes numériques qu'ils emploient. La majorité des géodynamicien·ne·s interviewé·e·s utilisaient ainsi des modèles conçus par d'autres modélisateur·trice·s, qu'ils avaient parfois complétés et modifiés. Le cas de la géodynamicienne S., étudiante post-doc, en est une illustration. Lors de son doctorat, S. avait travaillé sur un modèle construit par ses directeurs de thèse, comme toutes les autres doctorant·e·s du groupe de recherche dont elle faisait partie. Chaque doctorant·e était affecté·e au développement d'un morceau différent du code initial. Lors de son premier post-doc, S. avait changé de modèle et employé celui conçu par l'un de ces anciens professeurs. Elle s'appropriait, au moment de notre entretien, à occuper une nouvelle position quelques mois plus tard. Ce nouvel emploi requerrait de S. de passer de nouveau à un autre modèle géodynamique. Ces changements successifs étaient pour la plupart dictés par son arrivée dans un nouveau groupe de recherche, au sein duquel un modèle géodynamique consistait en un outil de travail commun à toutes les chercheur·se·s. Les modélisateur·trice·s s'accommodent dans ce cas du modèle employé localement et de certains choix initiaux effectués par leurs prédecesseur·e·s. S. avait souvent recours durant l'entretien à la notion d'« héritage » (*legacy*). Elle jugeait que l'emploi de la méthode des éléments finis ou de celle des différences finies n'était ainsi « qu'une question de préférence, dans une certaine mesure, de la personne qui a codé [le modèle] en premier »<sup>5</sup>. De par l'impact de ce choix initial sur l'écriture mathématique du code (voir plus haut), ce que la géodynamicienne S. qualifie d'« héritage » prend la forme d'une dépendance de sentier (David, 1985) marquée par son irréversibilité (Edwards *et al.*, 2007). Revenir sur le choix de la méthode numérique nécessiterait de renverser le modèle séminal et de le réécrire entièrement ; une entreprise non seulement fort coûteuse en ressources temporelles et personnelles, mais remettant aussi en cause la place de la modélisatrice au sein d'un réseau d'acteur·trice·s articulé autour d'un modèle pré-existant et de son développement incrémental.

29 La géodynamicienne S. affichait une mobilité – entre modèles, entre méthodes de résolution numérique et encore entre groupes de recherches – que nous avons rarement rencontrée lors des autres entretiens. Elle en avait conscience, se disant connue pour ses changements répétés de type de modèle employé. Toutes disciplines géoscientifiques confondues, la majorité des modélisateur-trice-s que nous avons interrogé-e-s continuaient en revanche d'utiliser, parfois jusqu'à deux décennies plus tard, des versions ultérieures d'un modèle avec lequel iels s'étaient familiarisé-e-s durant leur thèse ou durant une recherche post-doctorale, ou qu'iels avaient contribué à développer à ce moment. Les modélisateur-trice-s ont souvent réalisé un tel investissement professionnel (Pickering, 1985) pour acquérir le savoir-faire qui leur permet de travailler avec un modèle particulier, que cet investissement conforte son réemploi ultérieur. Ces observations valent également à l'échelle des méthodes de résolution numérique. Sur la base de nos entretiens, nous avons montré dans un précédent article (Babel, Vinck & Karssenber, 2019), que le choix répété d'une méthode de résolution numérique pouvait également initier une dépendance de sentier particulièrement durable, du fait de l'expertise acquise et de l'ancrage dans un réseau de chercheur-euse-s utilisant la même méthode. Pour qui a été formé à l'une de ces méthodes, en a éprouvé les contraintes et su composer avec elle, le passage à un modèle basé sur une autre méthode peut donc représenter un investissement si important qu'il peut en devenir dissuasif.

## Des objets en déploiement

- 30 Une institution semble avoir joué un rôle particulièrement important dans les trajectoires de modélisation suivies : l'institut de géophysique de l'EPFZ. Cet institut abrite deux groupes de recherche très dynamiques (grand nombre de chercheur-euse-s, multiples collaborations internationales, nombre considérable de publications). Presque toutes les géodynamicien-ne-s rencontrées ou dont nous avons étudié les articles sont passés à un moment ou à un autre par cet institut. L'un de ses professeurs a écrit un manuel très largement diffusé sur la modélisation numérique en géodynamique ; nous avons retrouvé cet ouvrage dans les bureaux des chercheur-euse-s rencontrées et sa réédition a même fait l'objet d'une présentation, catégorisée comme « temps fort » lors de l'assemblée générale de l'Union Européenne des Géosciences en 2019.
- 31 Les deux groupes de recherche de cet institut sont à l'origine de deux des modèles les plus réputés en géodynamique. Or ces deux modèles sont basés sur la méthode de résolution des différences finies. Qu'ils le soient est loin d'être anecdotique, car cela signifie qu'un large collectif de recherche – composé des membres de cet institut, des chercheur-euse-s l'ayant quitté mais continuant à en employer les modèles, ainsi que des chercheur-euse-s externes collaborant à des recherches communes – se retrouve enfermé dans une trajectoire de modélisation verrouillée, à savoir le recours à une géométrie fixe. Si nous avons ici recours à la notion de trajectoire, c'est bien parce que ces modèles sont loin d'être figés dans le temps. Les modèles que nous avons rencontrés dans les sciences de la Terre partagent en effet avec les modèles de la physique des particules étudiés par Martina Merz (1999) la particularité d'être des objets « en déploiement ». Leur transformation permanente vise d'une part à améliorer leur efficacité, à supprimer des instabilités et à adapter les codes informatiques aux évolutions de l'infrastructure disponible. D'autre part, les modifications consistent en

des ajouts visant à permettre aux utilisateur·trices du modèle de répondre à des questions de recherche supplémentaires. À l'image de la géodynamicienne S. durant son doctorat, de nombreuses chercheur·euse·s travaillent ainsi sur des extensions des deux modèles de l'EPFZ. En raison du nombre élevé de versions développées en parallèle, la géodynamicienne S. affirmait même durant un entretien ne jamais avoir vu « le vrai truc » (*the real thing*), ce par quoi elle sous-entendait le modèle consolidé, arrêté, dénué de ces arborescences permettant chacune de nouveaux angles d'étude et de nouvelles applications. Ce déploiement si caractéristique des modèles que nous avons étudiés semble souvent répondre à un intérêt stratégique. Permettre d'aborder des questions de recherche supplémentaires contribue à consolider la compétitivité du modèle et à entretenir un réseau d'utilisateur·trices stable voire en augmentation ; c'est aussi généralement une condition pour l'obtention de nouveaux financements. Parfois, les modèles semblaient néanmoins s'étoffer en dehors du groupe de recherche l'ayant construit. Les modifications étaient alors effectuées par des individus ou des collectifs ayant acquis de l'expérience dans la manipulation de certains modèles, et qui souhaitaient continuer à les utiliser tout en les adaptant à leurs recherches actuelles.

- 32 Ces dynamiques de verrouillage (par induction de dépendances de sentier) et de déploiement permettent de mieux saisir l'apparition, à première vue paradoxale, de techniques telles que celle de l'« air collant » au sein des modèles numériques. La circulation des chercheur·euse·s et leurs relations se traduisent par la constitution de traditions de modélisation, dont les limites poussent à innover sans renverser pour autant le modèle séminal. La « méthode de l'air collant » permet ainsi un déploiement des modèles vers de nouvelles applications (une représentation dynamique des interactions entre croûte et manteau) sans dévier de la trajectoire de modélisation verrouillée sur laquelle ils se situent (l'emploi d'une grille fixe). Ainsi, chemin faisant, nous avons pris conscience de l'importance des trajectoires et des relations entre les chercheur·euse·s pour comprendre les « choix » de méthodes qu'ils réalisent et les processus de consolidation de modèles à l'œuvre.

## L'introduction d'une entité fictive : la méthode de l'air collant et la dissociation des limites

- 33 Les modèles employant la méthode de résolution « des différences finies » ont, comme nous l'avons vu, recours à une grille entièrement fixe. En général, la limite supérieure du domaine du modèle (le côté supérieur du rectangle ; voir fig. 2a) représente la croûte terrestre. D'après les modélisateur·trice·s, c'est ici que réside le principal écueil de ce modèle dans l'optique d'une représentation des oscillations de la croûte, puisque cette limite supérieure ne peut mathématiquement être mise en mouvement. Notre enquête montre qu'une des solutions les plus répandues à ce qui pourrait s'apparenter à une voie sans issue, réside dans un tour de passe-passe. Si la limite supérieure du modèle (procédural) n'est plus la limite supérieure du système terrestre (conceptualisé), la situation devient en effet tout autre. Pour dissocier ces deux limites, les modélisateur·trice·s introduisent une couche fictive d'air collant. Les deux limites peuvent alors être traitées séparément : dissociée de la croûte terrestre (voir fig. 2b), la limite supérieure du domaine du modèle n'est plus qu'une frontière abstraite, requise par le traitement numérique mais sans aucune signification physique. Elle n'a plus à être mise en mouvement. La croûte terrestre et sa frontière avec le manteau se

trouvent à l'intérieur du domaine du modèle et les géodynamicien·ne·s peuvent dès lors en représenter les interactions grâce à des méthodes largement répandues, compatibles avec l'emploi d'une grille fixe<sup>6</sup>.

## Un hybride fictif mi-air, mi-roche

- 34 La couche d'air collant est donc une astuce permettant de séparer les deux limites (fig. 2b) et ainsi d'employer une grille fixe. Nullement présente dans le modèle conceptuel, cette entité fictive est pourtant dotée par les géodynamicien·ne·s de propriétés physiques, au même titre que tous les autres composants du modèle : une densité, une épaisseur, une viscosité. Les géodynamicien·ne·s n'assignent néanmoins pas ces valeurs au hasard. Bien que fictive, cette entité, une fois introduite dans le modèle numérique, a des effets sur le reste du modèle procédural et sur l'infrastructure de calcul nécessaire. L'ordinateur est en effet programmé pour résoudre les équations différentielles pour chacune des mailles de la grille, y compris les mailles représentant le tampon d'« air collant ». Rajouter des mailles signifie augmenter le nombre de calculs et *a fortiori* le temps requis afin de faire « tourner » le modèle et obtenir des résultats. Afin d'optimiser l'efficacité computationnelle de leur modèle, les géodynamicien·ne·s cherchent à réduire l'épaisseur de cette couche fictive, pour réduire le nombre de mailles à calculer. Néanmoins, plus cette couche est fine – s'approchant de la confusion entre limite de la croûte terrestre et limite du domaine modélisé –, plus elle résiste aux déformations de la surface terrestre et agit sur cette dernière en la cisillant. C'est justement ce que les géodynamicien·ne·s cherchent à éviter, car iels considèrent que cette couche fictive ne devrait pas agir sur la surface. En bref, pour reprendre les mots d'une des recherches les plus citées sur cette technique, celle-ci ne doit pas se faire « sentir » (Crameri *et al.*, 2012, p. 39).
- 35 Or, il est un fluide à l'interface avec la croûte terrestre qui, précisément, ne se fait pas « sentir » dans le système terrestre naturel : l'air<sup>7</sup>. C'est aux propriétés de l'air que les géodynamicien·ne·s dont nous relatons les travaux tentent de faire ressembler cette couche fictive ajoutée au modèle, en lui attribuant une densité proche de zéro. Toutefois, une autre propriété de l'air ne convient pas au regard de leurs objectifs de modélisation ; sa viscosité, en particulier, est très faible en comparaison de celle de la croûte terrestre adjacente. Les méthodes numériques tolèrent mal une si grande différence, un saut abrupt de valeurs d'une maille de la grille à l'autre. Tenant compte de ce comportement des méthodes numériques, les géodynamicien·ne·s surévaluent alors fortement la viscosité de l'air. Dans leur étude, Crameri *et al.* (2012) emploient ainsi une viscosité comprise entre  $10^{18}$  et  $10^{20}$  Pascal\*seconde (Pa\*s), près de cent mille milliards de milliards de fois supérieure à celle de l'air. L'adjectif « collant » qualifiant cet air-là peut donc paraître un euphémisme. De fait, de l'air, cette couche ne possède plus que la densité ; pour sa viscosité, elle ressemble aux roches partiellement fondues du manteau supérieur.
- 36 Inclure un composant ne représentant pas un élément du système observé et allant même à l'encontre de notre compréhension physique du monde, n'est en soi guère une exception en modélisation numérique. Winsberg notait la présence de ces éléments « *de nature différente de celle des idéalizations ordinaires, des approximations et des simplifications* » (2010, p. 87) qu'il désigne par le terme de fictions. Les atomes de silogène qu'il analyse en nanomécanique, la viscosité artificielle appliquée dans les

modélisations d'ondes de choc en dynamique des fluides (Winsberg, 2006), « l'opérateur d'Arakawa » étudié par Lenhard (2007) et le taux de contamination du faisceau de particules dans l'étude de l'expérience « Interactions K<sup>+</sup> - deutérium à 3 GeV/c » en physique des hautes énergies (Thill, 1973) partagent ainsi avec l'« air collant » la caractéristique d'être introduits dans les modèles numériques pour améliorer le pouvoir de représentation global de ces derniers. Comme formulé par Winsberg, « nous rendons les choses délibérément erronées localement pour les rendre globalement justes<sup>9</sup> » (2010, p. 92). Les éléments apportés dans les sections précédentes permettent de circonscrire le « local » esquissé dans la citation précédente de Winsberg et de le topographier. C'est à la limite supérieure du domaine du modèle – en ce lieu de friction entre une volonté de mise en mouvement (permettant un déploiement vers le traitement de nouvelles questions de recherches) et des trajectoires de modélisation basées sur un immobilisme total de la grille du modèle – qu'émerge l'« air collant » pour composer avec ces antagonismes.

- 37 Ainsi que nous l'avons observé dans plusieurs entretiens et dans nos interactions informelles dans le cadre de nos pratiques, les modélisateur-trice-s en sciences de la Terre et de l'environnement entretiennent souvent une relation ambivalente vis-à-vis de ces astuces de modélisation. D'un côté, celles-ci leur paraissent nécessaires dans leurs négociations avec l'infrastructure informatique et elles sont ainsi largement mobilisées et partagées. De l'autre, elles semblent être source d'embarras au moment d'exposer leur travail, comme si l'évocation de telles pratiques était susceptible de discréditer, aux yeux des interlocuteur-trice-s ou des lecteur-trice-s, les résultats des modèles qui les contiennent. Les prochaines sections s'intéresseront dès lors précisément à ce que les géodynamicien-ne-s font de la fiction de l'« air collant » pour la partager, la communiquer et dompter son impact sur le reste de leur modèle.

## L'air collant, objet de recherche à part entière

- 38 Alors que l'astuce consistant à superposer une couche supplémentaire à la croûte terrestre était connue en géodynamique au moins depuis Matsumoto et Tomoda (1983), le terme d'« air collant » semble avoir fait sa première apparition dans la littérature scientifique dans un article de Schmeling *et al.*, en 2008. Les auteur-trice-s l'utilisent alors aux côtés d'autres descriptions : « *soft surface layer* » (couche meuble de surface) ou « *artificial layer* » (couche artificielle). Voir en elle une couche de matériau meuble, c'est faire référence à sa viscosité. Voir en elle une couche d'air, c'est faire référence à sa densité. Il est dès lors peu étonnant que les auteur-trice-s oscillent entre ces deux dénominations, qui offrent chacune une analogie pour l'une des propriétés de la couche en question. Le terme de « couche artificielle » vient, lui, nous rappeler l'inexistence de cet élément dans le modèle conceptuel des sciences de la Terre.
- 39 Quelques années après Schmeling *et al.*, Quinquis, Buitier et Ellis (2011) reprennent abondamment le terme d'« air collant », allant jusqu'à parler de « couche d'« air » » (« *air layer* »). Ici, seuls les guillemets viennent rappeler la singularité de cet air, cent mille milliards de milliards de fois plus visqueux que le mélange gazeux que nous respirons. Toutefois c'est l'article de Crameri *et al.* (2012) qui semble avoir marqué un tournant définitif dans l'utilisation du terme – ainsi que dans l'utilisation de la technique elle-même. Pour la première fois, la « méthode de l'air collant » figure dans le titre d'un article scientifique. Les auteur-trice-s, dont la majorité sont affiliés à

l'institut de géophysique de l'EPFZ (voir plus haut), tentent d'évaluer la technique de l'« air collant » et de déterminer les conditions de validité de son utilisation. Iels le font non seulement de façon théorique – par analyse des équations physiques en jeu – mais aussi en comparant les modélisations numériques obtenues en intégrant une couche d'« air collant » à celles de modèles recourant à d'autres méthodes (une déformation verticale de la grille, entre autres). L'étude résulte en une équation permettant, selon les auteur·trice·s, de déterminer les fourchettes de valeurs « convenables » (« *suitable* ») pour la viscosité, l'épaisseur et la vitesse d'écoulement de l'« air collant ».

- 40 D'astuce employée discrètement, quasiment dissimulée dans la plupart des articles précédents, sans dénomination stabilisée, l'« air collant » se retrouve ainsi soudainement propulsé au rang d'objet de recherche. Sa capacité d'action est exhibée et évaluée. La problématique de l'article ne porte plus sur les phénomènes naturels que l'« air collant » contribue à permettre d'étudier, mais sur les propres agissements de cet objet et sur ses interactions avec le reste du modèle procédural. D'objet *servant* la recherche, l'« air collant » devient un objet *générant* des questions de recherche internes à la modélisation, sur son propre fonctionnement et son comportement. Il possède ainsi les caractéristiques que l'anthropologue Matt Spencer, reprenant les travaux de l'historien des sciences Hans-Jörg Rheinberger, attribue aux « objets épistémiques méthodologiques » dans les sciences computationnelles (Spencer, 2019). L'évolution marquée par l'« air collant » est loin d'être un cas isolé dans les méthodes numériques. Dès lors qu'il est envisagé que ces méthodes puissent agir – et pas uniquement de la manière prévue par les modélisateur·trice·s – celles-ci font l'objet d'analyses de leurs comportements dans différentes situations. Dans un entretien réalisé en janvier 2022, l'un des co-auteur·trice·s de l'article de Crameri *et al.* (2012) s'amusait rétrospectivement du fait que l'étude en question n'ait été effectuée qu'après l'« utilisation empirique » de l'« air collant ». Or ce sont sans doute précisément la circulation rapide de l'« air collant » dans la communauté géodynamique et son enjeu – l'ouverture des modèles existants à l'étude des mouvements de la surface de la Terre – qui expliquent que le comportement et les propriétés de l'« air collant » ont été jugées suffisamment dignes d'intérêt pour mettre sur pied une étude d'une telle envergure et la publier. Dix chercheur·euse·s y participent, dont plusieurs des grands noms de la géodynamique européenne. Iels manipulent six modèles différents pour les besoins de l'étude. Chaque modèle possédant son propre réseau d'utilisateur·trice·s, aux approches et trajectoires de modélisations variées, l'évaluation de l'« air collant » effectuée par les auteur·trice·s peut paraître globale ; cette comparaison multi-modèles contribue à la crédibilisation de la méthode pour un large public. L'article, paru dans un journal de géophysique reconnu, semble depuis être devenu une citation incontournable pour toute recherche incluant l'« air collant ». Mieux encore, il remplace la description de la technique et de son fonctionnement dans de nombreux articles ultérieurs<sup>10</sup>, comme si l'exhibition de l'astuce dans l'article de Crameri *et al.* (2012) permettait désormais de refermer la boîte noire.

## Faire référence à l'air comme façon de crédibiliser

- 41 L'étude menée par Fabio Crameri et ses collègues a certes contribué à asseoir la crédibilité de l'« air collant » par le statut octroyé à cette technique, l'implication de différents modèles manipulés par des collectifs distincts et la participation de chercheur·euse·s possédant une autorité dans la discipline. Nous soutenons néanmoins

que sa dénomination stabilisée (l'« air collant », plutôt que la « couche molle de surface » ou la « couche artificielle » des débuts) y participe également. Qu'elle l'ait emporté sur les premières descriptions concurrentes semble en effet tenir aux tentatives de donner à ce composant un sens au sein du modèle conceptuel. La couche d'air collant est une astuce relevant du modèle procédural, du traitement numérique du système à l'étude. Elle possède un rôle et une justification au sein de ce modèle procédural, mais elle n'en possède aucun dans le modèle conceptuel. Dès lors qu'elle est qualifiée d'air, elle se trouve néanmoins également chargée de sens au regard du modèle conceptuel. La croûte terrestre est bien surmontée d'air ! Intégrer une portion de l'atmosphère dans la « boîte » du modèle ne paraît pas saugrenu. Rajouter une couche de plusieurs dizaines de kilomètres d'un matériau solide extrêmement visqueux au-dessus de la croûte terrestre, en revanche, est plus susceptible d'interroger les lecteur-trice-s en géodynamique : rien de tel dans le système naturel que nous connaissons. En désignant la couche-tampon par le substantif « air », les auteur-trice-s de géodynamique appuient ainsi sur la similitude avec le modèle conceptuel et insistent sur la moitié pleine du verre. Adjectivée, la différence est, elle, reléguée au second plan et à la simple fonction d'attribut : cet air est collant. Un adjectif dès lors susceptible de n'être plus que suggéré (notamment par des guillemets – voir la citation de Quinquis, Buitier & Ellis, 2011, ci-dessus), voire supprimé par souci de concision, jusque dans le nom des variables :

La moitié supérieure du modèle est remplie d'une épaisse couche d'« air collant », de densité  $\rho_{\text{air}}$  et de viscosité  $\eta_{\text{air}}$  pour simuler une surface libre<sup>11</sup> (Fuchs, Koyi & Schmeling, 2015, p. 82)

- 42 La confusion entre l'air collant et l'air de notre système naturel n'est pas sans rappeler celle observée par l'anthropologue Myanna Lahsen (2005) entre l'élément modélisé et l'élément observé dans la communication orale des modélisateur-trice-s en climatologie. Le flou (entretenu de manière involontaire ou non) entre les deux signifiés, la relégation de cette viscosité si particulière à un attribut (« collant ») somme toute peu décrit, semblent aussi contribuer à consolider la crédibilité de la méthode, de même que l'emploi du substantif « air » se référant à un élément qui entoure effectivement la croûte terrestre. Nous ne voyons pas dans cette confusion un leurre avéré, ayant pour but d'induire en erreur les lecteur-trice-s en géodynamique sur la nature de cette couche. Il s'agit bien plus d'une tentative d'atténuation du caractère fictif de cet élément, par crainte – semble-t-il répandue dans les sciences de la Terre et de l'environnement – que l'évocation d'une telle fiction puisse diminuer le pouvoir de représentation des modélisations. Les sections de méthodologie des articles de modélisation géodynamique agissent ainsi comme des boîtes grises, tantôt exhibant leurs composants pour permettre aux lecteur-trice-s d'en saisir l'imbrication, d'évaluer la méthode et de la réemployer, tantôt invisibilisant certaines de leurs propriétés pour ne pas ouvrir de brèche dans un édifice destiné à résister aux critiques des relecteur-trice-s et des pairs. Nous noterons que la singularité de l'« air collant » – son absence de signification physique et son extrême viscosité en comparaison avec l'air – est très peu discutée dans la littérature géodynamique. Seul un article de Duretz, May et Yamato (2016), présentant une technique alternative, relève explicitement sa nature fictive. Celle-ci n'est toutefois épinglée comme une limitation qu'en conclusion de l'article, dans une énumération finale des avantages de leur méthode qui, contrairement à celle de l'« air collant », « ne requiert pas d'effectuer des choix arbitraires sur les propriétés matérielles d'un fluide fictif »<sup>12</sup>. Le parcours de deux des

auteurs – co-auteurs de l'étude sur l'« air collant » de Crameri *et al.* (2012) – et certains propos recueillis en entretien nous incitent néanmoins à mettre cette formule sur le compte de la rhétorique, plutôt que d'y voir le signe d'une controverse existante.

## Représenter l'être fictif

- 43 Les modélisations numériques dans les sciences de la Terre font l'objet de nombreuses publications scientifiques sous forme d'articles. Les auteur·trices y décrivent généralement dans leur méthodologie, le modèle utilisé et ses principales équations, les valeurs de paramètres choisies, les approximations effectuées, ainsi que la résolution spatiale et temporelle employée. En comparaison avec d'autres disciplines des sciences de la Terre (telles que l'hydrologie, la géomorphologie, la climatologie ou l'océanographie), les géodynamicien·nes ajoutent à leurs articles une représentation visuelle du domaine du modèle, composée des différentes couches modélisées. Les géodynamicien·nes s'intéressant précisément à l'évolution dynamique de ces couches, ces schémas initiaux prennent toute leur importance.
- 44 Le recours à cette entité fictive est une convention entre géodynamicien·nes qui les place néanmoins dans une situation insolite. La couche d'« air collant » faisant partie du domaine du modèle, iels lui donnent une présence visuelle : une surface délimitée, un code couleur, une légende. Si l'existence numérique de cette entité est noyée parmi des milliers de lignes de code informatique et n'apparaît qu'aux personnes en mesure les lire, en revanche, son existence visuelle est manifeste ; la couche d'« air collant » s'affiche à découvert, au côté des couches de matériau (croûte continentale, sédiments, manteau, par exemple) dont le comportement forme l'objet central des articles publiés. Elle n'en demeure pas moins discrète. Les auteur·trices lui attribuent le plus souvent le blanc, tandis que les autres couches sont abondamment colorées. Blanche sur la feuille blanche, ou blanche sur le document électronique au fond blanc, la couche d'« air collant » est presque invisible : elle ne se dévoile aux lecteur·trices que par l'espace qu'elle laisse, de par sa présence, entre la limite supérieure du modèle et la surface de la Terre.

Figure 3 : Représentation visuelle de la couche d'air collant

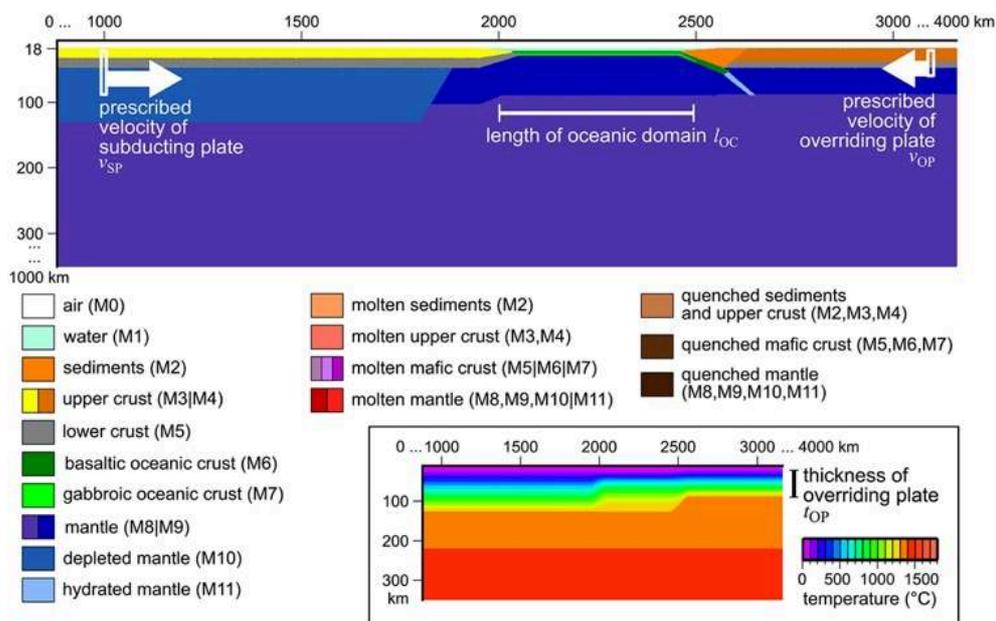


Illustration figurant dans l'article de Maierová, Schulmann et Gerya (2018) et représentant la distribution initiale des « matériaux » dans le domaine du modèle ainsi que le champ de température. À l'aide du modèle employé, les chercheur-euse-s visent à simuler les transformations de la croûte continentale lors d'une collision entre deux plaques tectoniques.

Crédits : © American Geophysical Union, tous droits réservés. Reproduit avec l'autorisation de l'éditeur.

- 45 La figure 3 reproduit l'une de ces représentations. Une fine bande blanche y surmonte le reste du domaine du modèle. La légende la désignant est ici particulièrement d'intérêt. Le substantif employé de manière isolée (air) laisse à nouveau penser que les auteurs souhaitaient réellement inclure les dix-huit premiers kilomètres de l'atmosphère dans leur modèle conceptuel. Nous savons qu'il n'en est rien, puisque l'atmosphère n'y joue aucun rôle. Dans leur numérotation, les auteurs l'abrègent par le code M0 ; l'air est le matériau (M) zéro. Cette numérotation traduit bien la position ambiguë de la couche d'air collant, matériau inclus dans le domaine du modèle et donc représenté, mais matériau d'un autre type, qui ne devrait pas influencer, ne pas compter, pas plus qu'il ne compte dans le modèle conceptuel.

### L'« instabilité du marin saoul » : un effet indésirable de l'entité fictive appelant d'autres astuces de modélisation

- 46 La couche d'« air collant » influe pourtant, bien plus que les analogies à l'air ne pourraient le laisser croire. D'abord par le simple fait qu'elle occupe des mailles supplémentaires de la grille du modèle, ce qui augmente le coût computationnel de la modélisation (voir plus haut). Ensuite de manière plus directe encore sur le reste du modèle, comme nous le verrons ci-après.
- 47 L'air collant permet certes aux géodynamicien-ne-s de modéliser la croûte terrestre comme une surface libre, pouvant se déformer, mais aussi être instable. En effet, les surfaces libres tendent à faire surgir une anomalie au sein des modèles numériques connue sous le nom d'« instabilité du marin saoul » (*drunken sailor instability* : Kaus *et al.*, 2010 ; Gerya, 2019). La vitesse d'écoulement des roches se met alors à changer de sens à

chaque intervalle de temps (Kaus *et al.*, 2010), soulevant puis abaissant la croûte terrestre à répétition. Ce problème est le revers de la médaille du succès de la méthode ; c'est parce que les géodynamicien-ne-s parviennent à approximer une surface libre qu'ils font face à cette étonnante croûte terrestre oscillante, perturbant leurs résultats.

- 48 Le chemin tracé par les modélisateur-trice-s pour façonner l'astuce de l'« air collant » était déjà bien sinueux ; quelques virages supplémentaires sont toutefois encore nécessaire pour venir à bout de cette anomalie. Différents palliatifs, notamment des algorithmes de stabilisation (Duretz *et al.*, 2011 ; Kaus *et al.*, 2010) et des schémas d'intégration temporelle (Furuichi & May, 2015) ont été développés et intégrés aux modèles. Ces nouvelles astuces numériques sont elles aussi totalement absentes du modèle conceptuel du système naturel étudié. Elles ne font pour ainsi dire « que » corriger les effets indésirables de l'entité fictive introduite antérieurement, l'« air collant ». Pour autant, elles connaissent une existence propre dans la littérature géoscientifique. Leurs effets sur les équations gouvernant le modèle, sur les résultats des modélisations et sur la consommation en ressources sont analysés, évalués et discutés.
- 49 Le nombre important de publications scientifiques que les méthodes numériques génèrent, leur présentation et discussion répétées dans le cadre de conférences, attestent des enjeux qu'elles représentent pour la communauté géodynamique. Il ne s'agit pas de simples détails techniques d'un processus rodé. Au contraire, nous nous accordons avec l'anthropologue Matt Spencer (2019) sur le fait que les méthodes numériques sont des objets de recherche qui mobilisent les chercheur-euse-s dans les disciplines qui les développent et les emploient. Ces méthodes, astuces et entités fictives animent des communautés de recherche pour qui elles constituent des objets épistémiques, au même titre que les phénomènes qu'elles permettent *in fine* d'explorer.

## Conclusion

- 50 Suivant des trajectoires de modélisation à la fois verrouillées et en déploiement, les géodynamicien-ne-s et les êtres qu'ils produisent et mobilisent tracent des parcours sinueux, enjambant les obstacles successifs par des tours de passe-passe mathématiques, numériques et conceptuels, objets de discussions et d'élaborations consensuelles. Le premier enseignement de cette étude de cas réside précisément dans la non-linéarité de ce parcours, à l'encontre de ce que les flèches unidirectionnelles des schémas d'opérations (voir fig. 1) suggèrent de l'activité de modélisation. Le passage d'une description quantitative des processus à l'œuvre (le modèle conceptuel) à un modèle mathématique, puis à un code exécutable par l'ordinateur (le modèle procédural) engage les modélisateur-trice-s dans des explorations collectives, des négociations et des constructions de compromis – entre les trajectoires de modélisation parfois verrouillées sur lesquelles ils évoluent conjointement, les volontés de déploiement stratégique vers de nouveaux objectifs, leur compréhension des processus, les limites matérielles et économiques de leur infrastructure, et l'adéquation des résultats au modèle conceptuel sur lequel iels reviennent. Ces dynamiques varient selon les situations de modélisation. Il ne s'agit pas d'une série d'opérations transposables ou automatisables. La sociologue Mikaela Sundberg résume le passage au code exécutable par le terme de « traduction » (2010, p. 273) qu'il convient de

comprendre au sens de la théorie de l'acteur-réseau comme déplacement, transformation et trahison des entités en présence – en l'occurrence le modèle conceptuel et le modèle procédural – qui fonde leur mise en équivalence (Callon, 1986) et leur re-création (Eco, 2007). Au cours des transformations du modèle mathématique en modèle procédural, le système terrestre modélisé est en effet considérablement modifié. Ce dernier n'a pas seulement été découpé en un nombre fini de mailles afin de permettre l'approximation des solutions des équations différentielles employées. Les processus s'y déroulant à une échelle inférieure à celle des mailles n'ont pas seulement dû être simplifiés. À l'instar du processus de (re)<sup>n</sup>-présentation que décrit Bruno Latour (1993), le système terrestre s'est également enrichi, en l'occurrence d'un nouveau composant. Une couche de plusieurs dizaines de kilomètres d'un matériau inconnu dans notre monde sensible, présentant à la fois la densité de l'air et une viscosité proche de celle du manteau terrestre, est venue recouvrir la surface de notre planète.

- 51 Cette astuce numérique ne demeure pas enfermée à l'intérieur du domaine procédural. Nous avons vu comment certain·es auteur·trice·s en géodynamique la font naviguer à contre-courant, par le biais d'un glissement sémantique, jusqu'au modèle conceptuel dont cet hybride aurait pu être issu. En fait, les méthodes numériques doivent être mises en mots pour être présentées, analysées et partagées avec les pairs. L'analyse d'articles scientifiques a permis de soulever l'un des enjeux lié à la mise en mots de ces morceaux de codes informatiques : celui d'une crédibilité supplémentaire recherchée par la dénomination et l'image, qui mériterait d'être saisie par des études ethnographiques. Au sein des articles scientifiques analysés, la confusion entretenue entre les deux signifiants de l'air (collant ou non) fait disparaître les frontières entre modèles conceptuels, mathématiques et procéduraux. Cet « air », blanc (donc invisible sur la feuille de papier), matériau zéro (ne comptant pas), n'est-il pas l'air-sans-guillemets ? L'astuce numérique, dans tout ce qu'elle a de fictionnel (Winsberg, 2010), s'efface ; du fait du choix des mots et de la représentation visuelle, ne semble demeurer que le mélange gazeux dont nous n'oserions remettre en question la présence. Il faudra se rappeler sa genèse, du cheminement ponctué de négociations et explorations multiples au contact des trajectoires et des limites du modèle, pour éviter le leurre et voir en cet air collant un élément créé pour les seuls besoins du modèle procédural.
- 52 Cette observation n'est pas sans conséquences pour notre approche de la modélisation numérique. D'abord parce qu'elle démontre, en paraphrasant Lenhard (2007, p. 87) avec notre propre terminologie, que le modèle procédural est partiellement désengagé des modèles conceptuels et mathématiques. Y surgit en effet un élément absent des modèles conceptuels et mathématiques, ni dérivé, ni approximé à partir de ces derniers. Le passage du modèle mathématique au modèle procédural, exécutable sur l'ordinateur, est ainsi le résultat d'une création nouvelle, d'une re-modélisation à part entière, négociée avec les contraintes particulières du traitement numérique. Le fait de voir dans cette étape du « rendre exécutable » un processus créatif, à l'instar de Winsberg (2010) et de Spencer (2012b), s'oppose au déterminisme technologique souvent suggéré, faute d'enquêter sur cette étape du travail, par les travaux d'études des sciences consacrés à la modélisation. Notre étude de la « méthode de l'air collant » a mis en exergue l'existence de choix, de cheminements alternatifs co-existants pour l'implémentation d'un même processus. Pour les géodynamicien·ne·s rencontrées, la « méthode de l'air collant » n'est ainsi qu'un itinéraire possible parmi d'autres. Qu'il soit retenu par nombre d'entre elles et eux ne saurait s'expliquer uniquement par une

comparaison du coût computationnel des différentes méthodes. Le poids des dépendances de sentier, de l'expérience individuelle et disciplinaire accumulées, des collaborations, gagnerait à être plus largement étudié par des études de terrain. Celles-ci permettraient de mieux saisir l'émergence et la stabilisation des pratiques de modélisation numérique, qui nourrissent une part toujours plus considérable de la recherche scientifique dans les sciences de la Terre.

- 53 Si pratiques créatives et négociées il y a, si le développement et le choix d'une méthode numérique revêtent une si grande importance à l'intérieur des disciplines les employant, il est en effet étonnant que l'étude des modèles procéduraux ait jusqu'ici principalement été l'apanage des philosophes des sciences<sup>13</sup>. Spencer (2012b et 2019) et ses travaux ethnographiques sur les modèles en sciences computationnelles en constituent une exception notable, bien qu'ignorée jusqu'ici des différentes approches de la modélisation géoscientifique par les études des sciences. La « méthode de l'air collant », dissociant les limites du domaine du modèle et celle de la croûte et du manteau, nous enjoint finalement à enjamber d'autres limites : celles démarquant les territoires des études de la modélisation des sciences de la Terre, d'une part, des études des sciences computationnelles, de l'autre – pourtant indéniablement imbriquées par la nature-même de l'instrument numérique.

*Nous remercions vivement Thibault Duretz pour les échanges autour de cet article à différents stades de son écriture, ainsi que les autres géodynamicien-ne-s contacté-e-s pour leur disponibilité et l'enthousiasme contagieux avec lequel iels nous ont parlé de leurs recherches. Une version antérieure de cet article a fait l'objet d'un atelier doctoral du STS Lab de l'Université de Lausanne et a bénéficié de retours du comité de rédaction de la revue Terrains & Travaux. Enfin, nous remercions les quatre lecteur-trice-s anonymes de la RAC pour leurs précieux commentaires, qui nous ont permis d'améliorer significativement la version actuelle.*

---

## BIBLIOGRAPHIE

- Armatte, M. & Dahan Dalmedico, A. (2004). Modèles et modélisations, 1950-2000 : Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux. *Revue d'histoire des sciences*, 57(2), 243-303.
- Babel, L., Vinck, D. & Karssenbergh, D. (2019). Decision-making in model construction: unveiling habits. *Environmental Modelling & Software*, 120, 104490.
- Balazs, A., Faccenna, C., Ueda, K., Funicello, F., Boutoux, A., Blanc, E. J.-P. & Gerya, T. (2021). Oblique subduction and mantle flow control on upper plate deformation: 3D geodynamic modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, (569), 117056.
- Beven, K. (1993). Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. *Advances in Water Resources*, 16(1), 41-51.
- Braun, J. (2010). The many surface expressions of mantle dynamics. *Nature Geoscience*, 3(12), 825-833.

- Burbank, D. W. & Pinter, N. (1999). Landscape evolution: the interactions of tectonics and surface processes. *Basin Research*, 11, 1-6.
- Callon, M. (1986). Éléments pour une sociologie de la traduction. La domestication des coquilles Saint-Jacques dans la Baie de Saint-Brieuc. *L'Année sociologique*, (36), 169-208.
- Crameri, F., Schmeling, H., Golabek, G.J., Duretz, T., Orendt, R., Buitert, S.J.H., May, D.A., Kaus, B.J.P., Gerya, T.V. & Tackley, P.J. (2012). A comparison of numerical surface topography calculations in geodynamic modelling: An evaluation of the 'sticky air' method: Modelling topography in geodynamics. *Geophysical Journal International*, 189(1), 38-54.
- Dahan Dalmedico, A. (2007). Models and simulations in climate change. Historical, epistemological, anthropological and political aspects. In A.N.H Creager, E. Lunbeck & M. Norton Wise (dir.). *Science Without Laws: Model Systems, Cases, Exemplary Narratives*. Durham: Duke University Press.
- David, P. A. (1985). Clio and the Economics of QWERTY. *The American Economic Review*, 75(2), 332-337.
- Dowling, D. (1999). Experimenting on Theories. *Science in Context*, 12 (2), 261-273.
- Duretz, T., May, D. A., Gerya, T. V. & Tackley, P. J. (2011). Discretization errors and free surface stabilization in the finite difference and marker-in-cell method for applied geodynamics: A numerical stud., *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12(7).
- Duretz, T., May, D., Yamato, P. (2016). A free surface capturing discretization for the staggered grid finite difference scheme. *Geophysical Journal International*, 204, 1518-1530.
- Eco, U. (2007). *Dire presque la même chose*. Paris : Grasset.
- Edwards, P., Jackson, S., Bowker, G., Knobel, C. (2007). Understanding Infrastructure: Dynamics, Tensions, and Design. Report of a Workshop on "History & Theory of Infrastructure: Lessons for New Scientific Cyberinfrastructure".
- Edwards, P. (2013). *A Vast Machine: Computer Models, Climate Data, And The Politics Of Global Warming*. Cambridge: The MIT Press.
- Fuchs, L., Koyi, H. & Schmeling, H. (2015). Numerical modeling of the effect of composite rheology on internal deformation in down-built diapirs. *Tectonophysics*, (646), 79-95.
- Fujimura, J. H. (1987). Constructing 'Do-able' Problems in Cancer Research: Articulating Alignment. *Social Studies of Science*, 17(2).
- Furuichi, M. & May, D. A. (2015). Implicit solution of the material transport in Stokes flow simulation: Toward thermal convection simulation surrounded by free surface. *Computer Physics Communications*, (192), 1-11.
- Gerya, T. (2019). *Introduction to Numerical Geodynamic Modelling*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Gramelsberger, G. (2011). What do numerical (climate) models really represent? *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 42(2), 296-302.
- Guillemot, H. (2009). Comment évaluer un modèle numérique de climat ? *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3(2), 273-293. <https://journals.openedition.org/rac/17941>
- Ismail-Zadeh, A., Tackley, P. (2010). *Computational Methods for Geodynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Hager, B., Clayton, C., Richards, M., Comer, R. & Dziewonski, A. (1985). Lower mantle heterogeneity, dynamic topography and the geoid. *Nature*, 313, 541-545.
- Kaus, B. J. P., Mühlhaus, H. & May, D. A. (2010). A stabilization algorithm for geodynamic numerical simulations with a free surface. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 181(1-2), 12-20.
- Koons, P.O. (1989). The topographic evolution of collisional mountain belts: a numeric look at the Southern Alps, New Zealand. *American Journal of Science*, 289(9), 1041-1069.
- Knutti, R. (2008). Should we believe model predictions of future climate change? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1885), 4647-4664.
- Lahsen, M. (2005). Seductive Simulations? Uncertainty Distribution Around Climate Models. *Social Studies of Science*, 35(6), 895-922.
- Latour, B. (1993). Le topofil de Boa Vista ou la référence scientifique - montage photo-philosophique. *Raison Pratique*, (4), 187-216.
- Lenhard, J. (2007). Computer Simulation: The Cooperation between Experimenting and Modeling. *Philosophy of Science*, 74(2), 176-194.
- Lloyd, E.A. (2010). Confirmation and Robustness of Climate Models. *Philosophy of Science*, 77(5), 971-984.
- Maierová, P. & Schulmann, K. & Gerya, T. (2018). Relamination Styles in Collisional Orogens. *Tectonics*, 37(1), 224-250.
- Matsumoto, T. & Tomodo, Y. (1983). Numerical simulation of the initiation of subduction at the fracture zone. *Journal of Physics of the Earth*, 31, 183-194.
- Moreno, J.C. & Vinck, D. (2021). Rencontres entre philosophie des sciences, philosophie de la technologie et STS. *Revue d'anthropologie des connaissances*, 15(2), [En ligne] <https://doi.org/10.4000/rac.22354>.
- Morgan, M.S. & Morrison, M. (eds.) (1999) *Models as Mediators: Perspectives on Natural and Social Science*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Pickering, A. (1985). Rôle des intérêts sociaux en physique des hautes énergies. Le choix entre charme et couleur. In M. Callon & B. Latour (éd.). *Les scientifiques et leurs alliés*. Paris : Pandore.
- Quinquis, M. E. T., Buitter, S. J. H., Ellis, S., 2010. The role of boundary conditions in numerical models of subduction zone dynamics, *Tectonophysics*, 497, 57-70.
- Rykiel, E. J., 1996. Testing ecological models: The meaning of validation, *Ecological Modelling*, 90(3), 229-244.
- Odenbaugh, J. (2005). Idealized, Inaccurate but Successful: A Pragmatic Approach to Evaluating Models in Theoretical Ecology, *Biology & Philosophy*, 20(2-3), 231-255.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K. & Belitz, K. (1994). Verification, Validation, and Confirmation of Numerical Models in the Earth Sciences. *Science*, 263(5147), 641-646.
- Schmeling, H., Babeyko, A.Y., Enns, A., Faccenna, C., Funiciello, F., Gerya, T., Golabek, G.J., Grigulla, S., Kaus, B.J.P., Morra, G., Schmalholz, S.M. & van Hunen, J. (2008). A benchmark comparison of spontaneous subduction models. Towards a free surface. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4), 198-223.
- Sismondo, S. (1999). Models, Simulations, and Their Objects. *Science in Context*, 12 (2), 247-260.

- Spencer, M. (2012a). Image and Practice: Visualization in Computational Fluid Dynamics Research. *Interdisciplinary Science Reviews*, 37(1), 86-100.
- Spencer, M. (2012b). *Reason and Representation in Scientific Simulation*. Thèse de Doctorat pour l'Université de Londres, Londres.
- Spencer, M. (2019). The difference a method makes: Methods as epistemic objects in computational science. *Distinktion: Journal of Social Theory*, 20(3), 313-327.
- Sundberg, M. (2010). Cultures of simulations vs. cultures of calculations? The development of simulation practices in meteorology and astrophysics. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 41(3), 273-281.
- Sundberg, M. (2011). The dynamics of coordinated comparisons: How simulationists in astrophysics, oceanography and meteorology create standards for results. *Social Studies of Science*, 41(1), 107-125.
- Thill, G. (1973). *La fête scientifique. D'une praxéologie scientifique à une analyse de la décision chrétienne*. Paris, Bruxelles : Aubier-Cerf-Delachaux-Desclée De Brouwer.
- Winsberg, E. (2006). Models of Success Versus the Success of Models: Reliability without Truth. *Synthese*, 152(1), 1-19.
- Winsberg, E. (2010). *Science In The Age Of Computer Simulation*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Zhong, S., Gurnis, M. & Moresi, L. (1996). Free-surface formulation of mantle convection-I. Basic theory and application to plumes. *Geophysical Journal International*, 127(3), 708-718.

## NOTES

1. Dans le cadre de sa pratique, la co-auteure de cet article a observé que ces croquis pouvaient par exemple prendre la forme de d'esquisses très simples (en quelques traits) du système à modéliser. Ils pouvaient être surmontés d'un quadrillage représentant la « grille » du modèle, avec des bouts d'équations (ou d'instructions informatiques) reliés à certains éléments du pavage.
2. Le résultat de l'action du manteau sur la croûte terrestre est qualifié de « topographie dynamique ». L'adjectif « dynamique » vise à distinguer cette topographie du relief généré par les interactions entre plaques tectoniques (par glissement, écartement ou subduction). La topographie dynamique est d'amplitude relativement faible : de l'ordre de 1000 m de différence de hauteur (positive ou négative) sur une distance de plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres (Braun, 2010).
3. Historiquement, certains modélisateur-trice-s se sont contenté-es de calculer les mouvements de la croûte terrestre sans les simuler explicitement. Les géodynamicien-ne-s modélisaient les forces exercées par le manteau sur la croûte et tentaient de déterminer par calcul l'élévation ou l'abaissement qui en résultait. Dans ces modèles, la croûte terrestre n'était donc pas mise en mouvement. Néanmoins, cette technique, qui présuppose de nombreuses approximations (Zhong *et al.*, 1996), semble considérée comme dépassée dans la littérature géodynamique actuelle.
4. Les géodynamicien-ne-s ont recours à des « méthodes de résolution numérique » pour approximer les résultats des équations différentielles partielles qu'ils emploient. Elles existent au nombre de trois : la méthode « des différences finies », la méthode « des éléments finis » et enfin la méthode « des volumes finis », qui n'est encore que très rarement utilisée en géodynamique.

5. « It's just the preference, to some extent, of the person who is coding it up in the first place ». Nous noterons qu'*a posteriori*, le choix d'une des deux méthodes de résolution est fréquemment justifié dans la littérature géodynamique par des avantages en matière de facilité d'implémentation, d'efficacité computationnelle ou de compatibilité avec les objectifs de recherche.
  6. Il s'agit principalement de techniques consistant à insérer des marqueurs (« *markers* »), particules représentant la position de la surface de la Terre et pouvant être mises en mouvement à l'intérieur d'une grille fixe (voir Gerya, 2019).
  7. C'est également le cas de l'eau ; certaines géodynamiciennes appliquent ainsi, selon la situation modélisée, la densité de l'eau à leur couche d'« air collant ».
  8. « that are different in kind from ordinary idealizations, approximations, and simplifications ».
  9. « We are deliberately getting things wrong locally so that we get things right globally ».
  10. Balazs *et al.* (2021) écrivent en guise d'unique description qu'« une couche de 20 km d'« air collant » est définie en-haut du modèle (Crameri *et al.*, 2012) ». Cet exemple est représentatif d'un grand nombre de publications.
  11. « The upper half of the model is filled with a thick layer of “sticky air” with a density  $\rho_{\text{air}}$  and a viscosity of  $\eta_{\text{air}}$  to simulate a free surface ».
  12. « The method does not require arbitrary choices to be made for material properties associated with a fictitious fluid ».
  13. Mentionnons, en plus des auteur·rice·s précités, Gramelsberger (2011) et ses travaux sur l'impact des modifications engendrées par le codage informatique sur le pouvoir de représentation des modèles.
- 

## RÉSUMÉS

Les modèles numériques nourrissent une part substantielle de la recherche en sciences de la Terre. Afin de pouvoir être exécutées sur ordinateur, les représentations mathématiques des processus qu'ils décrivent sont transformées en programme informatique. L'article se propose de suivre ce passage et d'interroger ce qu'implique le fait de rendre exécutable, au moyen de l'étude d'une méthode numérique employée en géodynamique et dite de « l'air collant ». Cette dernière consiste à surmonter la croûte terrestre d'un matériau hybride d'une viscosité cent mille milliards de milliards ( $10^{23}$ ) de fois supérieure à l'air et atteste des transformations requises afin de composer avec les contraintes du traitement numérique. Loin de n'être qu'une étape marginale et automatique du processus de modélisation, l'élaboration d'un code exécutable relève ainsi de pratiques profondément créatives et négociées.

Numerical models contribute to a substantial part of research conducted in Earth sciences. To be executed on a computer, the mathematical representations they depict are transformed into a computer program. The present article aims at following this transformation and at questioning the implications of rendering a representation computationally executable. It uses to this end a case study of the so-called “sticky air” numerical method employed in geodynamics, which consists of putting a layer of a hybrid material – a hundred thousand quintillion ( $10^{23}$ ) times more viscous than air – on top of the Earth crust. Far from being only a marginal and automatic step in the modelling process, the constitution of an executable computer code is the result of a profoundly creative and negotiated practice.

Los modelos numéricos constituyen una parte sustancial de la investigación en ciencias de la tierra. Para ser ejecutadas en una computadora, las representaciones matemáticas de los procesos que describen son transformados en programas informáticos. Este artículo pretende seguir este proceso y examinar lo que supone el hacer ejecutable un método numérico utilizado en geodinámica, conocido como «aire pegajoso». Este método consiste en superar la corteza terrestre con un material híbrido cuya viscosidad es cien mil trillones ( $10^{23}$ ) veces mayor que la del aire, y da fe de las transformaciones necesarias para hacer frente a las limitaciones del procesamiento digital. Lejos de ser un paso marginal y automático en el proceso de modelización, el desarrollo de código ejecutable es, por tanto, una práctica profundamente creativa y negociada.

Numerische Modelle sind ein wesentlicher Bestandteil der Forschung in den Geowissenschaften. Um auf einem Computer ausgeführt werden zu können, werden die mathematischen Darstellungen der Prozesse, die sie beschreiben, in ein Computerprogramm umgewandelt. Der Artikel verfolgt diesen Prozess und untersucht, was es bedeutet, etwas ausführbar zu machen. Dafür untersucht er eine numerische Methode der Geodynamik, die sogenannte Methode der „klebrigen Luft“ (sticky air method). Bei dieser Methode wird die Erdkruste mit einem Hybridmaterial überzogen, dessen Viskosität hundert Trillionen ( $10^{23}$ ) Mal höher ist als die von Luft; sie veranschaulicht die Transformationen, die notwendig sind, um mit den Einschränkungen der numerischen Verarbeitung zurechtzukommen. Die Entwicklung eines ausführbaren Codes ist also keineswegs nur eine marginale und automatische Phase des Modellierungsprozesses, sondern ein zutiefst kreatives und ausgehandeltes Verfahren.

## INDEX

**Mots-clés** : modélisation, méthode numérique, géodynamique, sciences de la Terre

**Schlüsselwörter** : Modellierung, Numerische Methode, Geodynamik, Geowissenschaften

**Keywords** : modelling, numerical method, geodynamics, Earth sciences

**Palabras claves** : modelización, método numérico, geodinámica, ciencias de la tierra

## AUTEURS

### LUCIE BABEL

Formée en hydrologie, doctorante au département de géographie physique de l'Université d'Utrecht (Pays-Bas) et également affiliée au Laboratoire d'étude des sciences et techniques de l'Université de Lausanne. Sa thèse porte sur les pratiques de modélisation dans les sciences de la Terre et de l'environnement.

Adresse : Department of Physical Geography, Faculty of Geosciences, Utrecht University, NL-3584 CB Utrecht (Pays-Bas).

Courriel : l.v.babel[at]uu.nl

### DOMINIQUE VINCK

Professeur ordinaire d'études sociales des sciences et des techniques à l'Université de Lausanne et au sein du Collège des Humanités de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Membre du STS Lab de l'UNIL. Ses recherches portent sur la sociologie des sciences et de l'innovation. Il investit le domaine de l'ingénierie des cultures et humanités numériques. Il a publié notamment :

*Ingénieurs au quotidien. Ethnographie de l'activité de conception et d'innovation* (PUG, Grenoble, 1999) ; *Pratiques de l'interdisciplinarité* (PUG, Grenoble, 2000) ; *Sciences et sociétés. Sociologie du travail scientifique* (A.Colin, Paris, 2007) ; *Comment les acteurs s'arrangent avec l'incertitude* (EAC, 2009) ; *Les Masques de la convergence* (EAC, 2012) ; *Ingénieur aujourd'hui* (PPUR, 2015), *Sciences et technologies émergentes : pourquoi tant de promesses ?* (Hermann, 2015) ; *Humanités numériques : la culture face aux nouvelles technologies* (Le Cavalier Bleu, 2016) ; *Critical studies of innovation: Alternatives to the Pro-Innovation Bias* (Edward Elgar, 2017) ; *Les métiers de l'ombre de la Fête des Vignerons* (Antipodes, 2019) ; *Staging Collaborative Design and Innovation: An Action-Oriented Participatory Approach* (Edward Elgar, 2020) ; *Handbook on Alternative Theories of Innovation* (Edward Elgar, 2021) ; *Faire sans, faire avec mois. Les nouveaux horizons de l'innovation* (Presses des Mines, 2022).

ORCID : <http://orcid.org/0000-0001-7835-7008>

Adresse : STS Lab, Institut des sciences sociales, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne (Suisse).

Courriel : Dominique.Vinck[at]unil.ch