



Utilisation du paradigme “ Agent-based Computational Economics ” (ACE) pour appui à l’analyse multi-acteurs des filières ressources minérales et/ou de leur économie circulaire

Fenintsoa Andriamasinoro

► To cite this version:

Fenintsoa Andriamasinoro. Utilisation du paradigme “ Agent-based Computational Economics ” (ACE) pour appui à l’analyse multi-acteurs des filières ressources minérales et/ou de leur économie circulaire. Sciences de l’Homme et Société. Paris Saclay, 2020. tel-03321210

HAL Id: tel-03321210

<https://brgm.hal.science/tel-03321210>

Submitted on 17 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ)

**Utilisation du paradigme « Agent-based Computational Economics » (ACE)
pour appui à l'analyse multi-acteurs des filières ressources minérales
et/ou de leur économie circulaire**

Mémoire rédigé en vue de l'obtention du diplôme de :
HABILITATION À DIRIGER DES RECHERCHES (HDR)
Discipline : Sciences Sociales / Économie

Fenintsoa Andriamasinoro

Chercheur au BRGM
Direction des Géoressources

Date de soutenance : Novembre 2020

Membres du jury :

Rapporteurs :

M. Xavier GALIÈGUE	Maître de Conférences – HDR en Sciences Économiques	Université d'Orléans
Mme Sylvie GEISENDORF	Professeure en Sciences Économiques	ESCP Business School Europe, Campus Berlin
M. Erwan GLOAGUEN	Professeur en Géophysique Appliquée	INRS, Québec, Canada
M. Christophe LE PAGE	HDR en Sciences Informatiques	CIRAD, Montpellier

Examineurs :

M. Rémy COURDIER	Professeur en Sciences Informatiques	Université de La Réunion
Mme Juliette ROUCHIER	Directrice de Recherche en Sciences Économiques, CNRS	Université Paris- Dauphine
M. Dominique GUYONNET	HDR en Hydrogéologie	BRGM, Orléans
M. Jean-Marc DOUGUET	Maître de Conférences – HDR en Sciences Économiques	UVSQ

Garant :

M. Martin O'CONNOR	Professeur en Sciences Économiques	UVSQ
--------------------	------------------------------------	------

À mon petit neveu,
parti trop tôt

Remerciements

*Je rends d'abord grâce à mon Dieu
pour avoir été présent tout au long de ce chemin difficile,
et pour m'avoir dirigé vers les personnes ci-dessous
afin de m'aider à atteindre cette étape de ma vie professionnelle*

L'UTILISATION DU « JE » LE LONG de ce manuscrit est simplement liée à la nature d'un exercice d'Habilitation. Dans les faits, ce document est le résultat d'un travail coconstruit au fil des années par un ensemble de personnes. Les composantes apportées par chacune de ces personnes sont tout aussi importantes les unes que les autres et je tiens à les remercier tout particulièrement. Le parti pris est que je ne vais pas les citer toutes au risque d'en oublier. En revanche, j'aimerais mentionner au moins les personnes ci-après, en commençant par les 4 rapporteurs qui ont consacré du temps à l'évaluation de ce travail malgré les contraintes d'organisation difficiles créées par le contexte sanitaire du Covid-19.

Je remercie Xavier GALIÈGUE, pour avoir bien voulu être rapporteurs de ce mémoire. Je connais ses compétences de longue date dans les domaines de l'économie des ressources naturelles et de la problématique BRGM. C'est donc un honneur pour moi qu'il ait accepté d'évaluer ce travail.

Je remercie aussi Sylvie GEISENDORF pour son acceptation de faire partie du jury. Elle fait partie des économistes qui ont vu en l'approche agent un potentiel intéressant pour la résolution scientifique des défis liés au développement durable. L'avoir comme rapporteure élève clairement la qualité de ce mémoire.

Par ailleurs, un mémoire BRGM sans un rapporteur ayant une compétence en géosciences pour l'évaluer restera toujours incomplet. Ce manque n'existera pas en raison de l'acceptation d'Erwan GLOAGUEN d'être rapporteur. Si son domaine applicatif porte, comme dans ce mémoire, sur les géosciences, il enrichit aussi ce mémoire en apportant son savoir-faire sur une branche de l'Intelligence Artificielle autre que l'approche « agent » : le « machine-learning ». Qu'il trouve en ces quelques phrases l'expression de ma reconnaissance.

Enfin, Christophe LE PAGE fait partie des personnes dont la renommée n'est plus à démontrer en France - et à l'étranger, notamment dans les pays en voie de développement - en matière d'utilisation des approches participatives et de la simulation multi-agent pour aider à la gestion des ressources naturelles et de l'environnement à l'échelle des territoires. Je suis très honoré de le compter parmi les rapporteurs.

J'aimerais ensuite exprimer toute ma gratitude à Martin O'CONNOR pour avoir supervisé l'écriture de ce mémoire et pour m'avoir accompagné dans tout le processus de préparation de mon Habilitation. J'ai apprécié l'organisation originale orientée « rapprochement Sciences et Société » du mémoire, une démarche que je suis aujourd'hui en train de m'approprier chemin faisant à son contact, tant en termes de méthodologie qu'en termes d'état d'esprit. Cette démarche, je penserais à l'inculquer à mes futurs thésards, dès le départ de leurs travaux.

Je suis également particulièrement reconnaissant envers Jean-Marc DOUGUET car il a été pour moi source de connaissances intarissables sur l'analyse multi-acteurs et multicritères d'un territoire, durant de longues années de collaboration. On peut dire que concernant ces sujets, il a clairement enrichi mon parcours scientifique de manière quasi-permanente. Les sessions répétées avec ses étudiants, en tant qu'animateurs de jeux de rôles, ont aussi été pour moi

un cadre d'apprentissage important sur la manière d'accompagner la mise en place de processus collectifs de décision.

Rémy COURDIER, co-directeur de ma thèse de doctorat, est celui qui m'a initié, il y a presque 20 ans maintenant, au monde de la recherche scientifique. Depuis, il n'a pas cessé de m'encourager pour que je poursuive mes publications. Aujourd'hui encore, il est présent pour moi en tant que membre du jury de ma soutenance d'Habilitation, en venant de l'Île de La Réunion. Qu'il reçoive, au rappel de ces quelques faits non exhaustifs, toute l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie Dominique GUYONNET pour avoir accepté de faire partie du jury pour le compte du BRGM et pour avoir aussi impulsé, durant mon parcours scientifique, ma motivation à introduire davantage le domaine du multi-acteurs et du SHS au BRGM. Mes collègues Marie-Adélaïde ÉTHÈVE, Jean-Michel ANGEL et Laurent GUILLOU-FROTTIER ont aussi accepté de faire partie de l'aventure en ayant bien voulu consacrer du temps pour relire ce mémoire. Par ailleurs, ce travail a été chapeauté au BRGM par son comité HDR composé de Philippe FREYSSINET, Marie-Christine DICTOR, Marie RIBEIRO et Nadine GORIN. Il est certain que le support éclairé et les conseils avisés de tous ces collègues ont inmanquablement contribué à l'amélioration de la qualité ce travail.

Ce mémoire est l'occasion de citer aussi Bruno MARTEL-JANTIN qui, il y a plus 15 ans, m'a fait confiance en me recrutant au BRGM. Ambitieux et audacieux, il a voulu tester l'utilisation des modèles à base d'agents – à l'époque peu connus et très controversés – dans un domaine appliqué et à forts enjeux qu'est la socio-économie des ressources minérales. Il a été un acteur majeur de mon parcours scientifique durant les 10 premières années de l'après-thèse. Je ne sais pas, au niveau du bilan, si j'ai été à la hauteur de ses attentes. En attendant de le savoir, il me reste au moins aujourd'hui à rappeler cette complicité à travers une formule malgache échangée lors de nos rencontres : « tsy misy vovô » (rien de neuf).

Ma reconnaissance va aussi à François GUERRIN, celui qui m'a initié, il y a 20 ans au CIRAD, à la recherche appliquée à la gestion des ressources naturelles. Déjà relecteur de ma thèse de doctorat, il a encore apporté dans le présent document son œil critique, parfois sévère, mais souvent juste.

Merci à Lucien CORBINEAU et à Johann TUDURI pour m'avoir offert un espace d'apprentissage d'un accompagnement de processus collectif de décision, en m'ayant permis d'animer des sessions de jeux de rôles pour leurs étudiants respectifs.

Les soutiens que j'ai eus durant mon parcours se sont aussi manifestés sous diverses formes. Je pense aux encouragements de Fabrice DUPROS et de Hervé LESUEUR durant la mise en place du paradigme « agent » au BRGM, au support stratégique de Daniel CASSARD en m'introduisant dans le monde des « granulats et matériaux », ainsi qu'à la bonne humeur de mes compagnons de route dans les jeux de rôles et/ou dans l'économie circulaire : Audrey HOHMANN, Anne-Lise GAULTIER, David DESSANDIER, Daniel MONFORT-CLIMENT, Carol ZAMMIT et Stéphane VAXELAIRE.

Pour terminer, je souhaite m'adresser à vous, mes proches. Vous avez été le gâteau de ce voyage, vous avez toujours été précieux pour moi et je ne saurais vous remercier assez pour votre présence et pour votre gentillesse durant ces, au moins, 20 années. Merci aussi pour ne pas s'être trop plaint de l'être asocial qu'il m'est arrivé parfois de devenir durant ces années de recherche. J'ai eu un parcours incroyable, me faisant des souvenirs pour la vie et traitant de sujets qui me passionnent vraiment. Cela a été un privilège absolu.

Ferintsoa ANDRIAMASINORO, ce 1er septembre 2020

Sommaire

PARTIE A : PRÉSENTATION DU CANDIDAT	1
Préambule : l'humain derrière le candidat	3
Curriculum vitae.....	7
État civil	7
Diplômes universitaires	7
Expériences professionnelles	7
Expériences d'enseignement	7
Coordination scientifique de projets de recherche.....	8
Encadrement scientifique	8
Intervention dans des thèses.....	9
Évaluation d'articles de revues scientifiques.....	9
Autre responsabilité scientifique	9
Publications et communications.....	10
Rapports techniques.....	12
Prix/récompense	12
PARTIE B : MISE EN SCÈNE.....	13
Introduction générale par une approche multi- lecteurs.....	15
À qui s'adresse ce manuscrit ?	15
Organisation du manuscrit.....	17
Cheminement de lecture proposé par catégorie de lecteurs	17
Chapitre I. Terminologie pour une compréhension partagée du sujet	19
I.1 Les « Agent-Based Computational Economics » ou ACE	20
I.2 La recherche-action participative et les jeux sérieux.....	22
I.3 Le paradigme ACE.....	25
I.4 Les ressources minérales et leur économie circulaire.....	28
I.5 Complément : le BRGM.....	29
Chapitre II. Caractère et chronologie du parcours scientifique	33
II.1 Introduction aux itinéraires principaux et aux questions de recherche	34
II.2 Le début du parcours	41
II.3 Parcours itinéraire 1 : modélisation ACE des filières ressources minérales	44
II.4 Parcours itinéraire 2 : de la modélisation ACE à la recherche-action	57
II.5 Les projets en cours (2020)	68
II.6 Informations complémentaires sur le parcours.....	69

Conclusion de la Partie B	73
PARTIE C : BILAN	75
Chapitre III. Regard du candidat sur son parcours scientifique	77
III.1 Des sciences informatiques aux sciences économiques (et sociales ?)	77
III.2 Les objectifs que le candidat aurait aimé atteindre	79
III.3 Apports du parcours pour le candidat	80
III.4 Regard particulier sur l'avenir de l'ACE dans le travail du candidat	82
Conclusion de la Partie C	87
PARTIE D : CAPACITÉ ET PERSPECTIVES.....	89
Chapitre IV. Offre du candidat en capacité à diriger des Recherches	91
IV.1 Préambule : motivations du candidat pour une soutenance de HDR	91
IV.2 Lettre aux membres du jury : offre en capacité	92
Chapitre V.Perspectives de recherche	97
V.1 Les questions de recherche concrètes (à court-moyen terme).....	97
V.2 Les questions de recherche plus génériques (jusqu'à long-terme).....	99
PARTIE E : ÉPILOGUE	101
Conclusion générale	103
Références (par ordre alphabétique).....	107
Références (par fonction).....	121
Fonction 1 : les travaux sur les filières	121
Fonction 2 : les travaux transverses à des filières	123
Fonction 3 : les travaux (hors filières) sur l'acceptation du paradigme ACE.....	123
Fonction 4 : les fonctions sur la terminologie utilisée.....	124
Fonction 5 : les fonctions sur la communication / valorisation de la recherche.....	125
Fonction 6 : les travaux réalisés jusqu'à la thèse	125
ANNEXE	127
Annexe I. Les modèles de simulation développés (extraits résultats).....	129
Préambule : une vue de l'interface de la plateforme de simulation Is@Tem.....	129
La filière « mine artisanale »	130
La filière « granulats et économie circulaire »	133
La filière « charbon »	136
La filière « métaux stratégiques »	136

Annexe II. Des exemples d'outils issus de la recherche-action	139
Le calculateur simplifié d'accompagnement du jeu de rôles.....	139
La matrice de délibération	139
Les outils pour la formalisation du secteur « mine artisanale » (ASM).....	141

Liste des figures

Figures dans le texte principal

Figure intro 1 : Cheminement de lecture proposé pour chaque catégorie de lecteurs.....	18
Figure I.1 : Positionnement de l'ACE au sein des concepts définis dans la section I.1.....	22
Figure I.2 : Les différentes composantes d'un projet mené en recherche-action participative.	23
Figure I.3 : Lien entre jeux de rôles, simulation ACE et économie comportementale.....	25
Figure I.4 : Place de l'ACE dans les paradigmes de la complexité.....	26
Figure I.5 : Vue partielle sur la classification du domaine des ressources minérales.	28
Figure I.6 : La stratégie scientifique du BRGM à 10 ans : 6 enjeux (E) déclinés en 8 programmes. (P).....	30
Figure II.1 : Nombre de publications contenant le mot-clé « Participatory » selon le sujet : le sujet « mine » est absent.....	44
Figure II.2 : Champ de contribution (en gris) du candidat dans son unité d'accueil, champ exprimé selon le schéma de trilogie « acteurs, ressources, espace » (ARE) adopté par l'unité.	45
Figure II.3 : Changement de la plateforme de simulation : d'ADK vers Is@Tem.....	51
Figure II.4 : Superposition visuelle de la criticité de 3 substances (lithium, cobalt et tungstène) selon la France et selon l'Europe : la valeur n'est pas la même sur les deux échelles.....	55
Figure II.5 : La méta-méthodologie INTEGRAAL d'évaluation multi-acteurs et multicritères d'un problème d'un territoire, déclinée dans le projet ANR AGREGA.	61
Figure II.6 : Extrait d'animation de sessions de jeux de rôles sur les granulats et leur économie circulaire (a) avec les professionnels et (b) avec des étudiants.	62
Figure III.1 : Un outil que le candidat pense utiliser comme guide pour aider ou pour débattre sur le choix du niveau de réalisme de ses futurs modèles.....	84
Figure V.1 : Le champ de questions de recherche génériques que le candidat pourrait aborder dans ses perspectives par rapport au système global sol / sous-sol.	100

Figures dans l'annexe

Annexe Figure 1 : Un aperçu de l'interface de la plateforme de simulation ACE Is@Tem développée par le candidat durant le parcours.....	129
Annexe Figure 2 : Extraits des résultats de la simulation de la ruée vers l'or au Burkina Faso : durée, production et impacts.....	130
Annexe Figure 3 : Extraits de résultats de la simulation de la filière quartz à Madagascar selon 2 modèles : Cormas (sans réactivité de la famille) et ADK (avec réactivité de la famille).	131

Annexe Figure 4 : Extraits de résultats de la simulation de la formalisation de la filière « or » sur le site Alga (Burkina Faso) : effet du salaire (β) sur le niveau de clandestinité (α).	132
Annexe Figure 5 : Extraits de résultats de la simulation ACE de la filière granulats dans une boucle en Seine-Normandie (France) : passage d'un itinéraire de 12 km de la zone de consommation vers la carrière actuelle (en fin de vie) à un itinéraire de 16 km (vers la nouvelle carrière).....	133
Annexe Figure 6 : Extraits de résultats de la simulation prospective (2005-2035) de la filière granulats à l'échelle nationale (France) : rupture en capacité d'approvisionnement en granulats pour 2021 si pas de renouvellement de réserves.	134
Annexe Figure 7 : Extraits de résultats de la simulation de l'économie circulaire des granulats en région PACA : répartition du taux de rénovation de chaque municipalité en fonction du rayon de recherche R simultanée de fournisseurs en graves et en enrobés.....	135
Annexe Figure 8 : Extraits de résultats de la simulation de l'impact prospectif de l'activité minière sur l'évolution de la zone urbaine d'eMalahleni en 2025.....	136
Annexe Figure 9 : Extraits de résultats de la simulation de l'évaluation prospective des périodes de rupture d'approvisionnement en lithium (France) selon des scénarios de restriction et de compensation par le marché mondial.	137
Annexe Figure 10 : Extraits de résultats de la simulation prospective (2022) de l'importation du cobalt en (France) en fonction de l'augmentation du prix du cobalt en provenance du Royaume-Uni et selon 3 modèles de « Machine-Learning ».....	138
Annexe Figure 11 : L'outil d'accompagnement (calculateur thématique) pour le jeu de rôles 'granulats et économie circulaire' : pour 5 km de route à rénover, il y a besoin de 9.6 kt de graves recyclées.	139
Annexe Figure 12 : L'outil « matrice de délibération » utilisé par INTEGRAAL pour l'évaluation de scénarios : (a) sa structure et (b) un exemple d'enjeu consistant à faire de la Boucle de Moisson une destination touristique.	140
Annexe Figure 13 : Les grandes étapes proposées pour la recherche-action participative dans la formalisation du secteur ASM ainsi que les paradigmes associés.	142
Annexe Figure 14 : Illustration du « Pattern-Oriented-Modelling » - POM - à travers le cycle de modélisation d'un « Agent-Based-Modelling ».....	143
Annexe Figure 15 : Description des composants principaux du protocole ODD + D.....	143
Annexe Figure 16 : Schéma de couplage (théorique à ce stade) entre différentes approches scientifiques de recherche-action pour aide à la formalisation du secteur ASM.....	144

Liste des tableaux

Tableaux dans le texte principal

Tableau intro 1 : Liste de catégories de lecteurs retenues dans ce mémoire ainsi que l'usage probable que chaque catégorie en ferait. 16

Tableau II.1 : Description synthétique des filières étudiées et des projets réalisés durant le parcours scientifique. 36

Tableau II.2 : Chronologie (2003 à 2020) d'études des filières et des projets décrits dans le Tableau II.1. 37

Tableau II.3 : Les questions de recherche (modélisation ou recherche-action) abordées dans chaque projet et le(s) intervention(s) du candidat dans chaque question. 37

Tableau dans l'annexe

Annexe Tableau 1 : Couplage (théorique à ce stade) des processus INTEGRAAL (contenant les étapes principales, les sous-étapes de communication et la matrice de délibération) et COMMOD (contenant les autres sous-étapes). 145

Acronyme

AB	Agent-Based
ABM	Agent-Based Modeling
ACE	Agent-based Computational Economics
ACV	Analyse du cycle de Vie
ADK	Agent Development Kit
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ARE	Acteurs, Ressources, Espace
ASGM	Artisanal and Small-scale Gold Mining
ASM	Artisanal and Small-scale Mining
BGS	British Geological Survey
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
COMES	COmité des MÉtaux Stratégiques
COMMOD	Companion Modelling
DSGE	Dynamic Stochastic General Equilibrium,
ECP	Économie Comportementale
EI2D	Économie, Intelligence et Développement Durable
IA	Intelligence Artificielle
IE	Intelligence Économique
Is@Tem	Integrated System (Applied To) Territory and Environment Management
LME	London Metal Exchange
MFA	Material Flow Analysis
ML	Machine Learning
ODD	Overview, Design concepts, Details
POM	Pattern-Oriented Modelling

PRPGD	Plan Régional de Prévention et de Gestion des Déchets
RAP	Recherche-Action Participative
RESE	Recherche En SocioÉconomie
SFC	Stock-Flux Consistency
SHS	Sciences humaines et Sociales
SIG	Système d'information Géographique
SMA	Système Multi-Agents
SRC	Schéma Régional des Carrières
TES	Tableau d'Entrées Sortie
TRACE	Transparent And Coherent Ecological modelling
UMR	Unité Mixte de Recherche
USGS	United States Geological Survey

PARTIE A : PRÉSENTATION DU CANDIDAT

*« Ce qu'un homme pense de lui-même,
voilà ce qui règle ou plutôt indique son destin »*
- Henry David Thoreau

Préambule : l'humain derrière le candidat

*« Si le cœur est vide,
ce qu'il y a dans la tête n'a pas d'importance »
- Dicky Fox*

LE VOYAGE PROFESSIONNEL RACONTÉ tout le long de ce mémoire est avant tout celui d'un être humain, fils de psychologue, petit-fils de pasteur, et qui a grandi à Madagascar, un pays dont plus de 70 % de la population vit de l'agriculture et dont plus de 50 % de la population n'a pas accès correctement à l'éducation. Ces facteurs, parfois ensembles, parfois séparément, ont (aussi) été un moteur permanent dans le présent voyage. Ce moteur m'a influencé, consciemment ou inconsciemment, dans mes choix de vie professionnelle ou dans la gestion des choix que l'extérieur m'imposait.

L'itinéraire que j'ai emprunté, et que j'aimerais raconter brièvement dans les paragraphes qui suivent, résulte donc à la base d'un croisement entre héritage, passion, vécu et intérêt scientifique. L'histoire qui suit n'est pas encore celle d'un parcours scientifique, en tout cas pas celui selon les critères demandés par un exercice d'Habilitation. J'y essaie plus de mettre en avant ce que je suis, non ce que je fais : une histoire qui vient plus du cœur que de l'intellect en somme. Elle vise avant tout à me connecter avec mon intérieur pour me rappeler mes motivations sur le plan humain et personnel. Étant donné la nature de ces motivations, la brève histoire ci-dessous couvre donc de facto en partie l'avant-thèse (contrairement à celle du parcours dans une Habilitation, qui couvre l'après-thèse uniquement). Faire ce bref arrêt, à travers les quelques paragraphes ci-dessous, et de mettre en avant ces motivations humaines en partie non scientifiques, ne pourrait être ignoré (en ce qui me concerne) étant donné l'influence qu'elles ont exercée sur moi, souvent de manière invisible et/ou subjective.

Martin Luther King a dit : « I have a dream ». Un de mes rêves d'adolescent était de pouvoir contribuer à la connexion de toutes les régions de Madagascar par réseau informatique afin que chaque population rurale augmente ses chances d'avoir accès à la connaissance. La finalité en était que cette population puisse enfin ne plus se faire manipuler par les politiques et en même temps s'offrir les possibilités de se développer économiquement (un rêve de mettre en œuvre une forme d'économie du savoir en quelque sorte). J'étais - et suis toujours - convaincu que ce développement est possible car en observant cette population et en essayant de ressentir son vécu, j'ai conclu que le contenant (le moteur de l'intelligence, l'envie, etc.) est bien présent. C'est le contenu (l'information à manipuler) qui manque pour avancer un minimum. Ce rêve étant finalement difficilement réalisable, en tout cas avec les moyens de l'époque, il convenait pour moi de réfléchir à une autre forme de contribution pour donner à cette population un accès à la connaissance.

C'est lors de mon master 2 en informatique (appelé DESS à l'époque) à l'université de La Réunion que j'ai pu progressivement commencer à contribuer à cet accès, même si c'est très indirectement, via mes compétences scientifiques. En fait, ma tâche dans le stage correspondant à ce master, en collaboration avec le CIRAD de La Réunion, consistait à développer un modèle d'aide à la gestion des effluents d'élevage par un modèle de simulation multi-agents. Travailler sur cette filière a été finalement une manière de retrouver cette problématique d'une population à majorité d'agriculteurs et de me connecter à mes racines. Cela s'est poursuivi en thèse puisque le sujet de cette dernière portait sur une problématique de comportements d'acteurs face à l'érosion à Mangatany (Madagascar). S'y est en plus

ajouté l'héritage paternel (la psychologie) puisque par rapport à la structure du modèle sous-jacent l'application, j'ai essayé d'introduire une forme réduite de la pyramide des besoins du psychologue Abraham Maslow dans la « tête » de mes agents informatiques. Le fait d'avoir lu, dès mon adolescence, bon nombre d'ouvrages utilisés par mon père, y est sans doute pour quelque chose.

Bien des années plus tard, au BRGM, c'est tout ce processus autour des « agents » qui, de fil en aiguille, m'a mené vers les jeux de rôles à vocation éducative, assistés parfois par ordinateur. Arriver à cette étape était un moment très particulier car deux situations ont été constatées. La première situation est que se sont jointes sur le terrain plusieurs motivations parallèles : mon héritage (résultant en de la simulation multi-agents par ordinateur via l'IA et la psychologie), ma passion pour l'éducation (résultant en de la simulation multi-acteurs par les jeux en plateau) et mon intérêt scientifique (support du résultat des deux premières). La deuxième situation, liée en partie à la première, a été que j'ai finalement identifié une solution potentielle à ma problématique de départ : celle de trouver un moyen possible d'accès d'une population pauvre à la connaissance. Le concept de jeux sérieux m'a en effet rappelé ce que je faisais, étant enfant, et que je retrouve encore chez les enfants Malgaches d'aujourd'hui, qu'ils soient scolarisés ou non : savoir déployer l'intelligence et s'adapter aux moyens rudimentaires existants pour mettre en œuvre des jeux. Je peux citer entre autres exemples les courses de pneus usés, ou encore les matchs de foot sur un terrain vague avec comme poteaux des briques et comme ballon des regroupements de sachets en plastiques ficelés ensemble.



<http://www.newsmada.com>

Une course de pneus poussés par des manches à balais et des boîtes de conserves mouillées (non visibles) comme de roulement



<http://lesgauthamada.blogspot.com>

Un ballon de foot construit à partir de sachets en plastiques fixées par des cordes

Je me rappelle que ces jeux : (a) suffisaient à faire le bonheur de tout un groupe un samedi après-midi ; (b) démontraient l'existence, dans ce groupe, d'une potentielle intelligence prête à s'adapter pour recevoir une autre forme d'éducation - puisque la forme classique n'est pas toujours accessible - tout en s'adaptant aux moyens rudimentaires pour les créer et (c) contribuaient à la protection de l'environnement en privilégiant la réutilisation d'objets existants (ex : des plastiques pour un ballon) plutôt que leur rejet (ex : des plastiques pour la mer). Il m'est alors venu la conclusion que les jeux sérieux pourraient potentiellement être une forme de valorisation de ces motivations et attitudes préexistantes à des fins plus éducatives et d'accès à la connaissance.

Pour résumer, ce qui m'anime (entre autres) dans la vie aujourd'hui, c'est d'essayer d'exploiter au mieux tous ces bagages scientifiques pour contribuer au développement économique d'une population, par le savoir. Cela concerne certes les pays pauvres mais aussi les pays plus développés (le droit au savoir étant universel). En parallèle à cela, c'est aussi d'essayer de valoriser l'héritage familial, autrement. Mais ce deuxième aspect – comme le dirait Rudyard Kipling - est une autre histoire.

Bien évidemment, ces motivations, plutôt d'ordre personnel, ne peuvent être disjointes d'au moins deux autres : contribuer au développement de la recherche scientifique et répondre aux besoins de l'entreprise dans laquelle je travaille. D'ailleurs, parfois, ces motivations peuvent se croiser lorsqu'il s'agit par exemple d'étudier une mine artisanale dans un pays pauvre d'Afrique dans le cadre d'un projet de Recherche scientifique. Mais comme ces aspects d'ordre plus professionnel occuperont pratiquement le reste de ce mémoire, je ne m'y suis pas attardé ici. Je voulais simplement, à travers les quelques paragraphes ci-dessus, faire un bref arrêt afin de collecter cette énergie d'ordre personnel, nécessaire avant d'entreprendre un voyage rétrospectif de 17 ans.

Curriculum vitae

*« Être soi-même !...
Mais soi-même en vaut-il la peine ? »
- Paul Valéry*

État civil

M. Fenintsoa ANDRIAMASINORO

Né le 4 août 1974 à Antananarivo, Madagascar,
Nationalité franco-malgache

Adresse personnelle :

- 3 place Gambetta, 45000 Orléans

Adresse professionnelle :

- BRGM, 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans-La Source, Cedex 2
téléphone : 02 38 64 38 99
email : f.andriamasinoro@brgm.fr

Diplômes universitaires

2003 : Doctorat en Informatique (Spécialité : Intelligence Artificielle), Université de La Réunion.

Sujet de thèse : Proposition d'un modèle d'agents hybrides basé sur la motivation naturelle.

1999 : DESS en Informatique, Mention Bien (2^{ème} de promotion), Université de La Réunion

1998 : Ingénieur en Informatique, Mention Bien (Major de promotion), École Nationale d'Informatique de Fianarantsoa – Madagascar

1995 : Technicien Supérieur en Informatique, Mention Assez Bien, École Nationale d'Informatique de Fianarantsoa - Madagascar

Expériences professionnelles

2003-2005 (2 ans) : BRGM, Orléans.

Post-doctorat en modélisation socioéconomique des filières ressources minérales

2005-présent (15 ans) : BRGM, Orléans.

Chercheur en modélisation socioéconomique des filières ressources minérales

Expériences d'enseignement

2015-2020 : Université de Paris-Saclay, UniLasalle Beauvais et Université d'Orléans / BRGM Campus.

Intervention récurrente pour l'enseignement de l'économie circulaire de la filière « granulats/déchets BTP » à travers les jeux de rôles

2002-2003 (1 an) : Université de La Réunion.
Assistant Temporaire en Enseignement et Recherche (ATER).

Coordination scientifique de projets de recherche

2014-2018 : Coordonnateur scientifique du projet ANR AGREGA (Anticipation et Gestion régionales des Ressources En Granulats) du programme ANR « Écotechnologies & EcoServices / Vers une économie circulaire » (réf. ANR-13-ECOT-0008).

2018 : Coordonnateur scientifique du projet ANR PréGo (Préfiguration Géothermique des Ouvrages profonds) du défi sociétal ANR « Énergie Propre, Sûre et Efficace / Approches socio-économiques de l'usage de l'énergie et de l'impact des nouvelles technologies de l'énergie » (réf. ANR-14-CE05-0049)

Encadrement scientifique

Niveau postdoctoral

- **2017-2018 (1 an et 4 mois)** : Postdoctorat Aurélie GAUDIEUX (Discipline : Économie), BRGM

Niveau Master 2

- **2017 (6 mois)** : Sabrine MAKNI (Discipline : Informatique / Intelligence Artificielle Distribuée), Université Paris 5, René Descartes
- **2016 (6 mois)** : Philippe BOITIAU (Discipline : Géologie), Institut polytechnique UniLaSalle Beauvais
- **2015 (8 mois)** : Vincent GOYHEX (Discipline : Géographie / Géomatique, géodécisionnel, géomarketing et multimédia), Université Paris 8, Vincennes St-Denis
- **2013 (6 mois)** : Jérémie BERNARD (Discipline : Mathématiques et Informatique / Statistiques, Signal, Santé), Université Aix-Marseille

Niveau Master 1

- **2016 (2,5 mois)** : Jean-Dominique MERCURY (Discipline : Économétrie et Statistiques Appliquées), Université d'Orléans
- **2016 (2,5 mois)** : Guillaume GRIES (Discipline : Économétrie et Statistiques Appliquées), Université d'Orléans
- **2014 (4 mois)** : Flavien HEUGUET (Discipline : Informatique), École d'Ingénieur CESI-Exia, Orléans
- **2012 (4 mois)** : Haby AHNE (Discipline : Économétrie et Statistiques Appliquées), Université d'Orléans

Intervention dans des thèses

Membre de jury de thèse

2019 : Membre du jury de la thèse de Philippe LANCELEUR (Discipline : Sciences économiques), menée sous la direction de Jean-Marc DOUGUET, et soutenue le 19 septembre 2019 à l'Université Paris-Saclay

Membre de comité de suivi de thèse

2014-2017 : Membre du comité de pilotage de la thèse de Vincent AUGISEAU (Discipline : Géographie, Aménagement), sous la direction de S. BARLÈS, soutenu le 11 décembre 2017 à l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne

Évaluation d'articles de revues scientifiques

Rapporteur (2020) pour la Revue « Natural Resources Research »¹ portant sur la thématique « Étude quantitative de l'exploration, de l'évaluation et de l'exploitation des ressources naturelles » : 1 article

Rapporteur (2019) pour la Revue « International Journal of Sustainable Development »² portant sur la thématique « Participation des parties prenantes dans la problématique du développement durable » : 1 article

Rapporteur (2013-2016) pour la Revue « Resources Policy »³ portant sur la thématique « Économie minière et politique, liées à l'extraction, la production et l'utilisation des ressources minérales et non-minérales » : 4 articles

Rapporteur (2005 et 2007) pour la Revue « Journal of Artificial Societies and Social Simulation »⁴, portant sur la thématique « Compréhension des processus sociaux par la simulation informatique » : 2 articles

Autre responsabilité scientifique

2015-2018 : Responsable Scientifique du Programme « Économie des matières minérales primaires et secondaires » au BRGM.

Mission : développement et coordination de la synergie et des interactions entre les différents projets de mission du BRGM (Recherche, appui aux politiques publiques et commerciaux) dans le domaine de l'économie minière primaire et secondaire.

Aujourd'hui : Référent scientifique du BRGM en économie : relecture des propositions techniques et rapports liés à l'économie des ressources minérales.

¹ <https://link.springer.com/journal/11053>

² <https://www.inderscience.com/jhome.php?jcode=ijsd>

³ <https://www.journals.elsevier.com/resources-policy>

⁴ <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html>

Publications et communications

Articles parus

Andriamasinoro, F., Hohmann, A., Douguet J.-M. & Angel, J.-M. (2020). Serious games as a social learning tool in formalizing the artisanal and small-scale mining sector in African territories. *The Extractive Industries and Society*. 7 (3), 1108-1120. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.07.017>.

Andriamasinoro, F., Danino-Perraud, R., 2019. Use of artificial intelligence to assess mineral substance criticality in the French market: the example of cobalt. *Mineral Economics*. 1-19. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00206-2>.

Douguet, J.M., Morlat, C., Lanceleur, P., Andriamasinoro, F., 2019. Subjective evaluation of aggregate supply scenarios in the Ile-de-France region with a view to a circular economy: the ANR AGREGA research project. *International Journal of Sustainable Development*. 22 (3/4), 123-157. <https://dx.doi.org/10.1504/ijsd.2019.105321>.

Lefebvre, G., Andriamasinoro, F., 2016. Mining economist opinions on using multi-agent methodology to simulate metal markets. *International Journal of Trade and Global Markets*. 9 (1), 83-102. <https://doi.org/10.1504/ijtgm.2016.074139>.

Andriamasinoro, F., Ahne, H., 2013. Prospective analysis of the world lithium market: contribution to the evaluation of supply shortage periods. *International Business & Economics Research Journal*. 12 (3), 359-372. <https://doi.org/10.19030/iber.v12i3.7679>.

Andriamasinoro, F., Angel, J.M., 2012. Artisanal and small-scale gold mining in Burkina Faso: suggestion of multi-agent methodology as a complementary support in elaborating a policy. *Resources Policy*. 37 (3), 385-396. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.04.004>.

Andriamasinoro, F., Angel, J.M., 2007. Modeling the Ultra-pure Quartz Exploitation in Northeastern Madagascar: Impact of the Activity on the Socio-Economical Situation of the Population. *Journal of Socio-Economics*. 36 (2), 311-329. <https://doi.org/10.1016/j.socec.2005.11.035>.

Courdier, R., Guerrin, F., Andriamasinoro, F., Paillat, J.-M., 2002. Agent-based simulation of complex systems: application to collective management of animal wastes. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 5 (3), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/4.html>.

Article soumis (passage réussi du « desk-reject »)

Andriamasinoro, F. & Monfort-Climent, D. (2020). Consideration of complexity in the management of demolition waste flow in French regions: an agent-based computational economics approach. 'Waste Management'.

Chapitre d'ouvrage

Andriamasinoro, F., 2013. Reinforcing the place of dynamic spatialised indicators in a generic socioeconomic model, in: Borruso, G., Bertazzon, S., Favretto, A., Murgante, B., Torre, C.M. (Eds.), *Geographic Information Analysis for Sustainable Development and Economic Planning: New Technologies*. IGI Global. Ch. 21, pp. 313-334, ISBN13: 978-1-46661-924-1. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-1924-1.ch021> (accessed November 2019)

Courdier, R., Guerrin, F., Andriamasinoro, F.H., Paillat, J.-M., 2003. Simulation agent appliquée à la gestion collective d'effluents d'élevage. Mise en œuvre des concepts génériques de la plate-forme Geamas au sein de l'application Biomas, in: Guerrin, F., Paillat, J.-M. (Eds.), *Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion*. 1st (Ed.) Montpellier, France, p.21. Restitution des travaux de l'ATP 99/60. Actes du séminaire, 19-20 juin 2002, Cirad, EAN13 CD-ROM : 9782876145436.

Communications à des congrès

Andriamasinoro, F., Levorato, V., 2014. Appréciation de l'intérêt du secteur minier pour les SMA pour l'analyse prospective du marché des métaux stratégiques, in: Courdier, R. & Jamont, J.-P. (Eds.), *Les 22èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'14)*, Lorient-sur-Drôme, 161-170. ISBN : 978-2-36493-154-1. <https://doi.org/10.13140/2.1.3090.2724>

Andriamasinoro, F., Martel-Jantin, B., 2013. Proposal of agent simulation methodology for the prospective analysis of mineral commodities markets, in: Affenzeller, M., Bruzzone, A.G., De Felice, F., Del Rio, D., Frydman, C., Massei, M. & Merkurjev, Y. (Eds.), *the 12th International Conference on Modeling and Applied Simulation*, Athens 25 - 27 September, 1-10. ISBN: 978-1-62993-490-7.

Andriamasinoro, F., Cassard, D., Martel-Jantin, B., 2010. ISATEM: An Integration of Socioeconomic and Spatial Models for Mineral Resources Exploitation, in: Taniar, D., Gervasi, O., Murgante B, Pardede, E., Apduhan, B.O. (Eds.), *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2010*. Fukuoka, Japan: ICCSA 2010, part I, LNCS 6016, Springer, Heidelberg, pp. 476-490. March 23-26, ISBN: 978-3-64212-155-5. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12156-2_36

Rodriguez Chavez, M.L., Schleifer, J., Dubus, J.-L., Lebreton, P., Andriamasinoro, F., 2010. Breaking present schemes of the access to the aggregate resource, in: Martens, P.N. (Ed.), *Third International Symposium of Mineral Resources and Mine Development*, Aachen, Germany May 26-27, 441-455.

Orru, J.-F., Rajaonson, H.F., Pelon, R., Andriamasinoro, F., 2007. Artisanal mining and preservation of the environment in Madagascar: development of a methodological approach to help identify the challenges and constraints for territorial development. University of East Anglia, Norwich March, 30-31. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00727448/document>. (accessed October 2019)

Andriamasinoro, F., Jaques, E., Pelon, R., Martel-Jantin, B., 2005. Artisanal and Small-scale Gold Mining in Alga (Burkina Faso): Building a Decision-Aid Model for Development and Governance, in: Bruzzone, A.G. & Williams, E. (Eds.), *Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference*, Philadelphia, USA July 24-28, 292-297. ISBN 1-56555-299-7.

Andriamasinoro, F., Angel, J.-M., 2005. High-Level vs. Low-Level Abstraction Approach for the Model and Simulation Design of Ultra-pure Quartz Exploitation in Northeastern Madagascar, in: *Proceedings of the Joint Conference on Multi-Agent Modelling for Environmental Management (CABM-HEMA-SMAGET)*, Bourg St-Maurice, France March, 25-28. <http://fenintsoa.net/htmldata/publis.php?dwn=smaget2005.pdf>

Andriamasinoro, F., Courdier, R., 2004. Integration of Generic Motivations in Social Hybrid Agents, in: *Regulated Agent-Based Social Systems. Lecture Notes in Computer Science n°2934*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 281-300, ISBN: 9783540209232. https://doi.org/10.1007/978-3-540-25867-4_17

Andriamasinoro, F., 2004. Modeling Natural Motivations into Hybrid Agents, in: the 4th International ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems (EIS 2004), Island of Madeira, Portugal February 29 – March 2, p. 66. ISBN: 3-906454-35-5. <http://www.icsc.ab.ca/conferences/eis2004/conf/14.pdf>

Andriamasinoro, F., Courdier, R., 2002. The Basic Instinct of Autonomous Cognitive Agents: : From individual to collective behavior, in: Nahavandi, S. (Ed.), Proceedings of the 1st International Congress on Autonomous Intelligent System (ICAIS'2002), Geelong, Australia February 12-15, p. 61. ISBN 3-906454-30-4.

Andriamasinoro, F., Courdier, R., Piquet, E., 2001. Enhancing a multi-agent system's performance: from implementation to simulation analysis, in: First IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid, 464-469. ISBN 0769510108. <https://doi.org/10.1109/ccgrid.2001.923228>

Andriamasinoro, F., Courdier, R., 2000. A model of virtual competition between remote agents, in: proceedings of the International ICSC Symposium on Multi-Agents and Mobile Agents in Virtual Organizations and E-Commerce (MAMA'2000), Wollongong, Australia december 11-15.

Rapports techniques

Andriamasinoro, F., Thevenot, A., 2018. Approfondissement de la connaissance du tissu industriel français pour les substances stratégiques : application pilote sur le tungstène. BRGM/RP-67477-FR, 7 fig., 11 tabl., 2 ann. 58 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/rp-67477-fr.pdf>. (accessed March 2020)

Andriamasinoro, F., 2011. Rupture d'approvisionnement sur le marché du lithium : analyse prospective par une approche multi-échelle. BRGM/RP-60442-FR, 3 fig., 23 tab. BRGM. 52 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/rp-60442-fr.pdf>. (accessed November 2014)

Prix/récompense

Obtention du « Best Paper Second Runner-up Award » lors du congrès « Summer Computer Simulation Conference » à Philadelphia (USA) en juillet 2005, pour l'article 'Artisanal and Small-scale Gold Mining in Alga (Burkina Faso): Building a Decision-Aid Model for Development and Governance'. http://www.liophant.org/scsc/scsc2005/cfp/scsc_best.html.

PARTIE B : MISE EN SCÈNE

*« Ce qui est plus triste qu'une œuvre inachevée,
c'est une œuvre jamais commencée »*
- Christinna Rosseti

Introduction générale par une approche multi-lecteurs

*« La première règle avant d'agir consiste à se mettre à la place de l'autre.
Nulle vraie recherche du bien commun ne sera possible hors de là »*
- l'Abbé Pierre

CETTE INTRODUCTION AURAIT PU s'intituler « Introduction générale » tout court ou toute autre formulation générique équivalente. Cependant, j'y ai ajouté une entité importante : le lecteur. En effet, avant de raconter mon parcours, il serait préférable que je sache à qui je le raconte et pourquoi je le lui raconte. Pour cela, il faut que j'essaie de me mettre à la place du lecteur pour comprendre sa perception possible de ce que je souhaite lui communiquer. S'il me paraît normal, dans ma vie personnelle ou professionnelle, d'ajuster mes mots en fonction de mon interlocuteur (enfant de 4 ans, adulte, hiérarchie professionnelle, étranger, etc.), il paraît tout aussi normal que j'ajuste les mots choisis tout le long de ce manuscrit en considération de la nature d'un lecteur ou d'une catégorie de lecteurs, au lieu de lui imposer directement mon propre langage. Identifier le lecteur et lui fournir les informations préalables à la compréhension de l'ouvrage qu'il est censé lire est donc l'étape obligatoire avant toute autre considération, d'ordre scientifique ou non.

À qui s'adresse ce manuscrit ?

Dans le cadre d'un mémoire, il est logique que la première catégorie de lecteurs à laquelle ce mémoire s'adresse est le jury chargé de l'évaluer. Cela reste vrai. Cependant, la situation de ce mémoire est plus complexe car il est réalisé dans le monde de la Recherche, un monde dont les acteurs sont aujourd'hui de plus en plus demandeurs à ce que tout rapport de Recherche – et ceci en est un – soit communiqué au-delà du seul jury.

Par exemple, la Société en est de plus en plus demandeuse car elle souhaite savoir en quoi dépenser des milliards d'euros en recherche et innovation va directement impacter sa vie quotidienne, et quand. Différents contextes s'y mêlent également. Notons en particulier les inquiétudes que suscite, pour le citoyen lambda, l'avènement progressif et inévitable de l'Intelligence Artificielle dans la société ([Bradley, 2018](#); [Bonechi, 2018](#)). En somme, comme le rappelle Michaut ([Michaut, 2015](#)), tout public devrait normalement être informé des résultats de toute recherche financée par l'argent public et ce, dans un langage compréhensible par celui-ci. Ce rappel est confirmé par la politique appelée « Open Access » recommandant (parfois obligeant, dans certains pays) les chercheurs à mettre en libre-accès les résultats et données de la recherche, issus de fonds publics ([La_H2020, 2013](#)). Heureusement, cela commence – même si pas encore suffisamment – à se concrétiser dans la réalité. À titre d'exemple, il suffit de voir les événements comme « ma thèse en 180 secondes » ([Thèse_180, n.d.](#)), dans lesquels les salles sont souvent pleines.

Mais sans aller jusqu'à l'échelle de la Société, la communication de manière compréhensible est valable aussi à l'intérieur d'une entreprise qui intervient dans plusieurs thématiques, comme le BRGM (nous y reviendrons le long de ce mémoire). En fait, même étant dans une même entreprise et donc marchant vers un même objectif, les chercheurs entre eux ne comprennent pas toujours systématiquement le jargon scientifique des collègues. Cette situation serait à corriger le plus tôt possible surtout si l'entreprise, pour l'avenir, vise à

renforcer le travail transversal. Un rapport de recherche partageant collectivement au moins une explicitation de ces jargons est un moyen de diminuer cette incompréhension.

Enfin, au-delà de l'échelle interne d'une entreprise, la communication de la Recherche est aussi nécessaire entre acteurs du territoire, souvent de types différents (chercheurs, industriels, associations ...), ayant en conséquence des objectifs différents, et souhaitant pourtant collaborer, par exemple dans un projet ANR. D'ailleurs, l'ANR encourage les interactions entre disciplines, favorise le décloisonnement, encourage les liens public-privé et cible les efforts de recherche sur des priorités économiques et sociétales. Mais pour cela, il faudrait au préalable que les concernés se comprennent.

Pour résumer, tout mémoire – et celui-ci en fait partie – qui souhaite mettre en œuvre la logique ci-dessus est *multi-lecteurs* de facto, et plus précisément à destination de plusieurs *catégories* de lecteurs⁵ pour éviter de devoir prendre en compte les spécificités de chaque lecteur individuellement.

Pour ce mémoire, les catégories de lecteurs identifiées ainsi que l'usage potentiel que chaque catégorie fera du mémoire sont résumés dans le tableau [ci-dessous](#).

Tableau intro 1 : Liste de catégories de lecteurs retenues dans ce mémoire ainsi que l'usage probable que chaque catégorie en ferait.

Catégorie de lecteurs	Usage probable du mémoire par la catégorie
Les membres du jury	Sert à évaluer la capacité du candidat à concevoir, à diriger, à animer et à coordonner des activités de recherche et de valorisation
L'université / collègues scientifiques	Sert comme source d'informations complémentaires dans leurs réflexions scientifiques et pour discuter des futures collaborations avec le BRGM (ex : sur l'application des sciences participatives)
Le BRGM / administration	Sert à évaluer la situation du programme HDR au BRGM et à faire apprécier le candidat par les différentes instances d'évaluation internes ou externes à l'établissement
Le BRGM / collègues scientifiques	Sert à une compréhension mutuelle des concepts entre collègues scientifiques notamment en vue de la mise en place d'un travail transversal en interne
Le candidat	Sert (a) de carte de visite pour mieux répondre aux besoins internes et externes du BRGM (ex : les appels à projets) et (b) de mémo de ses travaux scientifiques en vue d'un meilleur (re)positionnement dans la politique actuelle du BRGM
Les autres	Sert à satisfaire des besoins d'informations d'ordre plus général

Dans le tableau [ci-dessus](#), la catégorie « Les autres » regroupe toutes les personnes qui n'appartiennent à aucune des autres catégories. À cette fin, la rédaction du mémoire se fera de la manière la plus vulgarisée possible pour en tenir compte à condition que cela ne se fasse au détriment des besoins de compréhension par les autres catégories.

⁵ Il y a juste le fait que contrairement à d'autres cas de multi-acteurs comme dans la gestion d'un territoire par exemple, il n'y a pas ici un objectif de faire rencontrer ces différentes catégories pour dialoguer et trouver un consensus.

Organisation du manuscrit

Dans la mesure où les attentes sont a priori différentes pour chaque catégorie de lecteur, le manuscrit leur proposera des cheminements de lecture différents mais qui, quelquefois, peuvent avoir des tronçons communs. L'idée de mettre en place plusieurs cheminements vise surtout à ne pas obliger un membre d'une catégorie donnée à lire tout le manuscrit avant de pouvoir trouver ce qu'il cherche. Cependant, rien n'empêche ce membre, par curiosité ou par nécessité, de lire des parties appartenant à d'autres catégories et vice-versa. Les cheminements proposés ici ne sont que des tendances voire des suppositions, vu qu'il est difficile de savoir exactement, à l'échelle d'un individu, les connaissances dont il aurait besoin lors de sa lecture. Par ailleurs, le fait qu'une personne souhaiterait effectuer simplement une lecture intégrale et linéaire du manuscrit a aussi été pensé.

Le reste du manuscrit est organisé de manière à mieux se conformer à ces différents paramètres. Il est organisé en 5 chapitres répartis en 4 parties.

Le [Chapitre I](#) est un chapitre principalement de terminologie en vue d'une compréhension partagée du sujet de ce mémoire entre les différentes catégories de lecteurs. Le [Chapitre II](#) est le cœur de ce mémoire : la description intégrale du parcours scientifique en lui-même (caractère et chronologie). Au fur et à mesure du récit, le chapitre recense aussi les acquis dans l'avancée du parcours. Ces deux chapitres ainsi que cette introduction sont les composants d'une partie nommée 'Mise en scène'.

Le [Chapitre III](#), seul composant d'une partie appelée « Bilan », présente ensuite mon regard sur mes acquis durant le parcours (collectés dans le [Chapitre II](#)).

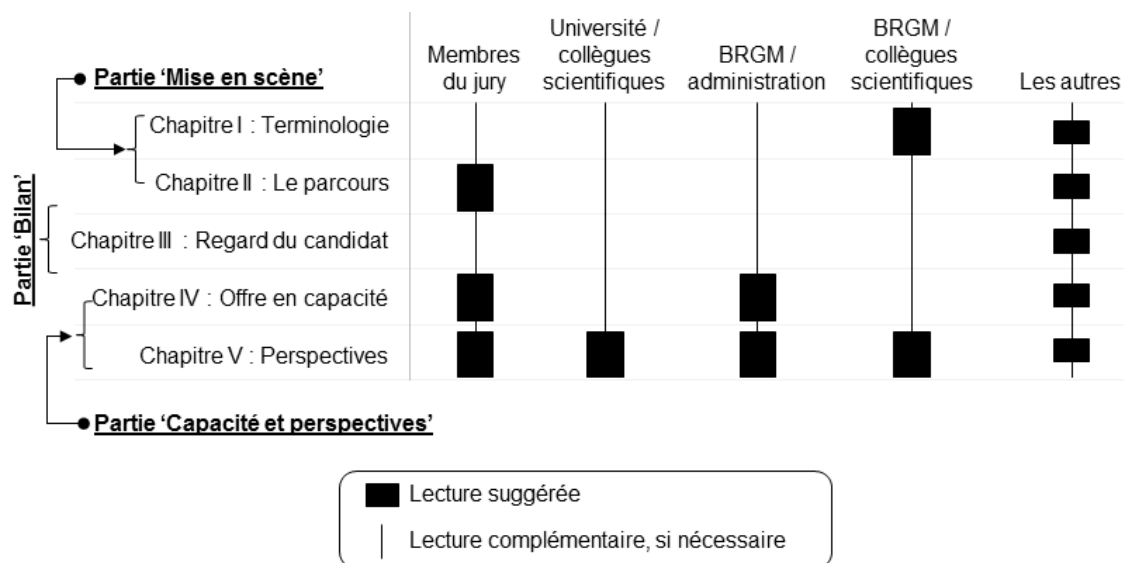
Une fois établie cette interprétation sur le parcours du passé, la partie suivante « Capacité et perspectives » propose ce qu'il serait possible de faire avec ces acquis c'est-à-dire les utiliser comme arguments, d'abord, pour offrir mes capacités à diriger des recherches ([Chapitre IV](#)), et ensuite, pour montrer le programme collaboratif scientifique de recherche future que je suis aujourd'hui capable de proposer, de piloter et de faire réussir grâce à ces capacités ([Chapitre V](#)). La dernière partie (Épilogue) vise à conclure le mémoire.

Cheminement de lecture proposé par catégorie de lecteurs

La Figure [en page 18](#) propose le cheminement de lecture pour chaque catégorie de lecteurs.

☞ Contrairement au tableau [en page 16](#), cette figure ne contient pas le candidat, implicitement concerné par tout le manuscrit.

Figure intro 1 : Cheminement de lecture proposé pour chaque catégorie de lecteurs.



Chapitre I. Terminologie pour une compréhension partagée du sujet

« Si les expressions dont on se sert sont nettes et intelligibles, cela suffit »
- Confucius

IL N'EST PAS DU TOUT IRRESPECTUEUX de supposer que chaque catégorie de lecteurs définie dans le tableau [en page 16](#) n'a une connaissance que partielle de tous les concepts utilisés dans le manuscrit. Même deux lecteurs appartenant à une même catégorie en ont des connaissances différentes. Aussi, le mieux, dans ce contexte multi-lecteurs, serait que le mémoire propose au préalable une terminologie pour que chaque lecteur en ait une vision partagée.

Contenu du chapitre

I.1	Les « Agent-Based Computational Economics » ou ACE	20
I.1.1	Agent, multi-agents et émergence	20
I.1.2	« Multi-agent system », « agent-based model » et « machine learning »	20
I.1.3	Les ACE	21
I.2	La recherche-action participative et les jeux sérieux.....	22
I.2.1	La recherche-action participative	22
I.2.2	Jeux de rôles sérieux ou « serious-game »	23
I.2.3	Lien jeux de rôles, simulation ACE et économie comportementale.....	24
I.3	Le paradigme ACE.....	25
I.3.1	Préambule : le paradigme analytique par l'expertise.....	26
I.3.2	Le paradigme ACE par l'intelligence collective	27
I.3.3	Complément : le paradigme délibératif par l'intelligence collective.....	27
I.4	Les ressources minérales et leur économie circulaire.....	28
I.4.1	Les ressources minérales.....	28
I.4.2	Les filières ressources minérales et leur économie circulaire éventuelle	28
I.5	Complément : le BRGM.....	29
I.5.1	Les programmes scientifiques du BRGM	29
I.5.2	La vie de chercheur dans un EPIC comme le BRGM.....	30

Les sections [I.3](#) et [I.4](#) du chapitre définissent essentiellement les concepts mentionnés dans le titre du mémoire, et qui ne sont pas forcément évidents à comprendre d'emblée pour un utilisateur non initié, des concepts dont les éléments de description ont été préparés dans les sections [I.1](#) et [I.2](#). Par ailleurs, ce chapitre se termine par une brève présentation du mode de fonctionnement du BRGM (Section [I.5](#)) car le mémoire y fera souvent référence. En tous les cas, la terminologie est élaborée de la manière la plus didactique / pédagogique possible, pour couvrir cet environnement multi-lecteurs.

☞ Par considération pour le lecteur qui ne souhaite pas effectuer une lecture intégrale du manuscrit mais plutôt suivre un cheminement particulier, la lecture immédiate de ce chapitre n'est pas obligatoire. En effet, les autres chapitres y feront tous référence à un moment donné. Ce chapitre peut être considéré comme un manuel de référence. Il ne contient aucune histoire sur le candidat. Aussi, le lecteur, s'il le souhaite, peut dès à présent se référer à la Figure en page 18 pour identifier d'autres chemins de lecture.

I.1 Les « Agent-Based Computational Economics » ou ACE

I.1.1 Agent, multi-agents et émergence

Pour expliquer le plus simplement possible l'approche par agent et son utilité, prenons l'exemple de l'intelligence collective chez les fourmis (Bonabeau et al., 1999). Pour construire leur nid, les fourmis n'ont pas un architecte expert agissant en mode centralisé, qui décide de l'architecture du nid (la solution) à construire ou qui répartit les tâches de construction. Au contraire, la solution finale du nid émergera, d'une manière endogène, de l'interaction des fourmis entre elles et/ou avec leur environnement. Chaque fourmi n'ayant une perception que partielle et locale de cet environnement. Cette solution finale, une fourmi, toute seule, de par sa propre perception, n'aurait pas pu la trouver.

En explicitant le concept qu'il y a derrière l'exemple ci-dessus, et en s'inspirant de la définition dans (Ferber, 1999), on appelle « agent » une entité physique ou virtuelle (la fourmi pour l'exemple ci-dessus) qui est capable d'agir dans un environnement, qui n'en dispose d'une représentation que partielle (éventuellement aucune), qui peut communiquer directement ou indirectement – c'est-à-dire via l'environnement – avec d'autres agents, qui est mû par des objectifs ou des signaux incitant à suivre ses congénères (stigmergie) et dont le comportement tend à satisfaire ces objectifs. En reprenant la même référence, un système multi-agents (SMA) est composé au moins d'un ensemble d'agents agissant et communiquant, d'un mode d'organisation et de coordination, et d'un point de vue de l'observateur. Un SMA est donc de facto multi-échelle, a minima 2 : une échelle d'interaction et, à l'instar des fourmis vues précédemment, une échelle d'observation des propriétés émergentes, c'est-à-dire des propriétés complexes obtenues de manière endogène à partir de lois comportementales et de propriétés élémentaires (Fromm, 2004; Mueller and Pyka, 2016). Par ailleurs, le concept d'intelligence est totalement revu : on passe ici de l'intelligence d'un individu à l'intelligence collective (Calderoni, 2002).

I.1.2 « Multi-agent system », « agent-based model » et « machine learning »

Dans les évolutions récentes de la terminologie agent, un système contenant des agents en interaction est appelé un système « multi-agents » lorsqu'ils sont étudiés dans le domaine des sciences informatiques. Dans ce cas, le système informatique est l'objet de la recherche. La recherche se positionne ici dans un sous-domaine de l'Intelligence Artificielle Distribuée. Un sous-domaine qui a vu le jour au moment où l'Intelligence Artificielle (IA) classique, basée sur une centralisation de l'expertise au sein d'un système unique, a montré ses limites (Calderoni, 2002). En revanche, lorsque les agents en interaction sont simulés dans un domaine d'application, relevant par exemple des sciences sociales (Epstein, 2006) ou des sciences écologiques (Grimm and Railsback, 2012; Railsback and Grimm, 2019), le terme utilisé (mieux connu en anglais) est « agent-based ». Dans ce deuxième cas, le système informatique n'est pas l'objet de la recherche. Il est un outil mis au service de l'applicatif. Entre autres personnes, (Niazi and Hussain, 2011) expliquent cette dualité en détail.

Un autre concept ayant comme parent commun avec l'agent, l'IA, et que l'on retrouvera également dans ce mémoire, est le « machine learning » (ML). Le ML est la technologie permettant aux machines d'apprendre seules, à partir de données fournies, et d'en générer des algorithmes à différentes fins (ex : prédiction). Comme il est dit précédemment, les approches ML et SMA sont deux sous-domaines de l'IA. La différence est que le sujet principal du ML est de développer des composants de l'intelligence alors que le but (entre autres) de la recherche en SMA est de les intégrer (Moyaux et al., 2006), en l'occurrence ici dans un type d'activité cognitive particulière de l'agent : l'apprentissage.

I.1.3 Les ACE

L'exemple de la section I.1.1 en page 20 sur l'intelligence collective des fourmis peut être transposé au domaine de l'humain, et en ce qui nous intéresse plus particulièrement dans ce mémoire, au domaine de l'économie. Si nous prenons par exemple le marché du pain dans un pays quelconque où l'économie n'est pas dirigée par l'État, il n'y a pas un expert central qui va définir les règles d'organisation du marché et qui va répartir le lien producteur ↔ consommateur pour que le marché du pain soit à l'équilibre au niveau global. Au contraire, l'état sur l'équilibre global (ou non) de ce marché émergera de l'interaction endogène entre les différents acteurs intervenant dans ce marché ; chaque acheteur/vendeur de pain n'ayant une perception que partielle de ce marché. Certes, contrairement au système des fourmis, un marché, selon son type, peut avoir une entité globale, par exemple pour réguler le prix, qui peut influencer des comportements locaux, ou pour collecter des données à des fins purement statistiques. Mais ces influences ne sont souvent que partielles au sens où elles ne vont pas (car ne pourront pas) aller jusqu'à la coordination globale du marché pour que celui-ci atteigne un équilibre global. Dans le marché du pain, le choix d'un vendeur par un acheteur se décide plutôt après l'interaction entre l'acheteur et le vendeur et/ou avec son environnement : distance de sa maison, sympathie du vendeur, éventuellement négociation de prix d'ami, concurrence, etc.

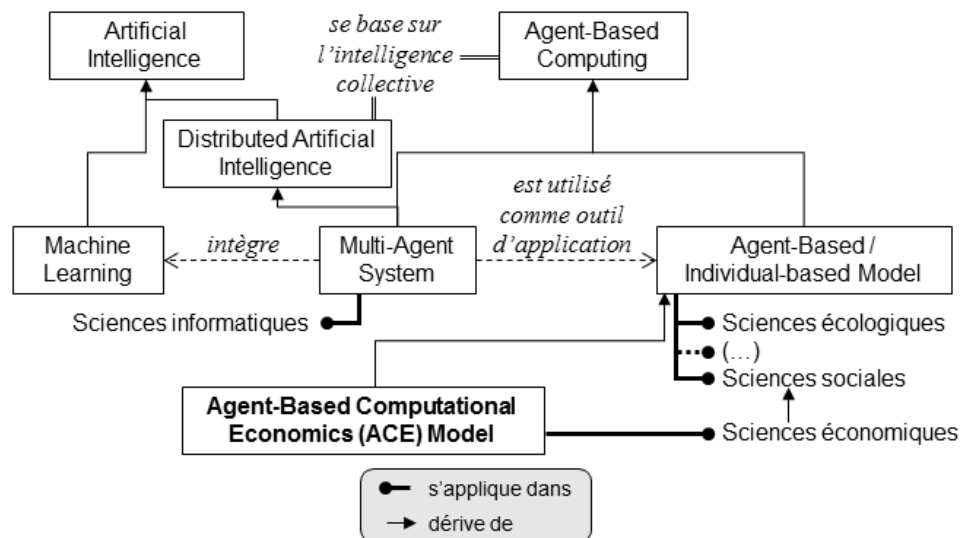
Si le marché ci-dessus est modélisé sous forme assez réaliste d'agents en interaction, qui n'impose pas d'équilibre prédéfini, alors le modèle correspondant est un modèle ACE. Plus globalement, un ACE correspond à l'étude d'un processus économique modélisé et simulé sous forme d'agents qui sont en interaction de manière dynamique (Tsfatsion, 2006; Hamill and Gilbert, 2016; Nardone, 2019). En d'autres termes, un ACE est un « agent-based » appliqué au domaine des sciences économiques. Lorsque le concept de perception partielle de l'environnement est transposé dans l'ACE, on parle d'agents économiques ayant une rationalité limitée et une connaissance imparfaite du marché. Ces agents ne peuvent donc pas y prendre une décision optimale (Rouchier, 2013). L'ACE peut être appliqué aussi bien au niveau micro (Kirman and Vriend, 2001; Vriend, 2006) que macro (Oeffner, 2008; Fagiolo and Roventini, 2012; Lengnick, 2013).

Dans la littérature, ce n'est pas parce qu'on parle du paradigme agent appliqué à l'économie que le terme ACE est systématiquement utilisé. Beaucoup de travaux préfèrent s'en tenir au terme plus générique de AB ou « Agent-Based » tout simplement comme (Farmer and Foley, 2009; Anon, 2010; Lengnick, 2013). Étant générique, le terme AB peut aussi être utilisé dans d'autres domaines tels que les sciences économiques et les sciences écologiques (Railsback and Grimm, 2019) même si ce dernier peut aussi parfois utiliser le terme d'Individual-Based Model (IBM).

☞ Pour garder le focus de ce mémoire sur les sciences économiques, tout modèle « Agent-Based » appliqué à l'économie, utilisé dans ce mémoire sera un modèle ACE même si l'article le décrivant utilise le terme générique de « Agent-Based Model » (ABM). Plus généralement, sera considéré comme modèle ACE tout modèle agent intégrant (au moins) des variables économiques ou socio-économiques.

La Figure I.1 ci-dessous résume le positionnement de l'ACE au sein des concepts définis dans cette section.

Figure I.1 : Positionnement de l'ACE au sein des concepts définis dans la section I.1.



Source : Schéma compilé de (Calderoni, 2002; Moyaux et al., 2006; Niazi and Hussain, 2011; Nardone, 2019).

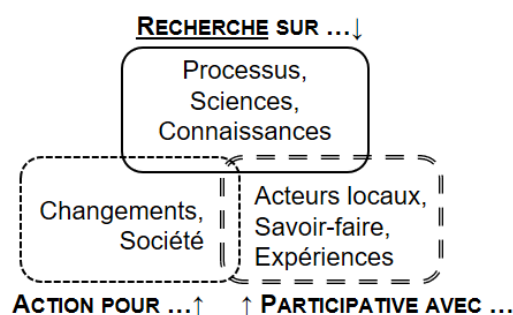
I.2 La recherche-action participative et les jeux sérieux

I.2.1 La recherche-action participative

La recherche-action est un cadre d'investigations qualitatives venu tout droit du domaine des sciences sociales (Lewin, 1946). Si l'on prend comme exemple le monde éducatif (Catroux, 2002), la recherche-action est, pour un praticien de ce monde, un processus destiné à porter un regard critique sur ses pratiques et ce, à travers (a) ses expériences éclairées et nourries des savoirs théoriques en cours et (b) son contact avec son terrain d'action (ses élèves). Après une réflexion approfondie et l'observation de dysfonctionnements, il met alors en place des stratégies correctrices. L'acteur principal de cette recherche peut être décrit sous les termes de « accompagnant-chercheur » ou « praticien-chercheur ». La recherche-action demande un engagement de transformation sociale de la part du chercheur à l'égard des secteurs de la société (Anadon and Savoie-Zajc, 2007) avec l'idée que des avancées théoriques pouvaient être réalisées en même temps que des changements sociaux (Lewin, 1946). Il s'agit donc ici de renforcer le rapprochement entre la Recherche et la société civile. Comme exemples de recherche-action, il est possible de citer les jeux de rôles d'accompagnement des acteurs en Afrique dans leur gestion du territoire ou des ressources (d'Aquino et al., 2002; Roudier et al., 2014; Perrotton et al., 2017).

Les exemples se passant en Afrique [en page 22](#) montrent qu'une recherche-action peut également être participative (cf. [Figure I.2 ci-dessous](#)). Nous entrons alors dans l'apprentissage social. Tous les participants deviennent acteurs consentants du processus de recherche et le praticien-chercheur peut se trouver inclus dans le processus à parts égales avec les autres participants. Pour obtenir ce consensus, il est parfois nécessaire, pour le praticien, d'obtenir la légitimité vis-à-vis des autres participants. Dans un exemple de conflit d'usage en Afrique ([Perrotton et al., 2017](#)), le praticien a dû s'immerger pendant des mois (dormir chez les villageois, etc.) pour comprendre le vécu de son territoire d'études et pour y acquérir ensuite cette légitimité. Cette quête de légitimité n'est pas qu'une méthodologie, c'est aussi un état d'esprit.

Figure I.2 : Les différentes composantes d'un projet mené en recherche-action participative.



Source : ([Storup, 2013](#))

Il n'y a pas un modèle unique et dominant pour pratiquer la recherche-action participative. Le praticien peut s'inspirer d'un foisonnement d'expérimentations et/ou inventer sa propre méthodologie au fur et à mesure de la mise en place d'actions innovantes. Ensuite, il opère un retour systématique vers les bases théoriques adéquates ([Catroux, 2002](#); [Storup, 2013](#)). Il faut seulement partir sur l'idée d'analyse intégrée, c'est-à-dire une analyse qui permet de mobiliser différents outils complémentaires entre eux, et qui servent de supports d'accompagnement au processus de décision ([Collectif _Commod, 2005](#)).

I.2.2 Jeux de rôles sérieux ou « serious-game »

Une manière de mettre en œuvre la recherche-action participative est le jeu sérieux ([Djaouti et al., 2011](#)) et en ce qui concerne ce mémoire plus précisément, le jeu sérieux sous forme de jeux de rôles. Son objectif est de combiner des ressorts ludiques avec des aspects sérieux tels l'enseignement, l'apprentissage, la communication, ou encore l'information. Une telle association a donc pour but de s'écarter du simple divertissement et, dans certains cas d'application comme les conflits d'usage, de viser même à diminuer les tensions durant les échanges entre parties prenantes.

Une particularité des jeux de rôles par rapport à d'autres méthodes d'acquisition des connaissances, et qui permettrait d'amorcer les changements sociaux mentionnés dans la section [I.2.1 en page 22](#), est la permutation de rôles. Comme le souligne Pink ([Pink, 2016](#)) qui a basé son ouvrage sur bon nombre d'études en sciences sociales, la capacité d'une personne à faire bouger autrui (vers le changement) repose sur la capacité de la première personne à s'abstraire de sa propre expérience pour imaginer les émotions, les perceptions et les motivations de l'autre. Cette abstraction lui permet ainsi de comprendre le point de vue

de l'autre, de se mettre à sa place, et de voir le monde par ses yeux. Le jeu sérieux est un endroit propice à cette forme d'interaction.

I.2.3 Lien jeux de rôles, simulation ACE et économie comportementale

La technique du jeu de rôles est très efficace pour générer des propositions de scénarios mais beaucoup moins pour leur exploitation. En effet, lors d'une séance de jeu, la réalisation d'un pas de temps (tour de jeu) est chronophage et la répétition des mêmes actions par les joueurs provoque rapidement de la lassitude (d'Aquino et al., 2002; Le Page et al., 2010; Le Port, 2017). C'est ici qu'entre en jeu la simulation informatique, en l'occurrence, la simulation par ACE. En effet, tout comme dans le territoire réel où chaque acteur n'a une connaissance que partielle du système, les agents n'ont aussi une représentation que partielle de leur environnement (cf. définition dans la section I.1.1 en page 20). La simulation par jeux de rôles et la simulation par l'ACE peuvent donc être deux formes d'implémentation d'un même modèle conceptuel du monde observé (cf. Figure I.3 en page 25). Les finalités des jeux de rôles et de la simulation ACE peuvent cependant être potentiellement différentes. Les jeux de rôles servent à discuter directement de scénarios de gestion. En revanche, la simulation consiste d'abord à identifier et à implémenter les règles de décisions à l'origine des interactions, en pouvant s'appuyer éventuellement sur des théories. Elle permet ensuite aux acteurs de valider les interactions entre les différentes représentations et les dynamiques du système intégrées dans le modèle. Cette validation participe ainsi à un processus d'apprentissage du système étudié par les acteurs locaux (Collectif _Commod, 2005).

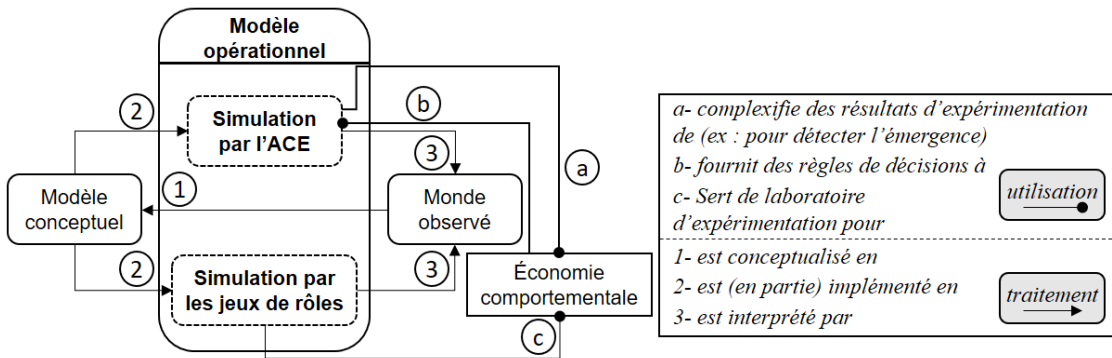
Dans le domaine de l'économie (qui nous intéresse dans ce mémoire), un cadre d'utilisation du jeu de rôles est l'économie comportementale ou ECP (Serra, 2017). Pour rappel, l'ECP est un champ de la science économique qui vise à la compréhension de la prise de décision économique des individus dans une situation d'incertitude, à travers la mise en situation individuelle ou en interaction, et en utilisant aussi des paramètres autres qu'économiques, notamment les paramètres psychologiques (*ibidem*). Elle remet en question le postulat avançant que les parties impliquées dans une transaction quelconque prennent des décisions rationnelles conformes à leur intérêt personnel respectif (Pink, 2016). À préciser toutefois que le jeu de rôle a une importance plus grande que la seule compréhension du comportement. Il met aussi en avant une démarche intégrative et systémique d'établissement de liens entre les éléments, entre les agents, etc.

Par ailleurs, (Mueller and Pyka, 2016) mettent en avant des liens réciproques entre l'ECP et l'ACE : (a) dans le lien ECP $\rightarrow$ ACE, il s'agit d'implémenter dans un modèle ACE des résultats d'expérimentations ECP de cas basés sur des décisions heuristiques et d'augmenter ensuite le degré de complexité du modèle afin de détecter l'émergence de résultats additionnels inattendus et (b) dans le lien ACE $\rightarrow$ ECP, il s'agit d'utiliser les décisions heuristiques issues de l'ECP pour programmer des règles de décisions dans un modèle ACE, l'approche ACE étant capable d'incorporer les différentes connaissances issues des ECP sur les comportements humain et institutionnels (rationalité limitée, solution non optimale) en modèle exploitable. Cette modélisation ACE aboutirait alors à une nouvelle et profonde compréhension des systèmes économiques.

Le lien jeux de rôles $\leftrightarrow$ simulation peut aussi prendre une autre forme mixte plateau/ordinateur : la simulation participative. C'est une approche qui croise la simulation

⁶ Pour un domaine donné, la conceptualisation consiste à traduire un modèle de ce domaine (compris par le thématicien) en un modèle prêt pour la simulation (compris par l'informaticien), en précisant complètement les différents aspects, notamment dynamiques, et ce, via des formalismes choisis (Le Page et al., 2010).

Figure I.3 : Lien entre jeux de rôles, simulation ACE et économie comportementale.



Source : Schéma adapté de (Le Page et al., 2010), (Mueller and Pyka, 2016) et (Serra, 2017).

et les approches participatives pour produire des apprentissages sur une problématique environnementale (Becu et al., 2017). Dans cette configuration, la simulation participative prend la forme d'un plateau de jeu de rôles appuyé par un simulateur informatique. Ce simulateur implémente une version stylisée des principaux processus économiques et environnementaux liés à la problématique traitée et qui ne relèvent pas de la décision des joueurs dans le jeu, mais par exemple du phénomène météo (Perrotton et al., 2017). Une autre utilisation possible du simulateur est de permettre au joueur d'estimer le résultat d'une décision qu'il doit prendre, avant de l'appliquer concrètement dans le jeu, comme l'a fait (Daré et al., 2018). Précisons que simulation informatique et jeux de rôles ne sont pas toujours connectés. Lorsque le système à étudier se situe à une échelle plus large qu'un jeu de rôles (souvent effectué avec un nombre limité de joueurs), seule la simulation informatique est mise en œuvre.

I.3 Le paradigme ACE

Pour une personne (physique ou morale) menant une étude scientifique donnée, le terme de paradigme se traduit ici par le mode de pensée de cette personne sur le niveau de complexité jusqu'auquel le système étudié devrait être représenté.

(Rossignol, 2018) définit 3 niveaux de la complexité :

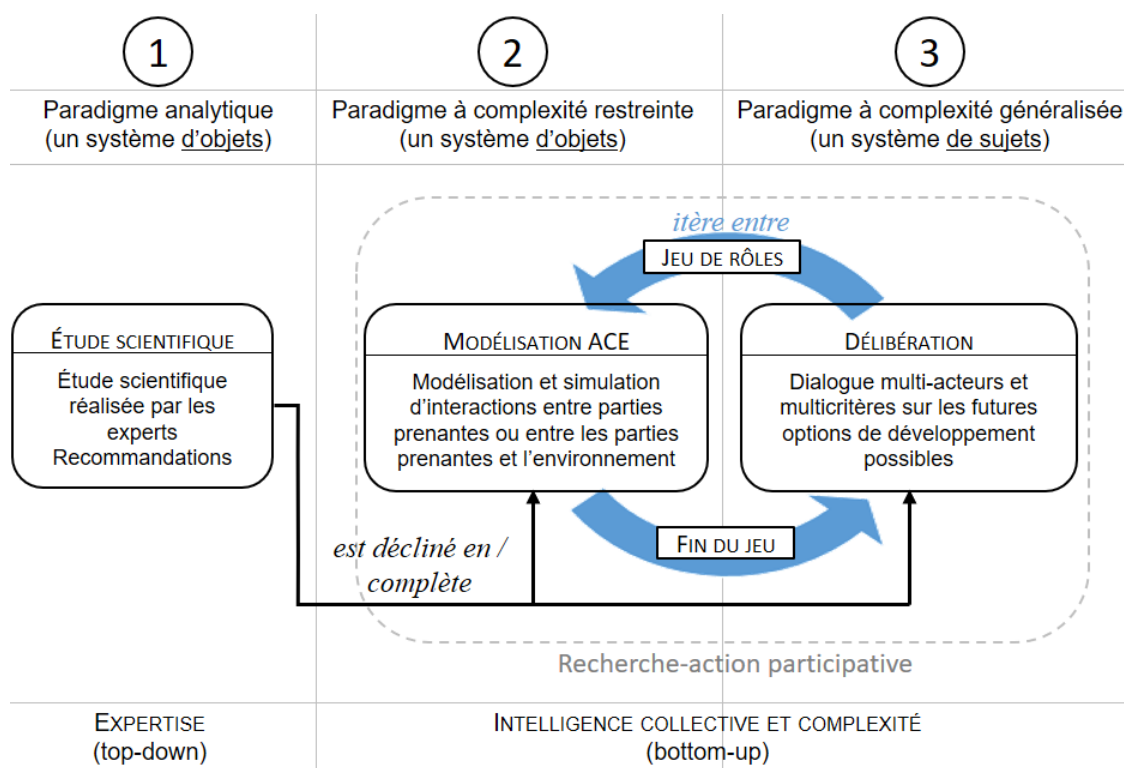
- le paradigme analytique ;
- le paradigme de la complexité restreinte ;
- le paradigme de la complexité généralisée.

Le concept de « complexité » d'un système peut être défini selon deux points d'entrée (Fromm, 2004) :

- la complexité comme une propriété : un système complexe est en général *multi-niveaux*, c'est-à-dire représenté par différents modèles (ou différents sous-modèles d'un même modèle dans le cas d'un SMA) à différents niveaux en interaction entre eux ; la raison d'être des niveaux multiples est que le modèle du niveau du dessus seul n'est pas assez représentatif pour décrire la dynamique du niveau en dessous ;
- la complexité comme un processus : un système complexe est *multi-acteurs* c'est-à-dire composé d'acteurs percevant ce même système de manière différente et agissant différemment. Cette différence de perception est due au niveau de difficultés auxquelles chaque acteur fait face pour comprendre ce système.

Une déclinaison des 3 paradigmes pour inclure l'ACE est présentée dans la [Figure I.4 ci-dessous](#).

Figure I.4 : Place de l'ACE dans les paradigmes de la complexité.



Source : le schéma générique des 3 niveaux est tiré de ([Rossignol, 2018](#)).

I.3.1 Préambule : le paradigme analytique par l'expertise

Le paradigme analytique (notons-le paradigme 1) est le paradigme dit classique (type « top-down ») adopté par défaut pour résoudre un problème car plus « simple » en termes d'appréhension. Ce paradigme est souvent adopté par les experts (généralement à connaissances transversales) en ne considérant que très faiblement les spécificités et les exceptions d'un territoire comme le ressenti ou l'histoire de chaque acteur impliqué dans la problématique. En conséquence, la solution (générale) proposée par l'expertise n'est pas toujours adaptée.

Les modélisateurs adoptant ce paradigme utilisent généralement des approches analytiques (d'où le nom) de types statistiques ou mathématiques (ex : sous forme d'équations différentielles). Or, si on souhaite augmenter en complexité, ces approches présentent rapidement leurs limites dont les principales sont les suivantes ([Calderoni, 2002](#)) : une analyse à niveau unique (pas multi-niveau) ; un manque de réalisme (paramètre global) et une non prise en compte des actions individuelles, de leurs interactions et donc des modifications du milieu, qui en découleraient, y compris au niveau macro (pas d'émergence, seulement des probabilités).

Dans le domaine qui nous concerne plus particulièrement ici (l'économie), ceux qui adoptent ce paradigme reproduisent les mêmes limites dans leur modèle. Cela a été pointé par

(Sherwood et al., 2017) dans leur étude de l'économie de la criticité des ressources naturelles à l'échelle macro-économique. Ces auteurs donnent des exemples d'hypothèses fortes que ces modèles sous-tendent : la substituabilité de toutes les ressources naturelles, l'absence d'effets papillon (sensibilité aux conditions initiales), une parfaite connaissance de tous les gisements, et l'existence d'un équilibre du marché par l'action d'agents représentatifs des producteurs et des consommateurs. En somme, même si le choix de ce paradigme est assez courant, il est incapable de représenter la complexité du système réel dans des modèles basés sur des équations abusivement simplificatrices accompagnées d'hypothèses fortes.

I.3.2 Le paradigme ACE par l'intelligence collective

Les hypothèses fortes du paradigme analytique ne tiennent plus quand il s'agit de voir l'économie comme un système complexe évolutif et adaptatif (Arthur et al., 1997; Sherwood et al., 2017). Dans ce cas, un modélisateur, pour appréhender cette complexité, peut choisir la modélisation par ACE (cf. section I.1.3 en page 21 pour la définition de l'ACE) au lieu d'une modélisation plus analytique. C'est le paradigme ACE (notons-le paradigme 2). Cependant, ce paradigme peut aussi parfois s'appuyer sur les acquis d'un travail issu du paradigme 1.

I.3.3 Complément : le paradigme délibératif par l'intelligence collective

Dans l'aide à la décision, les modèles sont importants. Par exemple, l'équipe de Perrotton, (Perrotton et al., 2017), pour son jeu de rôles multi-acteurs sur les pratiques agricoles, avait obligatoirement besoin d'un modèle pour simuler le phénomène climatique. Le modèle est aussi intéressant car, s'il ne se substitue pas aux acteurs, il peut en discipliner le dialogue (Epstein, 2008). Il permet également une représentation d'un système sans devoir expérimenter ce dernier dans le monde réel (Railsback and Grimm, 2019). Enfin, il est bénéfique dans un système complexe où devra être étudié le jeu simultané de bon nombre de variables, ce que les limitations de notre cerveau nous interdisent sans l'assistance de l'informatique (Calderoni, 2002).

Cependant, à un moment donné, le modèle seul ne suffit pas. D'abord parce que tout n'est pas modélisable. Ensuite, une connaissance ne vient pas uniquement d'un modèle : un modèle n'est qu'une source de connaissances possibles au même niveau d'importance qu'un rapport ou une base de données. Enfin, la vraie complexité du monde socio-économique, ce ne sont pas les agents, c'est le dialogue humain qu'il y a derrière (van Asselt Marjolein and Rijkens-Klomp, 2002). Nous entrons alors dans le paradigme délibératif (notons-le paradigme 3) dans lequel l'irrationnel et la subjectivité tiennent également une grande part. Ce paradigme signifie que l'évaluation objective (estimation des variables à travers des modèles) devrait ensuite être suivie d'une évaluation subjective (en donner un sens sociétal, avec des formes de décisions généralement non optimales). Pour ce faire, les différents acteurs, en s'appuyant sur les acquis des paradigmes 1 et 2, s'engagent dans la construction d'un espace de débats techniques, politiques et environnementaux dans une perspective *délibérative*, c'est-à-dire dans l'échange des points de vue (opinions) via un dialogue construit (Frame and O'Connor, 2011). Le dialogue se base sur le jugement et la comparaison de différents scénarios. Dans ce paradigme, tout est subjectif et la modélisation scientifique ne s'applique plus.

☞ Le terme « délibératif » ici peut être assimilé, à un niveau individuel et dans un cadre simulé, à celui utilisé dans la trilogie de comportement agent « perception – délibération – action » de (Calderoni, 2002) dans laquelle la réflexion se situe à l'intérieur d'un seul agent virtuel.

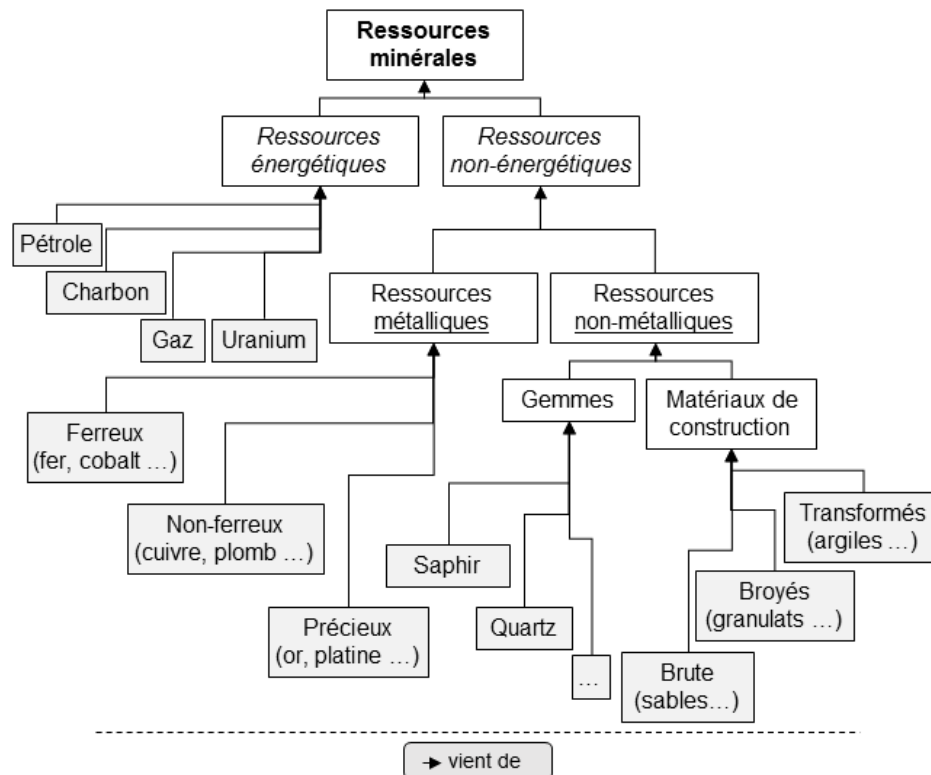
La recherche-action participative (cf. [Figure I.2 en page 23](#)) est généralement adoptée par les paradigmes 2 et 3. Néanmoins, contrairement au résultat d'une expertise (paradigme 1), il est parfois impossible de généraliser les résultats d'une recherche-action. Il n'est envisageable d'y revendiquer une pertinence que pour le seul terrain d'exploration et les seuls partenaires étudiés ([Catroux, 2002](#)).

I.4 Les ressources minérales et leur économie circulaire

I.4.1 Les ressources minérales

Si l'on reprend la définition de ([Cuney, n.d.](#)), les ressources minérales correspondent à toute substance extraite de la croûte continentale par l'homme, ce qui inclut des éléments qui ne sont pas des métaux. La [Figure I.5 ci-dessous](#) donne une vue partielle de la subdivision du domaine des ressources minérales.

Figure I.5 : Vue partielle sur la classification du domaine des ressources minérales.



Source : compilation des travaux ([Cuney, n.d.](#)), ([Gems-plus, n.d.](#)) et ([Marcoux, 2011](#)).

I.4.2 Les filières ressources minérales et leur économie circulaire éventuelle

Lorsqu'on parle de filières ressources minérales, on parle de leur exploration jusqu'à leur exploitation, en passant par les étapes du traitement et de la valorisation, ainsi que de leurs impacts sur l'économie, sur la société et sur l'environnement. Si on se focalise sur le mode d'exploitation, et en reprenant ([Jaques et al., 2006](#)), on parle généralement de filière « mine artisanale » lorsque la filière est comparée à une « cueillette opportuniste » largement informelle. Elle exploite de manière non planifiée, avec l'équipement le plus rudimentaire, une

ressource mal connue. Elle correspond le plus souvent à une activité complémentaire de subsistance, pratiquée de façon saisonnière et parfois itinérante par une population essentiellement rurale. Dans le cas contraire, on parle de filière ‘mine industrielle’, caractérisée par la mobilisation de moyens financiers et techniques qui peuvent être importants. La filière ‘mine artisanale’ est plus connue sous son terme anglais de « Artisanal and Small-scale Mining » ou ASM.

L’analyse des filières ressources minérales peut se prolonger jusqu’à leur éventuelle économie circulaire. La définition exacte de l’économie circulaire est toujours en cours de débat principalement dû à l’abondance des concepts la caractérisant ([Geisendorf and Pietrulla, 2018](#)). En attendant l’issue de ce débat, résumons ci-après l’économie circulaire des ressources minérales.

Une fois que le produit utilisant les substances minérales (éventuellement après transformation) est en fin de vie et donc que le temps de résidence des substances minérales dans l’économie est écoulé (temps variable d’une substance à une autre), une partie de ces substances peut être récupérée, recyclée ou revalorisée, puis réinjectée dans l’économie (possibilité variable évidemment en fonction de la substance et de l’usage). La partie non récupérable est stockée dans son exutoire final. Pour les granulats par exemple, il s’agit de récupérer les déchets issus de la déconstruction des bâtiments et travaux publics (BTP) pour en faire des granulats recyclés ou pour remblayer les carrières en fin de vie (valorisation). Le reste est envoyé en ISDI (Installation et Stockage de Déchets), son exutoire final ([ADEME, 2012](#); [Dougnet et al., 2019](#)). Un principe similaire s’applique à la filière des métaux ([BIO by Deloitte, 2015](#)) en précisant que contrairement aux filières granulats, étudiées à l’échelle d’un territoire, les filières métaux sont étudiées à l’échelle internationale.

I.5 Complément : le BRGM

Le BRGM n’est pas mentionné dans le titre du manuscrit et n’est pas non plus un concept scientifique. Néanmoins, il est explicité dans ce chapitre sur la terminologie car il revêt un caractère important pour comprendre ce mémoire : c’est l’établissement dans lequel j’ai effectué tout mon parcours.

Fondé en 1959, le BRGM, service géologique national français, est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC), statutairement placé sous la tutelle du ministre chargé de la Recherche, du ministre chargé des Mines et du ministre chargé de l’Environnement. La mission du BRGM est duale : (a) produire de nouvelles connaissances sur le sol et le sous-sol pour comprendre les processus géologiques et leurs interactions avec d’autres processus de surface d’origine naturelle ou anthropique, et (b) traiter et modéliser ces connaissances pour une valorisation optimisée du sol et du sous-sol ainsi qu’une réduction de risques naturels.

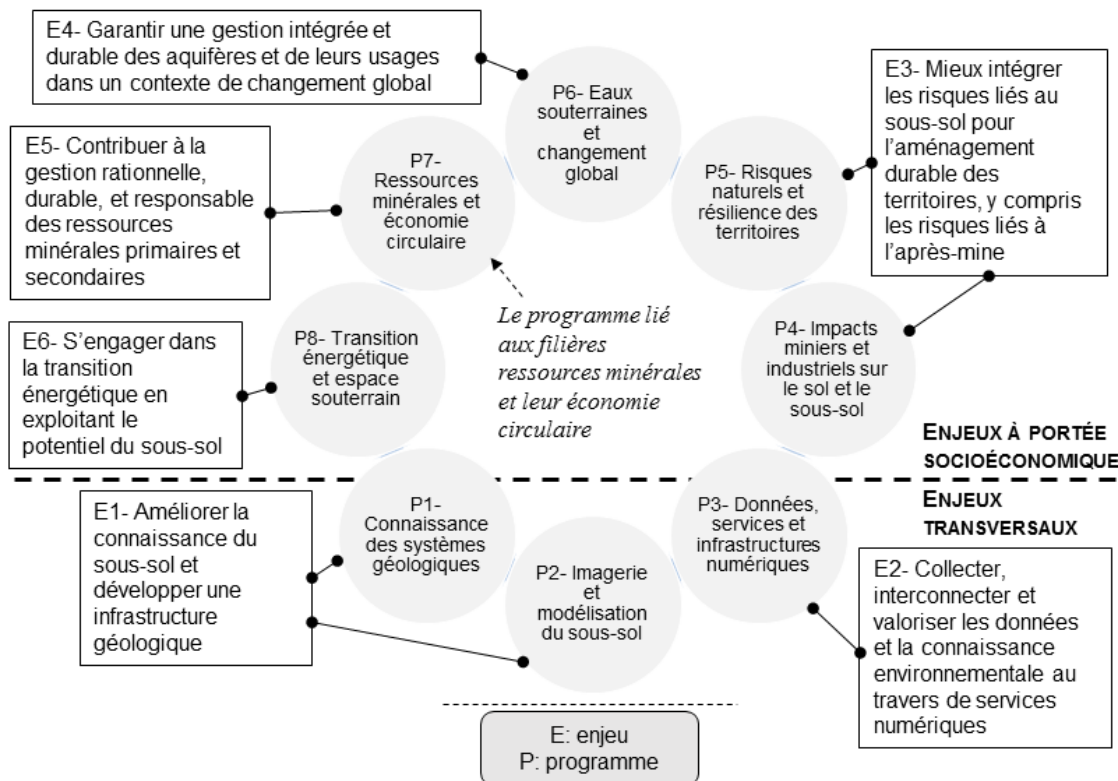
Les activités d’innovation, de valorisation et de transfert des résultats de la recherche constituent l’un des trois piliers du BRGM en complément au développement de la recherche et de l’expertise scientifique et technique ([COP_BRGM, 2019](#)).

I.5.1 Les programmes scientifiques du BRGM

La vision scientifique du BRGM est actuellement déclinée au travers d’une stratégie scientifique à 10 ans, basée sur 6 enjeux dont 2 enjeux scientifiques transversaux (connaissance géologique et numérique) interagissant avec 4 autres enjeux de portée socio-économique (eau, risques, énergie et matières minérales). Dans le cadre du contrat d’objectifs et de performance 2018-2022 ([COP_BRGM, 2019](#)), ces 6 enjeux sont ensuite déclinés en 8

programmes. La [Figure I.6 ci-dessous](#) illustre cette organisation. Les ressources minérales se situent en P7 (les numéros sont ici des identifiants attribués uniquement dans ce manuscrit).

Figure I.6 : La stratégie scientifique du BRGM à 10 ans : 6 enjeux (E) déclinés en 8 programmes. (P)



Source : (COP_BRGM, 2019).

Alors que le parcours scientifique raconté dans ce mémoire commence en 2003, le manuscrit fera souvent référence à la [Figure I.6 ci-dessus](#), qui date de 2019. En effet, même si différentes formes de réorganisation structurelles ou stratégiques ont eu lieu au BRGM jusqu'en 2019, les thématiques principales traitées par l'établissement n'ont globalement pas changé

I.5.2 La vie de chercheur dans un EPIC comme le BRGM

Le statut d'EPIC du BRGM se traduit par une dynamique contractuelle de projets nécessaires à sa production scientifique génératrice d'impact sur les acteurs économiques, mais également à la maîtrise de son budget. En effet, la dotation affectée par les ministères de tutelle ne couvre que 50 % (pour le BRGM) des coûts de fonctionnement et structurels (y compris masse salariale) de l'établissement. Pour cette raison, il est recommandé aux agents BRGM de prioriser, le cas échéant, et toutes affaires cessantes, la préparation de projets collaboratifs avec des industriels afin que le cofinancement (les autres 50 %) paie le coût complet (c'est-à-dire salaire inclus) au lieu de simplement le coût marginal (déplacement ...). Dans le cas contraire, il faudrait vraiment que le projet soit très stratégique pour le BRGM pour que celui-ci y réponde favorablement avec seulement un cofinancement du coût marginal. Aussi, un projet précédent, à partir du moment où il est administrativement terminé alors que sa

valorisation n'est pas tout à fait achevée dans le calendrier prévu (ce qui arrive parfois), n'est plus prioritaire. Ce mode de fonctionnement peut être contraignant. Néanmoins, à partir du moment où il est accepté, présente des opportunités comme notamment celui de faire du « networking » avec de nouveaux partenaires de recherche. Cela permet ainsi de se mettre en bonne position pour répondre aux futurs appels (même si les précédents ont par exemple été refusés) et en parallèle, d'améliorer les échanges de connaissances scientifiques à différentes échelles. Au BRGM, entrer dans ce cercle vertueux est indispensable pour faire vivre la recherche sur le long-terme.

Chapitre II. Caractère et chronologie du parcours scientifique

*« N'allez pas là où le chemin peut mener.
Allez là où il n'y a pas de chemin et laissez une trace »*
- Ralph Waldo Emerson

CE CHAPITRE PEUT ÊTRE CONSIDÉRÉ comme le cœur de ce mémoire : décrire mon parcours scientifique entre 2003 et 2020. Au fur et à mesure du récit, le chapitre effectue un point d'étape sur les acquis récoltés jusqu'à l'étape en question.

Contenu du chapitre

II.1	Introduction aux itinéraires principaux et aux questions de recherche	34
II.1.1	Les itinéraires principaux et les tronçons d'itinéraires	34
II.1.2	Les filières étudiées et les projets réalisés	35
II.1.3	Les questions de recherche et le(s) intervention(s) du candidat	35
II.2	Le début du parcours	41
II.2.1	Un bref passage dans l'avant-thèse (...- 2003)	41
II.2.2	Arrivée au BRGM et premiers constats	42
II.3	Parcours itinéraire 1 : modélisation ACE des filières ressources minérales	44
II.3.1	Le tronçon « mine artisanale » (2003-2005)	45
II.3.2	Le tronçon « granulats et/ou économie circulaire » (2006-2018).....	48
II.3.3	Le tronçon « charbon » (2009-2011)	52
II.3.4	Le tronçon « métaux stratégiques » (2011-2019).....	53
II.4	Parcours itinéraire 2 : de la modélisation ACE à la recherche-action	57
II.4.1	Préambule : évolution de l'itinéraire 1 vers l'itinéraire 2	57
II.4.2	Le tronçon « mine artisanale » (2003-2005)	58
II.4.3	Le tronçon « granulats et/ou économie circulaire » (2013-2018).....	59
II.4.4	Le tronçon « métaux stratégiques » (2014-2019).....	64
II.4.5	Le tronçon « géothermie » (2018).....	64
II.4.6	Un tronçon méthodologique (2018 et 2019)	65
II.5	Les projets en cours (2020)	68
II.5.1	Le projet « acceptabilité mine » en Europe (recherche-action).....	68
II.5.2	Le projet « mine artisanale » en Afrique (recherche-action).....	68
II.5.3	Le projet « après-mine » en France (recherche-action)	69
II.6	Informations complémentaires sur le parcours.....	69
II.6.1	Changement dans la discipline de recherche	69
II.6.2	Évaluation d'articles de recherche	70
II.6.3	Démarche bibliographique.....	70
II.6.4	Informations complémentaires sur les publications.....	71

La section [II.1](#) introduit les éléments principaux nécessaires à la compréhension du parcours, ainsi que les questions de recherche traitées. Les sections de [II.2](#) à [II.4](#) résument ensuite le

parcours passé tandis que la section II.5 résume les projets en cours (2020). Le chapitre se termine par la section II.6 où sont présentées des informations complémentaires.

☞ En fonction de la catégorie à laquelle il pense appartenir (cf. tableau en page 16), le lecteur peut poursuivre sa lecture par ce chapitre, s'il le souhaite, ou se référer de nouveau à la Figure en page 18 pour identifier d'autres chemins.

II.1 Introduction aux itinéraires principaux et aux questions de recherche

II.1.1 Les itinéraires principaux et les tronçons d'itinéraires

Mon parcours au BRGM a été une succession de projets scientifiques traitant de problèmes thématiques de filières. Ces problèmes peuvent être à leur tour décomposés en sous-problèmes et traités dans des projets différents. Il y a cependant dans ce mémoire une autre porte d'entrée par laquelle je souhaiterais raconter mon parcours (avant les filières et projets) : l'itinéraire. J'appelle ici « itinéraire » l'intention dominante, en termes de finalités, que je souhaitais pour une étude ou pour un projet (le terme de « dominant » fait qu'un projet peut donc néanmoins être orienté par plusieurs intentions). L'itinéraire est la porte d'entrée de mon histoire car je pense que l'itinéraire (un mode de pensée humain) est, au final, l'ingrédient majeur qui restera à la fin d'un projet (une structure administrative et financière à durée de vie limitée). C'est elle – et sa maturation dans le temps – qui servira de support de construction des futurs programmes ou projets de recherche (une occurrence de mise en œuvre de cette pensée).

Par rapport à cette porte d'entrée, mon parcours scientifique post-thèse comprend deux grands itinéraires :

1. la modélisation d'un système par l'ACE, à des fins de production de connaissances et d'évaluation de leur qualité du point de vue scientifique ;
2. l'intégration de cette modélisation ACE dans une démarche de recherche-action participative et délibérative, à des fins d'évaluation de la pertinence des connaissances du point de vue sociétal.

Le fait que j'évolue vers l'itinéraire 2 ne signifie pas que je prétends avoir une expertise sur tous les domaines nécessaires à l'interprétation d'un processus collectif de décision, comme la sociologie ou la géologie par exemple. En revanche, je me donne l'obligation de leur accorder un poids. J'entre donc ici dans une démarche d'intelligence collective.

Une correspondance peut être faite entre l'itinéraire et le paradigme de la Figure I.4 en page 26. L'itinéraire 1 correspond au paradigme 2 (modélisation ACE), en interaction avec le paradigme 1 (expertise), et l'itinéraire 2 correspond au paradigme 3 (délibération), appuyé par les acquis de l'itinéraire 1. De même, les deux itinéraires sont analogues aux contextes d'usages de la démarche participative, mentionnés dans (Collectif_Commod, 2005). L'itinéraire 1 correspond à la production de connaissances sur des filières complexes (recherche sur des filières) et l'itinéraire 2 correspond à l'accompagnement de processus collectifs de décision (recherche sur des méthodes visant à faciliter la gestion concertée de ces filières).

Dans le récit de ce parcours, viennent ensuite, pour chaque itinéraire, les filières (la problématique) traitées d'où le concept de « tronçon » d'itinéraires.

☞ Dans ce manuscrit, un tronçon fait référence à une filière étudiée dans un itinéraire. Pour un itinéraire donné, les tronçons seront cités dans l'ordre de leur date de commencement. Un tronçon peut contenir plusieurs projets.

Parmi ces tronçons, il y a ce que j'appelle les tronçons « hors-sujet » c'est-à-dire ceux qui ne couvrent pas le domaine des ressources minérales (qui est celui écrit dans le titre de ce mémoire). En réalité, le titre a été élaboré ainsi en raison du volume de travail très élevé (estimé à plus de 85 % du temps) réalisé sur l'ACE et sur les filières ressources minérales durant tout le parcours. Cependant, je suis aussi intervenu sur des filières autres que ressources minérales et non modélisées par l'ACE. Ramenée à l'ensemble du parcours, mon intervention sur ces autres sujets a représenté un volume plus faible mais a eu cependant une importance équivalente et a été enrichissante en termes d'acquis de recherche. Ces tronçons, intégrés désormais dans le reste de ce chapitre, sont les filières géothermie (P8 dans la [Figure I.6 en page 30](#)) et après-mine (P4 dans la même figure).

II.1.2 Les filières étudiées et les projets réalisés

Le [Tableau II.1 en page 36](#) donne un récapitulatif des filières traitées et des projets réalisés durant le parcours scientifique. Bon nombre des substances montrées dans ce tableau peuvent être retrouvées dans la [Figure I.5 en page 28](#) portant sur la classification des ressources minérales. Une première analyse qui peut être faite du [Tableau II.1](#) est le mode de financement des projets. Celui-ci part initialement d'un financement 100 % BRGM et évolue progressivement vers du financement collaboratif. Seuls les projets initiés en 2020 sont, pour la plupart, de nouveau financés à 100 % par le BRGM, un nouveau cycle en somme.

Le [Tableau II.2 en page 37](#) est une suite du [Tableau II.1](#), focalisée sur la partie chronologique (donc entre 2003 et 2020). Le fonctionnement du BRGM en mode EPIC, c'est-à-dire priorité accordée à la gestion de projets (cf. le détail dans la section [I.5.2 en page 30](#)), a eu comme conséquence que ces filières n'ont pas été étudiées de manière linéaire et séquentielle, mais plutôt parallèle, avec un rythme variable, dépendant des opportunités que présentent les appels d'offre.

Cette séparation en deux tableaux est adoptée uniquement pour une meilleure gestion de l'espace dans le manuscrit.

II.1.3 Les questions de recherche et le(s) intervention(s) du candidat

Le [Tableau II.3 en page 37](#) donne ensuite un récapitulatif des questions de recherche (en modélisation ou en recherche-action) qui existaient dans les projets introduits précédemment, et mes interventions par rapport à ces questions respectives.

Précisons que lorsque, pour une ligne du tableau (liée à un projet donné), aucune question de recherche n'existe dans la colonne associée, cela signifie que mon rôle consistait à seulement coordonner le projet concerné. De plus, lorsque, pour une ligne du tableau (liée à un projet donné), le mot « volet » est mentionné, cela signifie que les questions de recherche associées correspondent uniquement à des sous-questions (liées au volet modélisation ou recherche-action) faisant partie d'un ensemble de questions plus grand du projet. Cependant, le tableau (et ce manuscrit) se focalise uniquement sur ces sous-questions car c'est principalement à ces niveaux que se sont situées mes contributions.

☞ Le reste de ce chapitre porte sur la mise en histoire des 3 tableaux introduits précédemment.

Tableau II.1 : Description synthétique des filières étudiées et des projets réalisés durant le parcours scientifique.

Filière étudiée	Acronyme	Nom	Financement	Partenaire(s)
Filière mine artisanale	FENIX	Fer, Nickel, X : Prospective économique et socioéconomique des ressources minérales	BRGM	
	CAG28	Congrès Africain pour la Géologie 28 ^{ème} édition	BRGM	
Filière granulats	SIG-RF	Système d'information Géographique – Ressources France	BRGM	
	ANTAG	Anticipation de l'accès à la ressource granulats	ANR	ARMINES, UNICEM, Université de Leoben (Autriche)
	AGREGA	Anticipation et gestion régionales des ressources en granulats	ANR	ARMINES, UNICEM, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, ANDREIL-Game, IPR (ex-IAU), VNF
Filière charbon	Eo-Miners	Earth Observation for Monitoring and Observing Environmental and Societal Impacts of Mineral Resources Exploration and Exploitation	UE-FP7	Une dizaine de partenaires dont la liste est visible sur http://www.eo-miners.eu/project_information/partners_introduction.htm
Filière métaux	Criticité	Criticité des métaux stratégiques	BRGM	
	ECO-min	Économie minière	CARNOT	
	MIREU	Mining and metallurgy regions of EU	UE-H2020	Une trentaine de partenaires dont la liste est visible sur https://mireu.eu/our-partners
Filière géothermie	PréGo	Préfiguration Géothermique des Ouvrages profonds	ANR	Université Orléans, université Nantes, INERIS, ELECTERRE de France
Filière après-mine	EXPLO_DRP	Projet exploratoire « après-mine durable »	BRGM	Université de Toulouse

Tableau II.2 : Chronologie (2003 à 2020) d'études des filières et des projets décrits dans le [Tableau II.1](#).

Filière étudiée	déclinaison	Projet	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Mine artisanale	or, quartz	FENIX																		
Granulats		SIG-RF																		
Granulats		ANTAG																		
Charbon		Eo-Miners																		
Métaux	lithium	Criticité																		
Granulats et économie circulaire		AGREGA																		
Géothermie		PréGo																		
Métaux	cobalt	ECO-min																		
Métaux		MIREU																		
Mine artisanale	or	CAG28																		
Après-mine		EXPLO_DRP																		

Tableau II.3 : Les questions de recherche (modélisation ou recherche-action) abordées dans chaque projet et le(s) intervention(s) du candidat dans chaque question.

Projet	Filière étudiée	déclinaison	Question de recherche en modélisation ou en recherche-action	Disciplines intervenantes	Niveau(x) d'intervention du candidat
FENIX	Mine artisanale	or (ruée)	Étendue, durée et impact environnemental d'une ruée	Géologie, économie, socio-économie, environnement, informatique	Volet modélisation (approche par l'ACE) du projet : pilotage de la publication

Projet	Filière étudiée	déclinaison	Question de recherche en modélisation ou en recherche-action	Disciplines intervenantes	Niveau(x) d'intervention du candidat
FENIX (suite)		quartz	Impact de l'activité sur la situation socioéconomique de la population locale	Géologie, économie, socio-économie, informatique	Volet modélisation (approche par l'ACE) du projet : pilotage de la publication
		or (gouvernance)	Réduction de la filière clandestine par le développement	Géologie, économie, socio-économie, informatique	Volet modélisation (approche par l'ACE) du projet : pilotage général
SIG-RF	Granulats		Recherche de nouveaux gisements sous contrainte du coût de transport	Géologie, économie, informatique, géomatique	Volet modélisation (approche par l'ACE) du projet : pilotage général
					Développement informatique de plateforme de simulation ACE
ANTAG	Granulats		Impacts économique, environnemental et sociétal d'une fermeture de carrières	Mathématiques, environnement, géologie, économie, socio-économie	Participation à la modélisation (approche par système dynamique)
Eo-Miners	Charbon		Impact prospectif de l'activité sur l'extension urbaine	Géologie, environnement, informatique, géographie, télédétection	Volet modélisation (approche par l'ACE) du projet : pilotage général
Criticité	Métaux	lithium	Durée d'une rupture d'approvisionnement selon différents scénarios	Statistiques, économie, géologie, informatique	Pilotage général (un projet à modélisation par l'approche ACE)
AGREGA	Granulats et économie circulaire			Géologie, économie, socioéconomique, environnement	Coordination
			Localisation possible des nouvelles carrières selon différentes contraintes	Mathématiques, économie, environnement, informatique	Volet modélisation (approche optimisation) : préparation des données

Projet	Filière étudiée	déclinaison	Question de recherche en modélisation ou en recherche-action	Disciplines intervenantes	Niveau(x) d'intervention du candidat
AGREGA (suite)					Compréhension du mécanisme ACV (analyse de cycle de vie) des granulats
			Répartition à l'échelle fine des besoins en granulats recyclés et en enrobés	Économie, informatique, environnement	Volet modélisation (approche par l'ACE) : pilotage général
			Compréhension des enjeux de l'économie circulaire	Socio-économie, économie, informatique, environnement	Pilotage construction d'un jeu de rôles (incluant développement d'un logiciel d'accompagnement des jeux et application de l'ACV)
					Animation de différentes sessions de jeux
					Contribution à l'évaluation multi-acteurs des enjeux et scénarios
PréGo	Géothermie				Coordination
			Compréhension des enjeux importants pour les acteurs sur la reconversion d'un ouvrage profond en ouvrage géothermique	Géothermie, économie, socio-économie, environnement	Compréhension des méthodologies déjà développées dans d'autres projets (hors PréGo) car déjà plus avancées
ECO-min	Métaux	cobalt	Identification des déterminants de l'importation française en cobalt et étude de scénarios prospectifs	Statistiques, économie, géologie, informatique	Pilotage général (un projet à modélisation par l'approche ACE)
MIREU	Métaux		Acceptabilité sociétale de la mine en Europe	Sociologie, géologie, économie, environnement	Volet « outil de discussion SLO (Social License to Operate) » : alimentation des réflexions sur l'élaboration d'un jeu sérieux

Projet	Filière étudiée	déclinaison	Question de recherche en modélisation ou en recherche-action	Disciplines intervenantes	Niveau(x) d'intervention du candidat
CAG28	Mine artisanale	or	Amélioration de la formalisation de la filière (réduction de la filière clandestine)	Socio-économie, géologie, économie, informatique	Réflexion sur la mise en place d'une méthodologie participative pour les locaux en Afrique
EXPLO_ DRP	Après-mine		Identification des déterminants des risques liés à l'après-mine, perception sociétale de la situation et coconstruction de gestion	Environnement, sociologie, géosciences	Contribution au développement des nouvelles méthodes correspondantes incluant les jeux sérieux

II.2 Le début du parcours

II.2.1 Un bref passage dans l'avant-thèse (...- 2003)

Un exercice d'Habilitation demande une présentation de l'évolution des recherches entreprises depuis la thèse (ici, fin 2003) et donc tout mon parcours au BRGM (établissement introduit dans la section [I.5 en page 29](#)). Je reviendrai cependant brièvement sur la période passée entre 1999 et 2003 à l'université de La Réunion car elle explique en partie (a) les réorientations de mon parcours, (b) les questions abordées durant le parcours post-thèse, en termes d'abstraction dans une modélisation, de choix d'outils de simulation, de recherche-action (concept défini dans la section [I.2.1 en page 22](#)) ainsi que (c) dans une moindre mesure, une partie des perspectives de recherche proposées dans ce mémoire.

J'ai fait mon stage de Master 2 en informatique à l'université de La Réunion en collaboration avec le CIRAD de La Réunion ([Courdier et al., 2002](#); [Courdier et al., 2003](#)). C'est à ce moment-là que j'ai été initié aux systèmes multi-agents ou SMA (concept défini dans la section [I.1.1 en page 20](#)) avec une application concrète à la gestion des ressources agricoles et de l'environnement ([Courdier et al., 2002](#)). J'y ai aussi découvert le monde de la simulation de négociations multi-acteurs. Par la suite, pour ma thèse en informatique ([Andriamasinoro, 2003](#)), j'ai pu ouvrir mon champ d'application au domaine des risques naturels, notamment la simulation du comportement de paysans à Mangatany (Madagascar) face à des problématiques d'érosion.

En parallèle, et sur un plan plus technique, je me suis approprié, lors de cette thèse, une plateforme de simulation SMA multi-robots appelée ADK (Agent-Development Kit), développée par un collègue de l'équipe dans laquelle j'étais ([Calderoni, 2002](#)). Dans ADK, la partie « environnement » correspondait à un espace continu dans lequel un robot (un agent) se déplaçait, s'orientait et évitait des obstacles de type polygone, cercle, etc. Ce niveau de précision allant au-delà d'une discrétisation de l'espace sous forme de grille de cellules m'intéressait. Cependant, la dimension de cet espace était très faible (30 x 30 pixels) ce qui limitait également la possibilité d'utiliser la plateforme pour une application à plus grande échelle. De plus, l'initialisation d'une application se faisait par des scripts qu'il fallait changer à chaque application, ce qui alourdissait la procédure. C'est à ce moment-là que j'ai entendu parler de systèmes d'information géographiques (SIG) et de formats vectoriels (point, ligne, polyligne, polygone), stockés par exemple par l'entreprise ESRI® dans des fichiers appelés shapefiles (extension.shp). Des formats utilisés pour représenter des objets de manière précise.

C'est de là que m'était venu le souhait de m'investir, dans mes futures recherches en informatique (post-thèse par conséquent), dans la problématique de couplage SMA/SIG ([Bazghandi and Pouyan, 2008](#)) avec des données vectorielles. ADK passerait alors d'espace fictif occupé par quelques robots à une application plus proche de la réalité (car la digitalisation de données spatiales est généralement motivée par un besoin de représentation réaliste). Cette application pouvait donc contenir beaucoup d'agents avec tout ce que cela implique : évaluation du coût de calcul informatique induit, évaluation du niveau d'acceptation de la démarche par l'utilisateur (réduction du temps d'attente, facilité de compréhension des résultats, etc.) notamment quand l'application augmente en complexité. C'est ces trois bagages – compétences en informatique / SMA, application en gestion des territoires (CIRAD et Mangatany) et un projet de couplage SMA/SIG – que je suis venu apporter au BRGM, notamment en répondant aux problématiques de celui-ci (ex : problème de localisation et de coût de transport de minerais) via la construction de modèles socio-économiques spatialement explicites.

II.2.2 Arrivée au BRGM et premiers constats

J'ai été embauché au BRGM en tant que post-doctorant en informatique. Si le service informatique a été présent lors de mon entretien d'embauche, c'est au service des ressources minérales (cf. notion sur ces ressources dans la section [I.4.1 en page 28](#)), et plus précisément dans l'unité EI2D (Économie, Intelligence et Développement Durable) de ce service⁷, que j'ai été affecté. Je n'avais que très peu de connaissances sur les ressources minérales et sur les concepts concernant la géologie ou la mine. Néanmoins, posséder ces connaissances n'était pas un prérequis principal par rapport aux travaux à effectuer. En revanche, avoir eu des bagages applicatifs (surtout en partie provenant du CIRAD, un organisme de même statut que le BRGM et traitant les ressources naturelles comme lui) était un atout à l'embauche. Même si j'ai été affecté à EI2D, dans mon esprit cela restait bien un postdoc en informatique et donc une problématique de recherche dans cette discipline.

II.2.2.1 Constats sur la place de l'ACE dans la gestion des ressources minérales

La place de l'acceptation de l'approche ACE (concept introduit dans la section [I.1.3 en page 21](#)) par le BRGM, à mon arrivée, a été un déterminant du parcours. Présenter cette place dans cette sous-section permettra notamment de comprendre (a) l'état d'avancement des modèles ACE que j'ai développés par la suite et (b) le champ bibliographique couvert par mon travail.

Lors de mon embauche au BRGM, je pensais mettre en œuvre mon projet de couplage SMA/SIG (introduit [en page 41](#)) dans la plateforme SMA du BRGM, ce qui signifiait que je pensais que le BRGM en avait une. En effet, comme le CIRAD (ressources agricoles) s'intéressait déjà au monde des agents, tout comme l'IFREMER (ressources halieutiques) et – ce qui a été appelé à l'époque – le CEMAGREF (ressources en eau, agriculture et environnement) ou encore l'INRA (ressources agronomiques), je pensais que de facto, le BRGM (ressources minérales), également un établissement public impliqué dans la gestion des ressources naturelles, s'y était déjà intéressé lui aussi. Il n'en était rien ; aucune structure n'a encore travaillé sur le sujet, pas même à l'intérieur du service informatique du BRGM (le SMA étant du domaine des sciences informatiques). L'histoire m'apprendra par la suite, pendant un colloque, en 2005, appelé SMAGET (Système Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires) où étaient présents bon nombre des établissements susmentionnés, que le BRGM n'a jamais été représenté dans ce type de manifestation. En fait, l'intérêt du BRGM pour l'ACE était confiné à l'unité EI2D qui m'a accueilli et qui a vu l'idée comme une innovation pour l'équipe. Le but de ma mission fut d'abord d'identifier l'intérêt d'appliquer une telle approche à la problématique socio-économique des ressources minérales, et non de contribuer à une quelconque mise en place d'une structure BRGM travaillant sur l'ACE.

Même si ma mission était à vocation applicative, l'idéal aurait été d'être en parallèle connecté à l'avancée de la technologie ACE (veille). Or, cela augmentait le nombre de tâches personnelles (simulation thématique et veille en même temps). Et comme aucune autre équipe au BRGM ne traitait le sujet des agents, une idée alternative à la mise en place d'une structure ACE interne aurait alors été par exemple d'établir des partenariats, au moins avec des universités spécialisées en ACE, pour mûrir le projet avant d'aller à la recherche d'un financement collaboratif avec des industriels. Je pensais par exemple, pour cette thématique, à l'adhésion du BRGM à des Unités Mixtes de Recherche (UMR), comme ce qu'il fait aujourd'hui avec l'UMR ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans) pour la géologie et avec l'UMR G-EAU (Gestion de l'eau, acteurs, usages – Montpellier) pour les ressources en eau. Néanmoins, comme la démarche ACE, nouvelle,

⁷ En 2012, l'unité EI2D est devenue OEG – Observatoire et Économie des Géoressources - et le service Ressources Minérales est devenu Direction des GéoRessources.

n'était pas prioritaire au-delà de la structure d'accueil, l'établissement d'un partenariat quelconque, même universitaire, a été difficile. Tout ceci a été renforcé par le fait qu'à l'époque, et dans un cadre plus général hors le monde des géosciences, l'approche ACE était aussi faiblement acceptée (Weyns et al., 2009; Farmer and Foley, 2009; Squazzoni, 2010; Hamill, 2010). Si ces références datent de (2009-2010), on peut imaginer la situation en 2003. Je me suis également renseigné dans le monde des géosciences, notamment au « British geological Survey » ou BGS (le service géologique britannique) ou à « l'United States Geological Survey » ou USGS (le service géologique américain). Aucun de ces services n'utilisait l'ACE mais une approche de modélisation plus classique comme l'ont fait (Brown et al., 2011) pour le BGS. Par rapport à la Figure I.4 en page 26 sur les paradigmes, tous adoptaient donc le paradigme 1 c'est-à-dire celui de l'expertise. L'histoire m'apprendra par la suite que des services de l'ACE s'intéressent en réalité aux « agent-based models » (concept introduit dans la section I.1.2 en page 20) mais plutôt ceux dans le domaine de l'environnement et de l'écologie (Wein and Labiosa, 2013; DeAngelis and Diaz, 2019), non celui dans le domaine des ressources minérales.

Précisons qu'au BRGM, des modèles économiques sont développés. Mais déjà, ces modèles ne sont pas des modèles ACE, mais en plus, ils relèvent du domaine des eaux souterraines (Rinaudo, 2012) et non des ressources minérales. Ainsi, par rapport à la Figure I.6 en page 30, ils relèvent davantage du programme P6 que du programme P7 où je suis. À mon arrivée en 2003, je me suis néanmoins rapproché de cette équipe P6 en vue de la recherche d'un éventuel établissement de passerelles méthodologiques entre les programmes, pour construire par exemple un projet étudiant l'impact de l'activité minière sur la pollution de l'eau. Lors de cette démarche, j'ai notamment pris connaissance du modèle développé par (Lanini et al., 2004) sur la gestion de l'eau. Dans ce modèle, les paramètres physiques ont été bien détaillés. En revanche, la modélisation des acteurs humains (viticulteurs, gestionnaire du canal d'irrigation, loueur de canoës...) a été élaborée d'une manière très (trop ?) simplifiée, c'est-à-dire par un seul acteur (parfois appelé aussi dans le monde des agents, un agent représentatif (Fagiolo and Roventini, 2012)) dont les paramètres sont censés représenter, en globalité, le comportement général du territoire dans lequel il se trouve. L'approche de modélisation choisie par ce modèle était basée sur des équations différentielles (paradigme 1). Un autre modèle ACE du même domaine et suivant le même paradigme est celui qui avait été développé plus tard par (Graveline, 2009) et qui utilisait l'approche ACB (Analyse Coût-Bénéfice) pour évaluer les stratégies d'approvisionnement en eau à La Réunion. Par rapport à la recherche d'établissement de passerelles méthodologiques susmentionnée entre ces types de modélisation et l'ACE, la faisabilité sur le plan technique et l'intérêt méthodologique ont été prouvés. Cependant, la proposition n'a pas été concrétisée en termes de financement, ce qui montrait bien la difficulté de globalisation de la démarche ACE.

En conséquence, faute d'université et faute de service géologique utilisant l'ACE, une part importante de ma bibliographie ACE durant ce parcours a été étendue vers le domaine des ressources naturelles en général en plus du domaine des ressources minérales en particulier.

☞ La situation décrite dans cette sous-section est l'une des raisons d'être du Chapitre I de ce manuscrit.

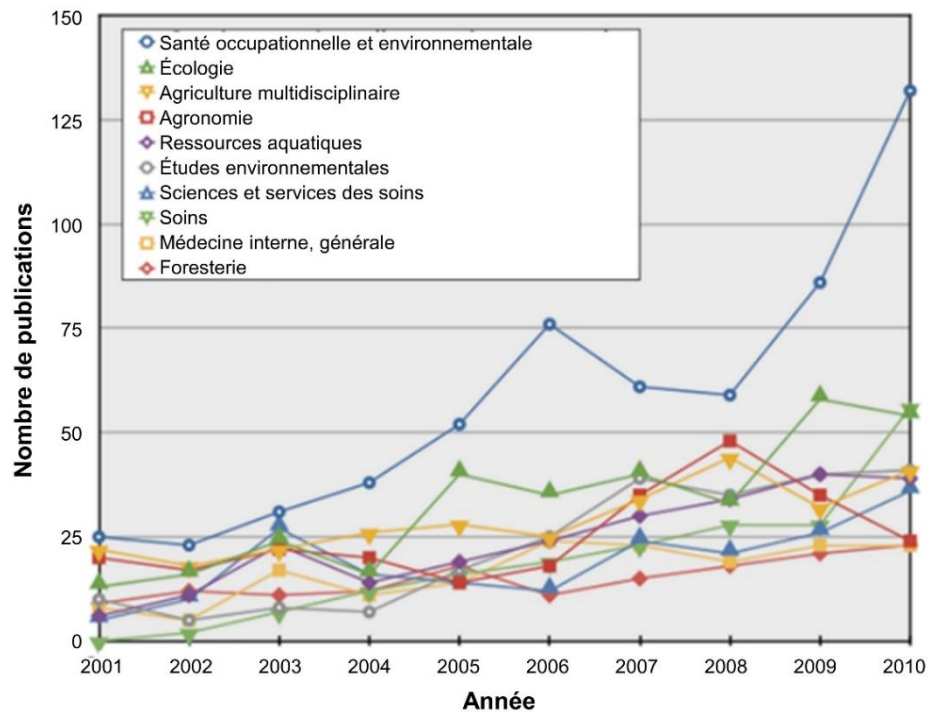
II.2.2.2 Constats sur la place de la recherche-action dans la gestion des ressources minérales

Cette sous-section est l'équivalente de la sous-section II.2.2.1 pour la recherche-action participative.

Pour résumer, la situation était quasi identique à celle de l'ACE : il n'y a pas eu de démarche de construction méthodologique de recherche-action participative sur la gestion des filières

ressources minérales au BRGM. D'ailleurs, la littérature m'apprendra bien des années plus tard que les sujets ou disciplines (au sens de la nomenclature de la base de données « Web of science » - donc une base de données à couverture mondiale) dans lesquels les articles contenant le mot-clé « Participatory » sont publiés, ne contiennent pas le volet « mine », comme le montre la [Figure II.1 ci-dessous](#). Précisément, la figure ne montre pas la présence des sujets « mine » ou « ressources minérales » jusqu'en 2010. A fortiori, 2003 n'était donc pas mieux.

Figure II.1 : Nombre de publications contenant le mot-clé « Participatory » selon le sujet : le sujet « mine » est absent.



Source : (Storup, 2013).

Au fil des années, j'ai constaté qu'il y a bien eu, au BRGM, le renforcement de l'approche participative. Toutefois, cela concernait d'autres grandes thématiques comme les risques naturels (P5 dans la [Figure I.6 en page 30](#)) ou les ressources en eau (P6 dans la même figure) ; des initiatives locales donc.

C'est avec ces constats observés lors du début du parcours que j'ai ensuite emprunté mes deux itinéraires principaux.

II.3 Parcours itinéraire 1 : modélisation ACE des filières ressources minérales

Pour chaque tronçon de cet itinéraire, il sera développé :

- la raison de l'emprunt de ce tronçon dans le parcours ;
- les travaux scientifiques menés ;
- la raison du choix de l'ACE pour résoudre les problématiques correspondant à ce tronçon ;
- un point sur les acquis à l'issue de ce tronçon.

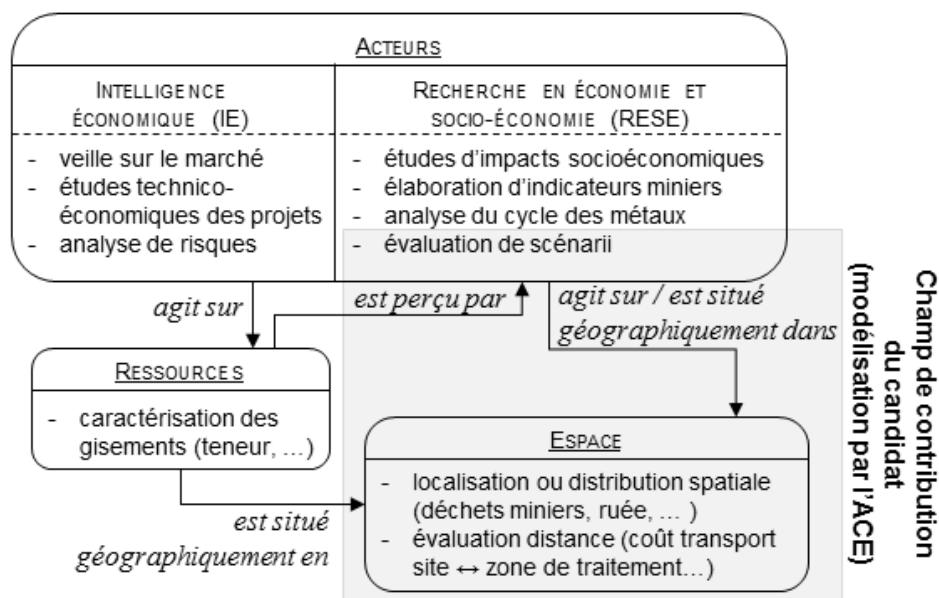
II.3.1 Le tronçon « mine artisanale » (2003-2005)

II.3.1.1 Pourquoi l'emprunt de ce tronçon ?

À mon arrivée au BRGM fin 2003, je me suis trouvé engagé dans un programme de recherche essentiellement consacré à la modélisation socio-économique des filières ressources minérales à l'échelle de la mine artisanale (définie dans la section I.4.2 en page 28) en Afrique. Via un projet appelé FENIX, l'unité EI2D (Économie, Intelligence et Développement Durable) qui m'accueillait (cf. l'histoire en page 42) regroupait un ensemble d'activités orientées vers la prospective économique et socio-économique dans le domaine des ressources minérales. Dans cette configuration, elle adoptait une trilogie « acteurs – ressources – espace » ou ARE dans laquelle les connaissances du sol et du sous-sol se situent majoritairement au niveau de l'espace (E) et des ressources (R) localisées au sein de cet espace.

La notion de « prospective » économique pilotée par l'unité se déclinait au travers de deux grandes composantes. La première composante réalisait une activité d'intelligence économique (IE). Elle a été menée dans un objectif d'appui aux politiques publiques ou aux industriels. La deuxième composante, à vocation recherche dans les domaines économiques et socio-économiques (RESE), avait pour visée de répondre aux problématiques de gestion des ressources naturelles. On peut notamment y citer l'étude des impacts socio-économiques liés à l'exploitation des ressources minérales, l'élaboration d'indicateurs de suivi de la mine artisanale et des projets miniers industriels, les aspects dynamiques des nouveaux flux dans le cycle des métaux, et la modélisation socio-économique des impacts et des scénarii d'évolution. C'est dans cette composante RESE et sur ce dernier point que j'ai travaillé (cf. Figure II.2 ci-dessous).

Figure II.2 : Champ de contribution (en gris) du candidat dans son unité d'accueil, champ exprimé selon le schéma de trilogie « acteurs, ressources, espace » (ARE) adopté par l'unité.



Mon travail dans la composante RESE se faisait en collaboration permanente avec 2 géologues, 1 géographe - socio-économiste et 1 économiste. Ce travail, en fonction des besoins, pouvait aussi inclure par moment d'autres géologues.

II.3.1.2 Travaux scientifiques

La première problématique dont j'ai contribué à l'étude en termes de modélisation ACE portait sur la formation de la ruée vers l'or au Burkina Faso. Cette ruée arrive suite à la découverte, par un ou quelques individus, d'un gisement initial, et suivi du cas où cette découverte s'intensifie par la suite jusqu'à atteindre un paroxysme (toute découverte d'un gisement n'évolue pas toujours vers une ruée). La ruée génère des impacts environnementaux (déforestation suite à la construction de puits, pollution de l'eau ...). Par rapport à cette problématique, les questions posées dans FENIX étaient les suivantes : *(a) quelle serait l'étendue géographique d'une ruée ? (b) combien de temps durerait-elle ? (c) quel est son impact dans le temps en termes de taille de population attirée, de production réalisée et environnemental ?*

Ce premier projet – le premier auquel j'ai participé à mon arrivée – avait déjà commencé. J'ai donc pris le train en marche. Ma contribution portait à la fois sur l'alimentation des réflexions déjà en cours et sur le pilotage des publications ou communications qui ont suivi.

La seconde problématique, dont j'ai contribué à l'étude en termes de modélisation ACE, portait sur la filière quartz à Madagascar (QZM). Le secteur ASM est multi-secteur au sens où la plupart des mineurs sont aussi des fermiers ou des agriculteurs avec l'objectif d'avoir plusieurs sources de revenus pour faire face aux difficultés (Hilson, 2009; Hilson, 2016; Etter-Phoya, 2019). À Madagascar, la filière quartz est active uniquement dans une stratégie de survie (Barthélémy and Bouchut, 2002), c'est-à-dire lorsque l'agriculture n'est pas rentable. Sur ce travail, la question posée dans FENIX était la suivante : *quels seraient les impacts de l'activité QZM sur l'évolution de la répartition de la population locale (riche, moyenne, pauvre) – mesurée en stock de riz, si l'on tient compte également des activités autres que minières comme la culture du riz, du girofle et de la vanille (tous ramenés à l'équivalent riz) ?*

La dernière problématique, dont j'ai contribué à l'étude en termes de modélisation ACE, portait sur la formalisation (c'est-à-dire la suppression du circuit informel, clandestin) de la filière artisanale « or » sur le site d'Alga (ou ASGMA pour « Artisanal and Small-scale Gold Mining in Alga ») au Burkina Faso.

L'ACE est un secteur caractérisé par une productivité très faible, exploité par une population pauvre (Pelon and Martel-Jantin, 2006; Mandere, 2019) mais qui possède un grand potentiel en termes d'emploi direct et indirect (Jaques et al., 2006; Hilson, 2016; Mandere, 2019). La filière est organisée en chaîne de valeurs, de l'extraction de minerais sur un site jusqu'à la vente finale de l'or après transformation successive du minerai (concassage, broyage, lavage, etc.). Si le secteur ASM semble être bien organisé, il est cependant en grande partie informel c'est-à-dire que bon nombre d'acheteurs illicites sont présents sur site et sont prêts à acheter le minerai plus cher que le prix officiel. Ces acheteurs sont amenés à perdurer (Hilson, 2009). Par rapport à cette situation, les questions qui étaient posées dans FENIX étaient les suivantes : *(a) dans un objectif de développement, jusqu'où serait-il possible d'augmenter le salaire d'une population ASGMA ? et (b) dans un objectif de bonne gouvernance, jusqu'où serait-il possible de réduire l'importance des acheteurs clandestins dans la filière ASGMA ?*

C'est lors de ce dernier projet que j'ai pris le pilotage du volet modélisation socio-économique de l'équipe FENIX.

☞ Des extraits de résultats de simulation réalisés sur ce tronçon se trouvent en [Annexe I](#), section « [filiale « mine artisanale »](#) », page 130

II.3.1.3 Pourquoi l'ACE pour ce tronçon ?

D'abord, si j'étais simpliste, je dirais : pour répondre au besoin du BRGM. L'ACE était la nouvelle approche de modélisation socio-économique qui m'a été demandé de tester. En effet, à mon arrivée dans l'entreprise, un exercice de modélisation socio-économique se focalisait

généralement sur la dynamique des ressources (le « R » de ARE de la [Figure II.2 en page 45](#)) et plaçait alors les acteurs à un niveau plus abstrait (cf. l'histoire [en page 43](#)).

Au-delà de cette raison plutôt stratégique, je pourrais cependant apporter aussi des raisons plus scientifiques, liées à la nature des applications, pour justifier le choix de l'ACE pour ce tronçon. Ces raisons sont développées ci-après.

La ruée vers l'or (au Burkina Faso comme ailleurs) est un phénomène totalement bottom-up ([Jonsson and Brycesson, 2009](#)). Elle n'est donc pas déclenchée à un niveau global et centralisé. En termes de contrôle, ce mode de déclenchement pose d'ailleurs problème à des autorités en Afrique. Par exemple, une discussion que j'ai eue avec un membre d'un ministère des Mines à Madagascar à propos de la ruée vers le saphir à Ilakaka ([Guerin and Moreau, 2000](#)) m'a permis de comprendre que les autorités ne savaient pas, à leur niveau, comment anticiper sa venue ni comment la gérer par la suite alors qu'elle génère des impacts environnementaux et sociétaux importants. Pour représenter ce phénomène du « déclenché localement puis amplifié » (ici, découverte locale de gisement puis ruée), l'approche par agent est souvent la plus adaptée, comme cela a été fait depuis quelques décennies avec la modélisation de sociétés des fourmis par ([Drogoul, 1993](#)). Si le choix semble normal pour le niveau micro, il commence à l'être aussi pour le niveau macro (plus précisément ici macro-économique), un choix soutenu par entre autres ([Farmer and Foley, 2009](#); [Anon, 2010](#); [Fagiolo and Roventini, 2012](#)) depuis les subprimes générées localement par quelques banques aux États-Unis mais dont les effets se sont ensuite amplifiés au niveau mondial.

Quant à la problématique de la formalisation du secteur ASM, Gavin Hilson ([Hilson, 2009](#)), un des contributeurs majeurs dans l'analyse de la formalisation du secteur ASM en Afrique ainsi que le développement méthodologique associé, a conclu que la prédominante approche classique de type « top-down » pour appréhender la complexité de l'ACE a toujours abouti à la construction de réglementations inefficaces, incompatibles et déconnectées de la réalité. Il a alors incité à ce que soient mises en œuvre de nouvelles idées incluant un fort ingrédient bottom-up dans cette analyse et qui tienne compte notamment de l'organisation de travail complexe du secteur : multi-échelle, multi-acteurs, multi-secteurs. Cette complexité de l'ACE est valable pour l'or au Burkina Faso, pour le quartz à Madagascar, et pour n'importe quelle filière ASM en Afrique, d'où ici l'approche ACE.

II.3.1.4 Point sur les acquis

Ce tronçon concernant l'ACE correspondait à mon entrée en modélisation ACE dans le domaine des ressources minérales, en collaboration avec les thématiciens (géologues, économistes et socio-économistes). Le tronçon m'a permis de comprendre progressivement ce qu'est le marché des ressources minérales, le long de la chaîne des valeurs et les problématiques qu'un tel marché pourrait avoir. Avoir emprunté ce tronçon m'a aussi permis de renforcer l'aspect multi-disciplinaire de mes domaines d'application – à présent les ressources minérales aussi – après les ressources agricoles et les risques naturels et, en parallèle, de faire un premier test de l'utilisation de la plateforme agent ADK sur un cas plus concret que quelques robots (cf. toute l'histoire dans la section [II.2.1 en page 41](#)). Cependant, contrairement à mon souhait initial, ce tronçon ne m'a pas permis de faire un couplage SMA/SIG, faute de données SIG correspondantes. La raison en était l'absence de méthodologie socio-économique pour la collecte des données en ressources minérales (pour rappel, l'activité FENIX était pionnière à l'époque). En termes de recherche, le BRGM, dans sa longue histoire avec l'Afrique, est plutôt habitué à développer des méthodologies visant à réaliser des cartes de synthèses régionales à continentales fondées sur l'étude d'objets géologiques ([Billa and Lescuyer, 2005](#); [Collectif Histoire, 2009](#); [Bailly et al., 2015](#); [Fullgraf, 2019](#)). Ces méthodologies traditionnelles n'étaient pas transposables car ne permettaient pas d'aller au niveau détaillé demandé par l'analyse socio-économique (par exemple

la cartographie précise de la distance entre un site et une zone de transformation, utile pour calculer le revenu des transporteurs). Avec l'avènement de l'unité EI2D / la composante RESE, toute une nouvelle méthodologie restait donc à mettre en place.

Sur le plan scientifique, ce tronçon a produit :

- 2 publications dans des revues scientifiques (Andriamasinoro and Angel, 2007), (Andriamasinoro and Angel, 2012) ;
- 3 communications à des congrès (Andriamasinoro et al., 2005), (Andriamasinoro and Angel, 2005) et (Oru et al., 2007). La première communication a été récompensée d'un « best-paper second runner-up award » (SCSC, 2005).

II.3.2 Le tronçon « granulats et/ou économie circulaire » (2006-2018)

II.3.2.1 Pourquoi l'emprunt de ce tronçon ?

En 2006, le BRGM a décidé de changer de stratégie en arrêtant toute forme de Recherche en Afrique (géologie, socio-économie, etc.) et donc tout le financement associé. La conséquence a été que des membres de l'équipe RESE (à droite dans la Figure II.2 en page 45) se sont orientés vers de nouvelles activités ou ont quitté le BRGM. Les activités de RESE ont été ensuite supprimées, sauf la modélisation, maintenue mais menée dans un cadre « marginal ». Cela signifie qu'elle a toujours sa raison d'être scientifique (c'est toujours de la géoscience) mais que contrairement au moment du projet FENIX, la démarche n'est plus appuyée par une stratégie d'entreprise. Seule la composante RESE (à laquelle je n'appartenais pas) a poursuivi ses activités car ce n'est pas une composante Recherche. Les projets qui s'y trouvent sont le résultat de commandes effectuées régulièrement soit par des industriels, soit par l'État, à des fins d'appui à leurs politiques. Quoi qu'il en soit, si l'activité de modélisation a été maintenue, il fallait néanmoins trouver de nouveaux terrains d'application c'est-à-dire de nouveaux projets.

C'est ainsi que j'ai emprunté un nouveau tronçon : la modélisation par ACE des filières granulats en France. À la différence de mon équipe d'accueil RESE initiale, les collègues qui m'accueillaient dans ce nouveau projet n'étaient pas forcément convaincus par l'ACE. En revanche, ils ne voyaient aucun inconvénient à ce que ce travail avance même si ce n'était pas le cœur d'activité de la nouvelle équipe. À mon arrivée, cette équipe travaillait sur un projet de recherche appelé « SIG Ressources France » (SIG-RF). SIG-RF voulait contribuer à intégrer les différents types de données géo-référencées générées au sein du BRGM (issues de la géologie, de la géologie, de la géochimie...) ou de ses filiales et concernant l'ensemble du territoire national. Comme mon collègue socio-économiste était encore présent au BRGM, nous avons décidé de poursuivre le développement de la méthodologie socio-économique. Plus concrètement, nous avons suggéré l'élargissement du champ d'investigation du projet SIG-RF aux disciplines socio-économiques appliquées aux filières granulats en France. L'idée en était de collecter et de traiter l'information économique et sociale liée à la filière pour ensuite la croiser avec des données plus classiques (géologiques et technico-économiques). Le résultat de ce croisement serait ensuite un terrain de recherche privilégié pour la définition d'indicateurs applicables à la gestion territoriale des activités extractives en France. Notre suggestion a été acceptée. Au niveau opérationnel, le travail a été mené dans un projet cible appelé Mod-Flux (2006-2010), du projet cadre SIG-RF.

Pour résumer, j'ai pu poursuivre le chemin méthodologique commencé dans FENIX mais sur un autre tronçon et avec une visibilité plus réduite en raison de la disparition progressive de RESE.

II.3.2.2 Travaux scientifiques

La problématique de cette filière dont j'ai contribué à l'étude par la modélisation ACE concernait la fermeture progressive, souhaitée par l'État, des carrières d'alluvionnaires, pour des raisons

environnementales. Cette fermeture rallongeait le transport des granulats et donc augmentait l'impact CO₂ également. En effet, comme le coût du transport double tous les 30 kms (Rodriguez-Chavez, 2010), les producteurs recherchent généralement les gisements les plus proches des zones de consommation. Par conséquent, si, au fil du temps, une exploitation venait à fermer, les nouveaux gisements trouvés seront forcément de plus en plus éloignés de la zone de consommation. Par rapport à la modélisation ACE, la question posée était donc la suivante : *où la consommation locale trouverait-elle de nouvelles carrières en cas de fermeture de carrières alluvionnaires existantes, en sachant les contraintes de coût de transport ? Le terrain d'études se situait dans le secteur d'Anneville-Ambourville (Seine Maritime), dans une zone d'environ 30 x 30 km.*

En parallèle au travail consistant à répondre à la question, c'est aussi durant le projet Mod-Flux que je pouvais commencer à mettre en œuvre la démarche de couplage SMA/SIG (non possible dans FENIX) grâce à l'existence des données SIG au format vectoriel pour cette application.

C'est à l'issue du projet SIG-RF/Mod-Flux que le collègue géographe-socioéconomique a quitté le BRGM, rendant le développement de la méthodologie socio-économique – la seule qui restait de RESE – encore plus réduite. Néanmoins, j'ai pu en parallèle m'insérer dans un second projet, toujours sur les granulats. Il s'agissait du projet ANR ANTAG (2007 – 2010).

Le projet ANTAG a été le premier projet collaboratif auquel j'ai participé. Ma participation à ce projet était sans aucun doute due aux compétences que j'avais acquises dans Mod-Flux en termes de modélisation de marché des granulats. L'équipe BRGM était composée de 2 géologues, spécialistes des matériaux et des carrières. Piloté par le partenaire ARMINES, le projet avait pour but de répondre à la question suivante :

quelles seraient, à l'échelle de la France et sur les 30 prochaines années (2005-2035), les conséquences de la fin du renouvellement des réserves autorisées actuelles (2006) des granulats, sur les aspects environnementaux, marché et société, et appareil de production et de transport ? À la différence de Mod-Flux, l'approche ANTAG était macro-économique. Il n'était ainsi pas question, dans le modèle, de représenter la localisation des sites de production et des points de consommation. Le choix d'ANTAG portait plutôt sur les grands bassins hydrographiques de France. De plus, le projet s'appuyait sur un modèle numérique utilisant, non pas l'ACE, mais la technique des systèmes dynamiques, déjà appliquée par ARMINES dans des domaines connexes (charbon, pétrole). Comme il n'était pas question d'utiliser l'ACE, ma contribution était alors d'alimenter les réflexions sur le développement du modèle en mobilisant une compétence générale en modélisation.

En parallèle à ANTAG, j'ai emprunté un autre tronçon : le charbon (débuté en 2009). Ce tronçon sera raconté dans la section II.3.3 débutant en page 52. J'ai aussi emprunté le tronçon des métaux stratégiques (débuté 2011). Ce tronçon sera raconté dans la section II.3.4 débutant en page 53.

Pour en revenir aux granulats, le second travail auquel j'ai contribué était le projet ANR AGREGA, et cette fois-ci, à la fois en tant que modélisateur et coordonnateur. L'ANR AGREGA visait une valorisation commune de deux projets ANR qui le précédaient : ANTAG (déjà expliqué ci-dessus) et ASURET (Analyse de flux de matière du secteur de la construction à l'échelle de l'ouvrage et du territoire). ASURET voulait apporter, pour les filières matériaux, l'ACV (analyse de cycle de vie), une méthodologie pour évaluer les impacts environnementaux dus aux pollutions et un mode de définition des caractéristiques et du comportement des zones de consommation qui, en plus d'être des consommateurs, sont des gisements secondaires potentiels. AGREGA m'a donc introduit dans le concept d'économie circulaire des matériaux (cf. plus d'informations sur l'économie circulaire dans la section I.4.2 en page 28). Ce projet a été mené dans le cadre de l'élaboration à la fois du SRC (Schéma Régional des Carrières) et du PRPGD (Plan Régional de Prévention et de Gestion des Déchets PRPGD). L'échelle passait donc de

national (ANTAG) à régional (AGREGA). Les questions posées par ce projet étaient les suivantes : (a) en Île-de-France, où positionner les futures carrières ? (b) en région PACA, et en se basant sur la localisation des sites de production de granulats recyclés et d'enrobés, quelle serait, pour 2015, la répartition géographique possible, par municipalité, et par département, du taux de rénovation de route ?

J'ai travaillé sur la deuxième question en tant que modélisateur ACE. Par rapport à la première question, ma participation était focalisée sur la préparation des données ; le modèle en lui-même (basé sur de l'optimisation mathématique et non de l'ACE) a été développé par d'autres partenaires du même projet (Schleifer et al., 2019). L'ACV issue d'ASURET a aussi été transposé prioritairement dans le premier modèle par un collègue ayant travaillé sur ce précédent projet. Il s'agissait notamment d'utiliser des coefficients pour mesurer les impacts de la production et du transport de granulats sur le changement climatique, sur la toxicité humaine, etc.

☞ Des extraits de résultats de simulation sur ce tronçon se trouvent en [Annexe I](#), section [filière « granulats et économie circulaire »](#), page 133.

II.3.2.3 Pourquoi l'ACE pour ce tronçon ?

☞ Cette question ne s'applique évidemment pas au projet ANTAG dont la méthode scientifique n'est pas l'ACE

Pour l'application SIG-RF/Mod-Flux portant sur la Boucle de la Seine, mon utilisation de l'ACE s'est justifiée par une des forces de l'approche agent : pouvoir représenter les acteurs et leur environnement d'une manière très complexe, ce qu'il est difficile de faire dans les systèmes dynamiques à base d'équations différentielles, par exemple. C'est cette représentation de l'environnement dont l'application Mod-Flux avait besoin pour répondre à la question posée. En parallèle, il y avait la démarche sous-jacente d'implémenter une plateforme de simulation supportant les données SIG du BRGM.

Pour le projet ANR AGRÉGA, mon utilisation de l'ACE dans la modélisation a aussi été totalement justifiée. En effet, le modèle d'ANTAG, son prédécesseur, était trop « macro » alors que les SRC et les PRPGD se préparaient et se décidaient à l'échelle régionale. Plus loin encore, la décision de mobilisation de certains matériaux se faisait même à un niveau plus local que la région (Augiseau, 2017). Ces décisions plus affinées ne peuvent donc être ignorées dans la planification. En sens inverse, juxtaposer des solutions censées fonctionner localement n'offre pas une garantie pour régler les problèmes régionaux, tant les interactions entre territoires sont importantes. Nous sommes donc dans un environnement *multi-niveaux*. En plus de ces raisons susmentionnées, le prix de certains déchets semblait davantage dépendre de la situation et du contexte local tel l'accessibilité des filières, la concurrence, le contrat historique avec l'exploitant, etc. (ADEME, 2012) que d'un prix imposé globalement par une entité régionale. Nous sommes donc dans un environnement *multi-acteurs* également où des acteurs en compétition négocient, etc. Ces deux critères montrent l'existence de la complexité du réel, justifiant l'utilisation de l'ACE (cf. la section I.3 en page 25).

Précisons cependant que dans les filières granulats, beaucoup de grands groupes industriels possèdent différents sites (carrières, centres de recyclage) en même temps. Aussi, il arrive que pour répondre au besoin de plusieurs clients en même temps, la Direction du groupe reconsidère la répartition des productions entre les sites de manière à optimiser l'approvisionnement de ces clients. Dans ces cas, le choix d'un modèle, non pas ACE, mais d'optimisation globale (Schleifer et al., 2019; Gomez, 2019) à l'échelle du groupe uniquement, serait compréhensible car il s'agit, pour cette partie du système, d'une démarche centrale imposée et à des fins d'optimisation.

II.3.2.4 Point sur les acquis

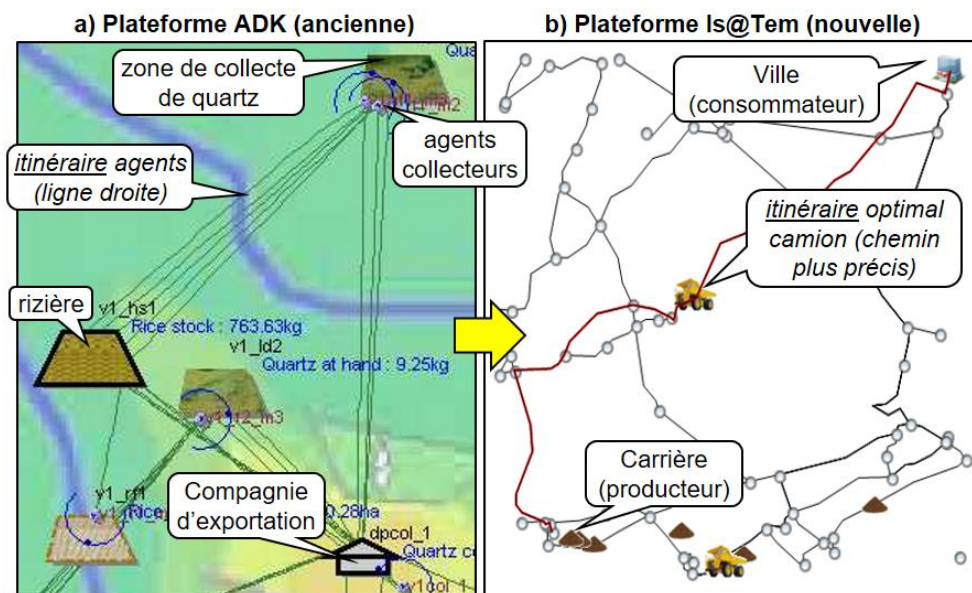
En termes de modélisation, ce tronçon « granulats et/ou leur économie circulaire » a été d'une véritable richesse pour mon parcours.

Le premier acquis issu de ce tronçon est qu'il m'a permis de découvrir, à travers de nouvelles filières, de nouvelles problématiques sur les ressources minérales, qui plus est, une problématique qui est allée jusqu'à l'économie circulaire. De plus, l'échelle n'est plus la même : nous passons ici de celle de l'individu dans FENIX (un artisan, un propriétaire de la mine, etc.) à celle d'une entreprise.

Le second acquis concerne la modélisation spatiale. Ce tronçon m'a permis de poursuivre, dans le volet « granulats », les réflexions méthodologiques initiées dans le volet « mine artisanale », tout en ayant intégré un élément méthodologique que n'avait pas le premier volet : les données SIG qui m'ont ainsi permis d'enrichir la partie « espace » de la trilogie ARE de la [Figure II.2 en page 45](#). Intégrer ces données SIG était important car autrement, il aurait été difficile de calculer par exemple le revenu d'un transporteur que de manière très approximative alors que le transport est un enjeu (coût doublant tous les 30 kms) pour les granulats. C'est ainsi qu'en termes de plateforme de simulation, je suis passé d'ADK, acquise à l'issue de ma thèse (cf. l'histoire dans la section [II.2.1 en page 41](#)) à une plateforme ACE – que j'ai développée au BRGM cette fois – appelée Is@Tem ([Andriamasinoro et al., 2010](#)), fonctionnellement couplée avec un SIG.

☞ Jusqu'à ce jour, tous les modèles ACE que j'ai développés à partir de ce tronçon du parcours sont simulés sur cette nouvelle plateforme BRGM.

Figure II.3 : Changement de la plateforme de simulation : d'ADK vers Is@Tem



Source : ([Andriamasinoro et al., 2010](#)).

La [Figure II.3 ci-dessus](#) illustre l'intérêt méthodologique de ce changement de plateforme de simulation d'ADK sans SIG (ici, application filière quartz – déplacement ligne droite) à Is@Tem avec SIG (ici, application granulats – déplacement sur une route à longueur plus précise basée

sur des données SIG). Dans la seconde plateforme, le calcul du revenu du transporteur de minerais d'un point A à un point B est plus précis.

☞ Une vue plus complète de l'interface utilisateur de la plateforme Is@Tem se trouve en [Annexe I](#), section « [une vue de l'interface Is@Tem](#) », page 129.

Le troisième acquis de ce tronçon a été la capacité de faire face à la problématique des « Big Data ». En effet, la simulation des transports par Is@Tem dans le premier projet « granulats » SIG-RF/Mod-Flux (cf. [Figure II.3-b en page 51](#)) pouvait se faire dynamiquement car l'application couvrait seulement une zone de 1 000 km² et donc « quelques » données vectorielles à manipuler. Cependant, dans le projet AGREGA qui a suivi – il s'agissait de toute la région Île-de-France. Or, cette région couvre une étendue de 12 012 km² (soit 10 fois plus) possédant des millions de tronçons routiers et fluviaux à considérer (le transport de granulats est multimodal en Île-de-France). De plus, il y avait aussi les 1 024 communes d'Île-de-France à considérer, d'où le « Big Data ». La simulation du système dynamiquement n'était donc plus possible car très lente. La solution alternative a été de construire, en amont de la simulation, un tableau déjà calculé, qui contenait la distance optimale entre chaque paire de communes de toute la région (1 024 x 1 024 entrées pour les 1 024 communes d'Île-de-France). Ce tableau accélère la simulation mais en ralentit le chargement. Cette méthodologie a ensuite pu être transposée en région PACA (968 communes) pour répondre à la question de l'économie circulaire. Mes acquis sur ce point offrent donc aujourd'hui deux possibilités en termes de calcul de distance optimale de transport : dynamiquement en cours de simulation ou sous forme de données pré-calculées en amont de la simulation.

Le quatrième acquis a été la capacité de réaliser une modélisation par une autre approche que l'ACE : ici, les systèmes dynamiques.

Enfin, le dernier acquis a été, grâce à l'ANR AGREGA (un héritage de l'ANR ASURET), d'avoir une meilleure connaissance de ce qu'est l'ACV car le critère environnemental était une demande d'AGREGA pour évaluer la force et la faiblesse des scénarios qui y ont été étudiés. Si, pour la partie modélisation dans AGREGA, je n'ai fait que comprendre et m'approprier l'ACV, je l'ai en revanche utilisé par la suite, notamment en l'intégrant dans la structure des jeux de rôles (cf. section [II.4.3.2 en page 59](#) au moment de parler de l'itinéraire « recherche-action »).

Ce tronçon m'a aussi permis, outre la coordination d'AGREGA, d'encadrer deux étudiants :

- Sabrina MAKNI (discipline « Sciences Informatiques/Intelligence Artificielle ») qui, durant un stage de 6 mois, a développé un premier prototype de modèle de négociation d'agents sur le marché des granulats ;
- Vincent GOYHEX (discipline « Géographie ») qui, durant un stage de 6 mois, a développé le modèle de transport « Big Data » à l'échelle de la région Île-de-France.

Ce tronçon a produit :

- 1 chapitre d'ouvrage ([Andriamasinoro, 2013](#))
- 2 communications à des congrès ([Rodriguez Chavez et al., 2010](#)) et ([Andriamasinoro et al., 2010](#))

II.3.3 Le tronçon « charbon » (2009-2011)

II.3.3.1 Pourquoi l'emprunt de ce tronçon ?

La capacité de la plateforme Is@Tem à simuler les dynamiques spatiales (cf. [Figure II.3-b en page 51](#)) a sans doute fait qu'en parallèle avec mes travaux sur les granulats, j'ai été sollicité pour participer au projet européen FP7 Eo-miners (ENV. 2009.4.1.3.2). Ce projet Eo-miners avait pour objectif d'utiliser les connaissances et données existantes d'observation de la terre

pour surveiller l'exploration des ressources minérales et de la mine (charbon en particulier), et de fournir les informations permettant de gérer ses impacts sur l'environnement et sur la société. Le cas d'application choisi était une ville en Afrique du Sud appelée eMalahleni (le « lieu du charbon » en langue Nguni).

II.3.3.2 Travaux scientifiques

Mon travail consistait à piloter la partie 'simulation prospective' de ce projet. La question posée à la simulation était : *quel serait l'impact de l'activité minière (charbon) sur l'extension urbaine d'eMalahleni en 2025 ?*

L'extension devait ici tenir compte des contraintes géographiques comme les réseaux hydrogéologiques et les zones protégées.

☞ Des extraits de résultats de simulation sur ce tronçon se trouvent en [Annexe I](#), section [filière « charbon »](#), page [136](#).

II.3.3.3 Pourquoi l'ACE pour ce tronçon ?

Mon choix de l'ACE était justifié ici par le fait qu'en raison du manque de données (disponibles sur les années 2002 et 2010 uniquement), il était difficile de dégager une tendance homogène et linéaire claire de l'évolution des zones d'habitation suite aux activités minières. Aussi, le modèle a dû prendre en considération l'évolution propre de chaque zone d'habitation en se calant sur ces deux années, par l'introduction d'aléas. On était donc ici face à un système hétérogène, d'où l'ACE.

II.3.3.4 Point sur les acquis

Sur le plan thématique, ce tronçon m'a permis de découvrir pour la première fois la problématique des ressources minérales énergétiques (cf. [Figure I.5 en page 28](#)), en l'occurrence le charbon, et ses impacts sociétaux et environnementaux.

Sur le plan scientifique, le projet a surtout constitué un deuxième test sur les capacités de calcul de la plateforme Is@Tem pour simuler des dynamiques spatiales (ici, l'extension urbaine).

II.3.4 Le tronçon « métaux stratégiques » (2011-2019)

II.3.4.1 Pourquoi l'emprunt de ce tronçon ?

Depuis la création de l'unité EI2D (du service Ressources minérales) en 2000, les filières métaux stratégiques ont toujours fait l'objet d'étude permanente par l'équipe IE (cf. partie gauche de la [Figure II.2 en page 45](#)) du BRGM. Cette étude est une demande constante de l'État français et/ou des industriels dans le cadre d'appui à leurs activités. Les demandes portaient notamment sur la résolution de la problématique de la criticité de ces métaux c'est-à-dire leur niveau de disponibilité ([Graedel et al., 2012](#)) pour répondre aux besoins des filières en France ([Crit_BRGM, 2015](#)) et/ou dans l'UE ([EcCRM, 2017](#)), face à une hausse attendue de la demande en ces métaux. L'étude de ce type de marché se fait ainsi à l'échelle globale (domaine de la macro-économie).

Depuis mon arrivée au BRGM en 2003, et dans la mesure où l'utilisation de l'ACE se justifiait davantage à l'échelle des territoires (mine artisanale, granulats et économie circulaire), je ne me suis pas intéressé à l'idée d'utiliser l'ACE pour étudier la problématique de la criticité des métaux stratégiques à cette échelle globale. C'est en prenant connaissance en 2011, par hasard,

des articles de (Farmer and Foley, 2009) et de (Anon, 2010) concernant la non-anticipation de la crise financière de 2008 par les modèles macro-économiques classiques que j’ai décidé d’approfondir la question. Cela s’est fait notamment en étudiant l’état de l’art sur les méthodes d’estimation de la criticité d’un métal et de l’évolution prospective de cette criticité. La réflexion a abouti à la nécessité de mettre en place des travaux scientifiques de modélisation (que j’ai tous pilotés) utilisant l’ACE.

II.3.4.2 Travaux scientifiques

Ma première problématique portait sur la filière lithium (2011-2015). Dans ce marché, le gouvernement français se posait des questions sur les risques d’approvisionnement de la France en lithium (Daw and Labbé, 2012) malgré la disponibilité *a priori* des ressources géologiques et une assurance de la part des producteurs mondiaux comme le Chili de hausser leur capacité de production en cas d’augmentation de la demande. Mon travail se voulait être une contribution à l’élaboration d’outil d’appui aux politiques. La question posée était la suivante : *suite à une certitude de hausse de la demande, croisée à une incertitude de l’approvisionnement, dans combien de temps y aurait-il une rupture d’approvisionnement en lithium sur le marché mondial et dans les industries de consommation en France ?*

Un tel outil, opérationnel, est attendu par les industriels des véhicules du futur, quant au choix à faire vis-à-vis de leurs approvisionnements. Il est également attendu par le Comité des Métaux Stratégiques, mis en place par le gouvernement français (COMES, 2013), et composé à la fois des acteurs de gouvernance et des industriels de différentes filières. La connaissance de ces analyses permettrait à ce comité de prendre certaines orientations.

Ma seconde problématique (2016-) portait sur le cobalt. En effet, tout comme le lithium, la France ne dispose pas non plus de gisements de cobalt ni de contextes géologiques favorables à leur existence (Audion et al., 2014). Ainsi, pour satisfaire la demande croissante, l’approvisionnement se fait essentiellement par l’importation. Comme pour le lithium, mon travail se voulait donc être d’une contribution à l’élaboration d’un outil d’appui aux politiques. Les questions étaient les suivantes : *quels sont les déterminants de l’importation française en cobalt ? comment un changement prospectif de ces déterminants affecterait l’importation française en cobalt dans le futur ?*

☞ Des extraits de résultats de simulation sur ce tronçon se trouvent en [Annexe I](#), section [filière « métaux stratégiques »](#), page 136.

II.3.4.3 Pourquoi l’ACE pour ce tronçon ?

Une première raison a déjà été mentionnée plus haut : la crise financière de 2008, qui a fait prendre conscience à la discipline « Économie » de la nécessité de l’utilisation des méthodes à base d’agents au niveau macroéconomique également (Farmer and Foley, 2009; Anon, 2010). L’ACE serait alors capable de reproduire le processus du « généré localement puis amplifié » déjà introduit en page 47 lors de l’explication du phénomène de la ruée. En fait, ce processus s’est aussi manifesté durant la crise (effet papillon de subprimes locales sur le marché mondial) et pourrait donc très bien arriver aussi sur le marché des métaux. En réalité, les questions précédentes posées sur le lithium et le cobalt couvrent ensemble la sous-question suivante si on formule plus en détail : *un événement donné au niveau de la production d’une substance aurait-elle des effets sur l’importation française en cette substance ? Si oui, dans combien d’années après le déclenchement de l’événement local ?*

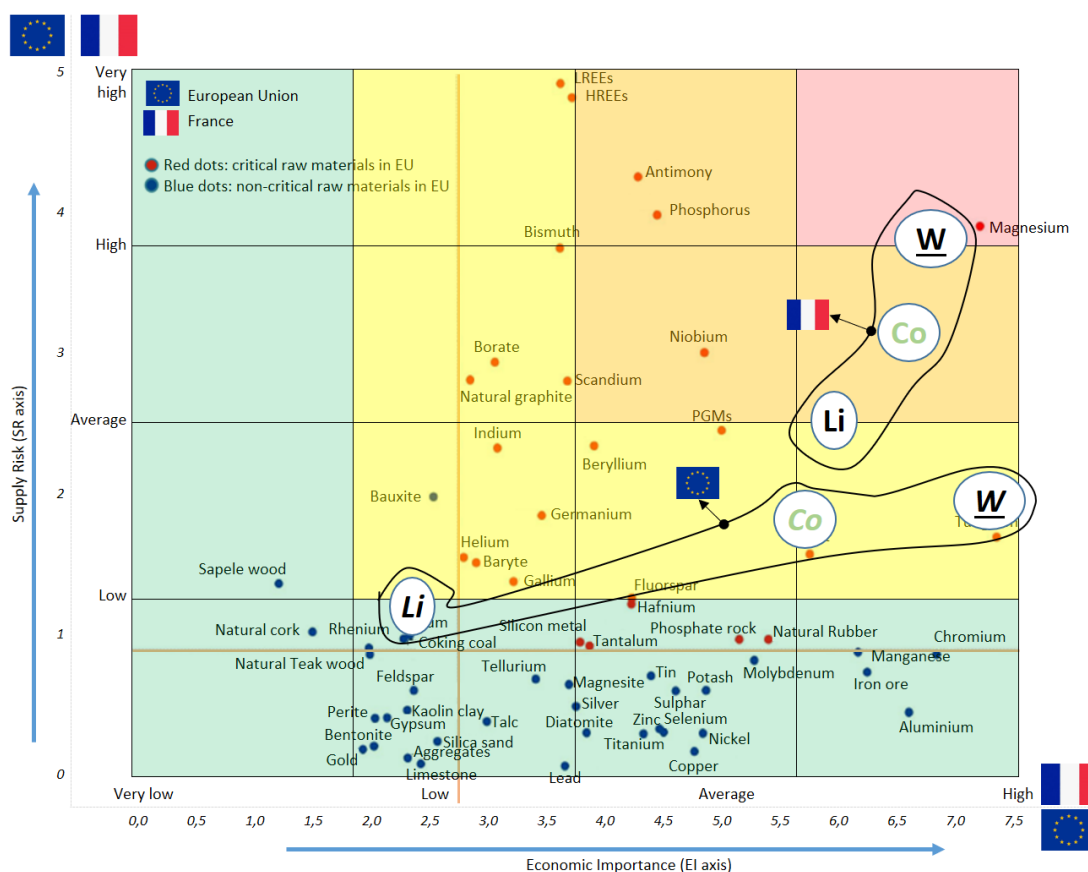
Cet événement au niveau de la production peut être généré par la nature ou par l’homme : tremblement de terres (Marshall et al., 2009), politiques de restriction à l’exportation (OECD_Restrict, 2010), grève de mineurs (Nassar et al., 2020) ou tout simplement l’ouverture d’une nouvelle mine ou la fermeture d’une mine en fin d’activité (TradeMap, 2018).

Une deuxième raison justifiant mon utilisation de l'ACE est que le marché des métaux n'est pas centralisé. Certes, des informations centralisées existent, comme le prix des métaux au LME ou London Metal Exchange ([LME, n.d.](#)). Mais les facteurs déterminant ce prix sont souvent la politique des pays et leurs interactions.

Plus généralement, le choix de l'ACE a été fait dans un objectif de réduire les nombreuses limitations mentionnées par l'état de l'art sur la criticité des métaux, et résumées par ([Speirs et al., 2013](#)) : (a) un mode de calcul à un niveau très agrégé alors que la criticité devrait être différenciée selon les pays voire selon les entreprises, (b) une absence de prise en compte de la dynamique temporelle et (c) une non considération des fluctuations du marché, entre autres à court terme ([Panousi et al., 2015](#)).

Pour éclairer le point (a), la [Figure II.4 ci-dessous](#) montre la différence de criticité de 3 mêmes métaux (lithium, cobalt, tungstène), selon qu'il est calculé au niveau européen ou au niveau de la France.

Figure II.4 : Superposition visuelle de la criticité de 3 substances (lithium, cobalt et tungstène) selon la France et selon l'Europe : la valeur n'est pas la même sur les deux échelles.



Source : (Andriamasinoro and Danino-Perraud, 2019).

La figure ci-dessus montre qu'un modèle de criticité européen n'est pas représentatif pour déterminer la criticité en France. Une des raisons en est qu'en réalité, un État européen avec une industrie plus développée va ressentir beaucoup plus la criticité (exemple de l'Allemagne en

opposition à la France). Cette hétérogénéité ne peut être traitée à l'échelle uniquement de l'UE, d'où la nécessité de mise en place d'un modèle multi-échelle par l'ACE.

II.3.4.4 Point sur les acquis

En premier lieu, ce tronçon contenait un exercice qui était une première en ce qui concerne mon utilisation de l'ACE à un niveau macroéconomique du marché des métaux et où le facteur espace a été occulté (pour l'instant). Ma grande question portait sur les données. En effet, les données à ce niveau n'étaient pas préparées pour l'ACE. Néanmoins, concernant le flux uniquement, des sources de données structurées comme (TradeMap, 2018) étaient a priori exploitables. La différence entre TradeMap et d'autres sources comme Eurostat (EUROSTAT, 2014), utilisées souvent par les experts, est que cette dernière contient des données à l'échelle de l'année alors que TradeMap contient des données à l'échelle du mois. Si TradeMap est donc utile pour un exercice ACE, les experts utilisent plus Eurostat car ils sont dans le paradigme 1 (cf. Figure I.4 en page 26). Si les données sur les flux ont donc existé pour un exercice ACE, les données sur d'autres paramètres de la criticité comme l'indice de gouvernance des pays producteurs (Kaufmann et al., 2011) se sont en revanche avérées plus difficiles à exploiter car non seulement, elles sont à l'échelle de l'année, mais en plus ne sont pas structurées comme TradeMap. Le modèle ACE actuel permet d'intégrer et de structurer les types de données sur le flux avec des pas de temps plus petits (le mois) que ceux traités par les experts. En revanche, il n'a pour l'instant pas traité les données non structurées.

En second lieu, j'ai pu, dans ce tronçon, réaliser une expérimentation méthodologique que je considère comme prometteuse : le couplage entre l'ACE et le « Machine-Learning » ou ML (cf. la Figure I.1 en page 22 pour expliquer le lien entre les deux). Plus particulièrement trois modèles de ML ont été testés : l'arbre de décision, les forêts aléatoires (Breiman, 2001) et, comme comportement test, la régression linéaire, la différence entre les trois étant leur positionnement dans les axes « niveau d'explicabilité » vs. « niveau de complexité » (Datta et al., 2016; DataAnalytics, 2018). En fait, mon premier modèle ACE (le lithium) visait avant tout à tester la faisabilité de la démarche : mettre en place des agents (des pays) et évaluer leur interaction, plus que les règles de décision à l'intérieur d'un pays. Aussi, pour le cobalt, mes priorités ont été inversées : se focaliser sur un pays d'abord – la France – avant de se focaliser sur l'aspect ACE (c'est-à-dire en intégrant les interactions entre agents). En particulier, il s'agit de définir, dans un modèle de ce pays, les règles de décisions complexes qui régissent le lien entre les variables d'entrée (temps, quantité, prix, pays d'origine) et de sortie (l'importation), d'où ce couplage. Par ailleurs, j'ai aussi appris dans ce tronçon que si le monde des géosciences n'accepte pas encore l'ACE, il connaît et utilise en revanche bien les ML (Caté et al., 2017). Voilà probablement une porte d'entrée potentielle pour rapprocher l'ACE du monde des géosciences.

En troisième lieu, ce tronçon m'a permis de tester et de renforcer la robustesse de la plateforme Is@Tem qui, à présent, supporte aussi une simulation à l'échelle macroéconomique.

Ce tronçon sur la criticité des métaux stratégiques m'a aussi permis d'encadrer plusieurs étudiants en Master issus de différentes disciplines, mais avec un point commun de contribuer au développement des modèles (lithium et cobalt) :

- Jérémie BERNARD, 6 mois (Discipline : Mathématiques et Informatique / Statistiques, Signal, Santé) ;
- Jean-Dominique MERCURY, 2,5 mois (Discipline : Économétrie et Statistiques Appliquées) ;
- Guillaume GRIES, 2,5 mois (Discipline : Économétrie et Statistiques Appliquées)
- Flavien HEUGUET, 4 mois (Discipline : Informatique) ;
- Haby AHNE, 4 mois (Discipline : Économétrie et Statistiques Appliquées).

Enfin, ce tronçon m'a permis d'encadrer le postdoc en sciences économiques d'Aurélié GAUDIEUX (1 an et 4 mois).

Ce tronçon a produit :

- 2 publications dans des revues scientifiques ([Andriamasinoro and Ahne, 2013](#)) et ([Andriamasinoro and Danino-Perraud, 2019](#)) ;
- 2 communications à des congrès ([Andriamasinoro and Martel-Jantin, 2013](#)) et ([Andriamasinoro and Levorato, 2014](#)).

II.4 Parcours itinéraire 2 : de la modélisation ACE à la recherche-action

II.4.1 Préambule : évolution de l'itinéraire 1 vers l'itinéraire 2

Pour s'assurer de la valeur ajoutée effective d'un travail de modélisation scientifique, il fallait aussi que je m'intéresse aux conditions de son appropriation par la société. Et cette démarche devient nécessairement un composant à part entière des programmes de recherche. La nouveauté à porter dans ce deuxième itinéraire n'est plus de produire de nouvelles connaissances mais de savoir construire le dialogue et la collaboration pour cette appropriation, dans un processus interactif. De par sa nature même, cette deuxième dimension a, contrairement à un travail de modélisation, un caractère de recherche-action, par exemple la démarche d'appropriation de l'ACE par les collègues internes au BRGM, ou un caractère de recherche-action participative comme l'accompagnement d'acteurs de territoires dans un processus collectif de décision (cf. définition de ces concepts dans la section [I.2 en page 22](#)). En faisant un parallèle avec le domaine de l'innovation évoqué dans ([Benoit-Cervantes, 2012](#)), il s'agit de faire une hybridation du « techno-push » (ici, l'itinéraire 1 : évaluation de la qualité des connaissances produites du point de vue scientifique sans attendre forcément une demande clairement exprimée) avec le « market-pull » (ici, l'itinéraire 2 : évaluation de la pertinence de ces connaissances par rapport à la demande sociétale).

Précisons que ce n'est pas parce que j'ai évolué vers l'itinéraire 2 que j'ai définitivement oublié l'itinéraire 1 de « simple » production de connaissances scientifiques et ce, pour au moins les raisons développées ci-après.

La première raison de garder l'itinéraire 1 est qu'il y a toujours la phase où un projet n'est pas encore suffisamment mature pour intéresser la société. En attendant, continuer à le valoriser par une publication scientifique est logique. D'ailleurs, ces publications intermédiaires peuvent ensuite être utilisées comme arguments pour obtenir des financements plus conséquents pour pouvoir se rapprocher de la société. Le mode de fonctionnement linéaire (mûrir un modèle d'abord avant d'aller vers la société) a surtout été un raisonnement scientifique valable pour l'époque (2003). Depuis, il y a des méthodologies comme COMMOD ([Collectif _Commod, 2005](#)) ou TRACE ([Grimm and Schmolke, 2011](#)) qui permettent d'associer les parties prenantes à la construction d'un modèle dès le début du projet. Toutefois, comme dans toute recherche-action participative, la mise en œuvre d'un projet de ce type peut dépendre (a) du temps disponible des différentes parties prenantes à s'impliquer et (b) du budget du projet (des associations, souvent intéressées pour être des parties prenantes, n'ont par exemple généralement pas les moyens pour se déplacer).

La deuxième raison de garder l'itinéraire 1 (plus liée à mon parcours) est que la démarche de recherche-action avance « moins vite » dans le tronçon « métaux stratégiques » (échelle internationale) que dans celui des autres tronçons (échelle d'un territoire). La notion de territorialité y est en partie pour quelque chose : pour le second cas, il y a plus de « facilité » à mobiliser des acteurs que dans un contexte international. Néanmoins, il est aussi possible de réaliser de la recherche-action participative au sein d'un même comité comme le COMES

(introduit en page 54) pour par exemple discuter de nouveaux scénarios d’approvisionnement de la France en connaissance du contexte international (cette idée pourrait être soumise aux experts du BRGM).

La troisième raison de garder l’itinéraire 1 est que les 2 itinéraires peuvent en réalité être liés d’une manière itérative. Il suffit pour cela de voir l’exemple de la Figure I.3 en page 25 décrivant les liens entre jeux de rôles et modèles de simulation ACE.

Dans ce manuscrit, le récit de cet itinéraire 2 est fortement similaire à celui de l’itinéraire 1 : raconter différents tronçons avec, à chaque fois, un point sur les acquis. La liste et l’ordre peuvent cependant être légèrement différents de ceux de l’itinéraire 1 car les événements déclencheurs sont parfois différents. Le tronçon « mine artisanale » par exemple est divisé en deux périodes (débutant en 2003 et en 2020 respectivement) avec des caractéristiques de recherche-action différentes. Par ailleurs, contrairement à l’itinéraire 1, deux tronçons sont ajoutés ici : la géothermie et l’après-mine (ceux que j’ai appelé en page 34 les tronçons « hors-sujet »).

☞ Les activités dans ce second itinéraire, et pour une problématique donnée d’une filière ressources minérales, ont été menées dans un objectif de captage de comportements, d’apprentissage social et de coconstruction de scénarios prospectifs de gestion d’une filière.

II.4.2 Le tronçon « mine artisanale » (2003-2005)

II.4.2.1 Pourquoi l’emprunt de ce tronçon ?

Ce tronçon correspondait à mon arrivée au BRGM. La recherche-action, même si ce n’était pas la part dominante attendue de mes activités, faisait ici référence à la démarche de faire accepter le modèle ACE sur la mine artisanale (une démarche pionnière à l’époque, pour rappel), par au moins déjà les collègues BRGM de l’équipe RESE (acteurs à droite dans la Figure II.2 en page 45). Or, pour qu’un modèle soit accepté, il faut qu’il soit exprimé dans un langage compris par tous. Ce langage, les modèles statistiques et les modèles mathématiques l’ont, ce qui n’est pas le cas des « Agent-Based Model » ou ABM (Railsback and Grimm, 2019). Se posaient donc pour moi les questions de la construction, de la validation et de la compréhension d’un modèle ACE par et pour des modélisateurs BRGM habitués à des modèles mathématiques implémentés sous Excel® ou sous MatLab®. Conjointement à ces premières questions, se posait aussi celle du temps d’attente utilisateurs avant d’avoir des résultats, l’ACE demandant une ressource informatique importante (surtout vu la faible puissance des ordinateurs de l’époque).

En somme, l’emprunt de ce tronçon a été motivé par au moins deux situations : (a) la non-acceptation de l’ACE par la communauté BRGM (sauf par mon unité d’accueil EI2D), à mon arrivée (cf. l’histoire dans la section II.2.2 en page 42) et (b) la quasi-inexistence, pour la composante RESE, de la méthodologie socioéconomique (cas déjà évoqué dans la section II.3.1.4 en page 47).

Une anecdote a aussi motivé cet emprunt. Il y a quelques années, un représentant du ministère d’un pays africain a rendu visite à l’unité EI2D. C’était l’occasion pour moi de lui présenter mon travail sur la modélisation de la filière or au Burkina Faso (cf. section II.3.1.2 en page 46). À la fin de la présentation, sa remarque a été que l’outil présenté était adéquat pour une publication scientifique mais il ne voit pas en quoi il lui serait utile pour une quelconque aide à la décision.

II.4.2.2 Point sur les acquis

Pour ce tronçon visant à faire accepter, par les collègues BRGM le modèle ACE développé, les réflexions concernant la recherche-action étaient plutôt théoriques. Néanmoins, elles faisaient

leur chemin avec un processus méthodologique considéré comme novateur à une époque dominée par les démarches issues classiquement d'autres disciplines (géologie, gîtologie ...). En parallèle à ces réflexions, les publications scientifiques de l'itinéraire 1 continuaient à se construire car elles gardaient un intérêt éveillé par rapport à ce processus ACE, un intérêt temporaire cependant (malgré des publications, un résultat sera toujours attendu par la société à un moment donné).

II.4.3 Le tronçon « granulats et/ou économie circulaire » (2013-2018)

II.4.3.1 Pourquoi l'emprunt de ce tronçon ?

Le projet SIG-RF/Mod-Flux réalisé dans la boucle d'Anneville-Ambourville (introduit dans la section II.3.2 en page 48) a été l'occasion de poursuivre les réflexions pour savoir si avoir un modèle ACE spatialisé incluant des données SIG connues du BRGM pourrait augmenter l'acceptation de celui-ci par le BRGM. Cette réflexion m'a conduit à l'introduction de ces données dans une plateforme de simulation agent (voir aussi Figure II.3 en page 51). Contrairement au travail « mine artisanale », les données étaient cette fois-ci disponibles : produites par le BRGM pour la partie carrière et gisement, et produites par l'Institut National de l'Information Géographique et forestière (IGN) pour la partie administrative (commune et routes).

Cependant, en raison de différentes contraintes (majoritairement de temps et de budget), une démonstration devant les collègues BRGM n'a pu être faite et donc pas de retour d'expériences ACE sur cette action. Les résultats portaient plus sur les publications. En revanche, les résultats visuels des simulations réalisées (déplacement de camions transporteurs de granulats, etc.) m'ont permis d'avancer dans mes réflexions, notamment dans la mise en place progressive de jeux sérieux (concept introduit dans la section I.2.2 en page 23) qui pouvaient être un moyen de faire accepter un modèle par une communauté d'acteurs de territoire potentiels. Cette idée, j'ai pu la proposer et coordonner dans le projet ANR AGREGA. En parallèle, les jeux de rôles étaient pour moi une porte d'entrée pour connaître progressivement le monde de l'économie comportementale (cf. Figure I.3 en page 25) qui m'a permis de comprendre la situation selon laquelle des facteurs complexes autres qu'économiques (ex. vécu, situation psychologique, ...) peuvent aussi influencer des décisions économiques, un argument de plus pour mettre en place le paradigme 2 (cf. Figure I.4 en page 26).

☞ C'est durant le projet AGREGA (2013-2018) que l'itinéraire 2 (recherche-action participative) de mon parcours a commencé à prendre une place prépondérante.

Comme il a été introduit en page 49, l'ANR AGREGA a été la suite de l'ANR ANTAG, coordonné par ARMINES. Le retour d'expériences d'ANTAG, en plus de celui de Mod-Flux, a été un facteur important dans ma réflexion sur la nécessité de mettre en place la recherche-action participative. ANTAG a été une démarche très techno-push (Benoit-Cervantes, 2012) pilotée selon le paradigme 1 de la Figure I.4 en page 26. D'abord, le projet a imposé que l'échelle d'étude était l'échelle nationale (France) alors que les décisions sur l'ouverture des carrières sont prises à l'échelle régionale. Ensuite, les acteurs du terrain ont été approchés uniquement une fois le modèle dans une phase de développement relativement avancée. Pour toutes ces raisons, les acteurs du terrain ne se retrouvaient pas dans le modèle d'ANTAG, vu comme une boîte noire.

II.4.3.2 Travaux scientifiques

À partir de cette situation d'ANTAG, j'ai voulu, en tant que coordonnateur d'AGREGA, mettre en place la démarche de recherche-action où il s'agissait d'être à l'écoute des parties prenantes,

le plus tôt possible. Tout d'abord, il s'agissait de changer d'échelle : passer d'une échelle nationale et à niveau unique, à une échelle régionale et multi-niveau (considération des départements, communes, etc.). On aboutissait donc au choix d'une modélisation par ACE (cf. les détails de la justification dans la section [II.3.2.3 en page 50](#)). Ensuite, il a aussi été convenu que les parties prenantes (les acteurs impliqués directement ou non dans la problématique d'approvisionnement en granulats), chargées de s'approprier le modèle ACE, seraient consultées dès le début du projet. Pour remédier à l'aspect boîte noire (et donc coconstruire des règles du modèle avec les acteurs, en plus de l'explicitation de celles issues de la littérature), je pensais au « serious-game » sous forme de jeu de rôles avec ces parties prenantes comme joueurs. L'idée première en était d'alimenter la simulation en demandant aux participants d'exprimer des phrases logiques narrant le comportement et les contraintes associées. Enfin, pour le rendre plus intéressant, le jeu de rôles devait aussi intégrer l'analyse de cycle de vie (ACV) appliquée à l'économie circulaire des granulats, mise en œuvre dans un premier temps dans le modèle de simulation Ile-de-France du projet AGREGA (cf. détails en page [50](#)).

Cette idée de jeux de rôles pour AGREGA m'était venue à l'issue de la lecture d'un article de l'équipe de Patrick d'Aquino sur un de ses travaux concernant les conflits d'usage au Sénégal ([d'Aquino et al., 2002](#)). Dans cet article, l'équipe mettait l'intelligence collective avant l'expertise d'où ensuite, elle faisait émerger un jeu sérieux. Le jeu sérieux proposé dans AGREGA se voulait être construit selon la même approche. Pour accompagner la mise en œuvre de l'interface graphique et pour les conseils divers aux jeux, j'ai invité, dans le consortium, une entreprise fabricant de jeux vidéo.

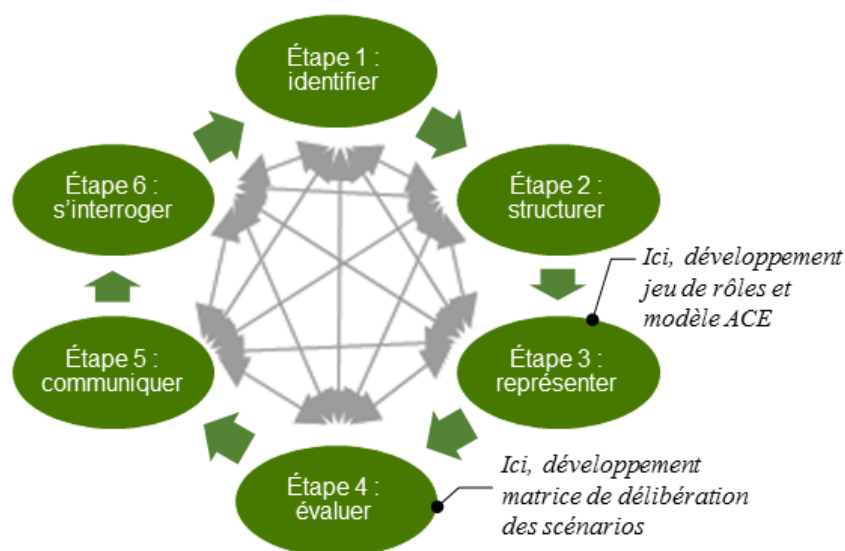
Par ailleurs, comme j'étais également, depuis mon arrivée au BRGM, dans une démarche scientifique de construction globale de méthodologie socioéconomique pour les ressources minérales, le modèle ACE dans AGREGA devait non seulement être construit avec les parties prenantes mais aussi pouvoir être évalué par elles dans un cadre multi-acteurs et multicritères, sachant qu'il n'y a aucune obligation à ce que les porteurs de connaissances (ceux qui ont contribué à la construction) soient forcément les mêmes que les évaluateurs de connaissances. C'est dans cet ensemble d'actions que j'ai fait la connaissance de la méta-méthodologie INTEGRAAL ([O'Connor and Da Cunha, 2011](#)). INTEGRAAL est une démarche qui, à travers 6 étapes principales – dont la réalisation n'est pas forcément linéaire – vise à engager experts et parties prenantes dans un processus d'évaluation intégrée (cf. la [Figure II.5 en page 61](#)).

Les différentes étapes d'INTEGRAAL sont :

1. identification des terrains, des objectifs et des scénarios qui peuvent satisfaire simultanément des critères de faisabilité technique, de rentabilité économique, de qualité environnementale et d'acceptabilité sociétale ;
2. structuration du problème de « choix social », en termes d'acteurs (les parties prenantes), de catégories d'enjeux de performance et d'options d'action (scénarios). Cette étape repose à la fois sur une étude approfondie du terrain (dont des entretiens) et sur de la littérature sur le sujet ;
3. mobilisation des outils pour la représentation de la situation. C'est dans cette étape que seraient ajoutés les outils de jeux de rôles et de simulation ACE ;
4. mobilisation des acteurs de l'étape 2 (voire plus si nécessaire) pour une évaluation multicritère des scénarios dans un cadre délibératif et à partir d'une gamme plus ou moins large d'indicateurs obtenus dans les étapes précédentes ;
5. communication des résultats de l'étude aux participants mais aussi au public de façon plus large. On passe ici de la recherche au processus de décision ;
6. retours sur expériences sur le déroulement de la démarche d'évaluation.

Dans INTEGRAAL, la délibération sur les différents scénarios (étape 4) s'appuie sur une matrice de délibération (Frame and O'Connor, 2011), un outil en ligne d'évaluation multi-acteurs et multicritères.

Figure II.5 : La méta-méthodologie INTEGRAAL d'évaluation multi-acteurs et multicritères d'un problème d'un territoire, déclinée dans le projet ANR AGREGA.



Source : schéma originel (sans les commentaires) : tiré de (O'Connor and Da Cunha, 2011).

☞ Une explication et un exemple d'utilisation plus détaillés de la matrice de délibération se trouvent en [Annexe II](#), section « [matrice de délibération](#) », page 139.

En réalité, cette matrice de délibération a déjà été utilisée par l'équipe RESE lors du projet FENIX afin d'élaborer des indicateurs pour des mines au Niger (Chamaret et al., 2007). À l'époque, je n'étais pas intervenu sur cette partie du travail global de l'équipe (cf. le côté RESE de la [Figure II.2 en page 45](#)). L'histoire a voulu que quelques années plus tard, AGREGA a retrouvé le même outil et cette fois-ci, dans un projet où j'intervenais. Mon rôle était notamment de contribuer à la construction et à l'alimentation de la matrice de délibération par les résultats des évaluations de scénarios prospectifs par les acteurs.

Pour résumer les travaux scientifiques de recherche-action, et si l'on se réfère à la [Figure I.4 en page 26](#) sur les paradigmes, le passage d'ANTAG vers AGREGA se traduisait par le passage d'un système avec le paradigme 1 uniquement, à un système avec les paradigmes 2 et 3 appuyés par le paradigme 1. Pour pouvoir valoriser cette nouvelle approche de recherche-action participative, AGREGA a intégré une tâche explicite d'appropriation des résultats par les acteurs, ce que n'avait pas ANTAG.

II.4.3.3 Point sur les acquis

Ce tronçon « granulats et économie circulaire » a été d'une richesse importante pour mon parcours en termes de renforcement de ma capacité en recherche-action participative. Cette richesse est résumée ci-après.

En premier lieu, grâce à l'arrivée de la méthodologie INTEGRAAL, en tout cas de la version déclinée dans AGREGA, j'ai ouvert ma connaissance à la recherche-action participative au-delà de la seule modélisation. En effet, je suis passé d'1 seul outil à mobiliser – un outil de simulation

ACE d'une filière – à désormais 3 outils : (a) un outil de jeux de rôles permettant de comprendre le fonctionnement d'une filière le long de la chaîne des valeurs, (b) un outil ACE, utilisé pour la simulation prospective et (c) une matrice qui évalue des scénarios d'acceptabilité. Tout ceci en sachant que les acteurs sont sans doute aussi, de leur côté, en possession d'autres outils, potentiellement utilisables dans INTEGRAAL. Néanmoins, le projet AGREGA n'a pas eu le temps d'expérimenter l'utilisation de tous ces outils de manière coordonnée.

En second lieu, grâce aux différentes animations de sessions de jeux de rôles que j'ai pu effectuer durant AGREGA, avec les experts du BRGM, avec les professionnels des filières granulats, bétons et ciments, avec les acteurs de terrain et avec les étudiants (cf. extrait de photos dans la [Figure II.6 ci-dessous](#)), j'ai pu largement mûrir mon apprentissage d'accompagnement de processus collectifs de décision. J'ai notamment pu constater différents niveaux d'exigence selon le type d'acteurs impliqués. Entre autres exemples, je pourrais citer la différence de niveau d'exigence entre mes collègues internes ou les étudiants (plus « tolérants ») et la profession (plus « exigeante »).

Figure II.6 : Extrait d'animation de sessions de jeux de rôles sur les granulats et leur économie circulaire (a) avec les professionnels et (b) avec des étudiants.



En troisième lieu, j'ai aussi intégré la notion de simulation participative (cf. la section [I.2.3 en page 24](#)). En effet, l'outil de jeu de rôles d'AGREGA est actuellement accompagné d'un calculateur simplifié d'aide à la décision, que j'ai développé. Il permet à un joueur d'évaluer les coûts de son action avant de l'exécuter effectivement dans le jeu (ex : le coût foncier d'implantation d'une carrière à un endroit donné). Il permet aussi un gain de temps pour le jeu : il implémente tout calcul, simple ou complexe, nécessaire au jeu, hors les négociations.

☞ Une vue de ce calculateur est présentée en [Annexe II](#), section « [calculateur simplifié d'accompagnement du jeu de rôles](#) », page 139.

En quatrième lieu, et toujours dans le cadre de cet accompagnement, je me suis initié au remplissage de la matrice de délibération avec les acteurs de terrain. En revanche, ces deux actions avec les acteurs de terrain (jeux de rôles et matrice) ont été menées d'une manière indépendante pour l'instant. La démarche en cours à laquelle je participe actuellement est justement de commencer à expérimenter l'utilisation intégrée des deux dans une analyse intégrée et multicritère, avec des étudiants comme acteurs pour l'instant. Toujours sur l'aspect multicritère, ces jeux de rôles successifs ont également renforcé ma compréhension de ce qu'est une analyse de cycle de vie (ACV), appliquée ici à l'économie circulaire des granulats. Cette ACV a été transposée des acquis de la modélisation (cf. page 52, le dernier acquis).

En cinquième lieu, une leçon que j'ai apprise à l'issue de ce tronçon concerne l'usage des jeux de rôles. Comme il a été énoncé dans la section II.4.3.2, en page 59, les jeux de rôles, dans ma démarche AGREGA, avaient pour but premier d'alimenter une simulation ACE (a) pour gérer le problème de l'aspect « boîte noire » des modèles et (b) pour fournir des informations pour la modélisation – captage de comportements complexes (voir aussi la Figure I.3 en page 25 sur le lien entre jeu de rôles, simulation ACE et économie comportementale). Mais au fil des sessions, j'ai remarqué qu'utiliser les jeux pour capter des comportements à des fins d'aide à la construction de modèles n'était pas encore dans la culture des géosciences. Les participants, s'ils prenaient la peine de se déplacer, voulaient plutôt utiliser les jeux uniquement pour comprendre leurs enjeux ou pour discuter de leurs scénarios. J'ai donc saisi cette balle au bond : le domaine des géosciences – BRGM inclus – s'il ne s'intéresse pas encore aux modèles ACE, s'intéresse en revanche aux jeux sérieux même si, dans les faits, le domaine a pour l'instant développé très peu d'outils de ce type.

☞ Ce constat était pour moi une raison supplémentaire pour renforcer davantage mes activités sur les aspects « serious game » - plus acceptés par le monde des géosciences – en espérant par la suite m'en servir aussi, à moyen terme, comme un levier pour faire accepter progressivement l'approche ACE par ce même monde, vu le lien qui existe entre ACE et jeux de rôles (cf. Figure I.3 en page 25).

En sixième lieu, grâce à ma position de coordinateur du projet AGREGA, j'ai pu m'approcher de bon nombre de parties prenantes et ai pu capter ce qu'est réellement un comportement d'acteurs de terrain et leur vie, allant du simple au complexe. Ces dernières discutent ouvertement de leur perception du projet par rapport aux enjeux territoriaux qui les concernent. Vivre ce genre d'expériences humaines est pour moi un acquis important dans un apprentissage d'accompagnement en recherche-action participative.

Enfin, je considère, après plus de 10 ans de recherche, cette version déclinée d'INTEGRAAL (contenant outils de jeu de rôles, de simulation ACE, de matrice de délibération) comme un premier aboutissement de la réflexion portant sur le développement de la méthodologie socioéconomique sur les ressources minérales, une réflexion initiée par l'équipe RESE dans le projet FENIX à mon arrivée au BRGM en 2003.

Au-delà de ces aspects scientifiques, ce tronçon m'a permis d'encadrer

- Philippe BOITIAU, 6 mois (Discipline : géologie) qui apportait son expertise géologique dans la construction des jeux de rôles.

Le tronçon m'a aussi permis d'enrichir mes capacités d'enseignement, grâce aux différentes sessions d'animation des jeux de rôles réalisées pour les étudiants de différents établissements : université Versailles-Saint-Quentin, université d'Orléans / BRGM Campus et UniLasalle Beauvais.

Ce tronçon a produit :

- 1 publication dans une revue scientifique (Dougnet et al., 2019)

II.4.4 Le tronçon « métaux stratégiques » (2014-2019)

II.4.4.1 Pourquoi l'emprunt de ce tronçon ?

Par rapport à mon parcours sur la recherche-action, et avec les arguments que j'avais concernant les avantages potentiels fournis par l'ACE à l'échelle des métaux stratégiques (macroéconomie), arguments fournis dans la section II.3.4.3 en page 54, il me semblait logique de proposer l'ACE aux collègues. Cette proposition pouvait se faire à partir de 2014 suite à l'embauche d'un économiste, ou plutôt d'un géologue ayant complété son cursus par l'économie, donc qui connaît bien les métaux.

II.4.4.2 Travaux scientifiques

Le travail consistait à ce que l'économiste étudie et critique librement le modèle ACE du marché du lithium que j'ai développé précédemment (cf. section II.3.4.2 en page 54) afin d'en évaluer le niveau de compréhension et d'acceptation.

II.4.4.3 Point sur les acquis

Alors que la littérature commençait à abonder en termes d'application de l'ACE dans la macroéconomie en général, cet exercice m'a permis d'avoir le retour d'un spécialiste d'un marché en particulier – celui des métaux stratégiques – par rapport à sa perception de l'ACE pour ce marché mais sur des critères essentiellement thématiques. En particulier, j'ai compris que sur le principe, l'utilisation de l'ACE à l'échelle micro est intellectuellement compréhensible (ce qui ne signifie pas qu'il y aura ensuite un engagement de travail sur le sujet). À l'échelle macro, elle est plus controversée. La préconisation par le spécialiste a été pour l'instant de faire du « showing-by-doing » (Hamill, 2010) c'est-à-dire de simplement continuer le test jusqu'à convaincre les experts.

L'exercice m'a aussi permis de prendre connaissance des outils et méthodes que ces spécialistes acceptent d'utiliser traditionnellement pour étudier les flux de métaux. Mentionnons en particulier les « Material-Flow-Analysis » ou MFA (Guyonnet et al., 2015) qui représentent toute la chaîne de transformation d'un métal étudié, et les tableaux d'entrée/sortie ou TES (Beylot and Villeneuve, 2015) qui décrivent ici l'utilisation des métaux dans les différents secteurs de l'économie française (un secteur étant par exemple représenté dans (de Andrade et al., 2010) par un seul agent représentatif (Fagiolo and Roventini, 2012)). Si je n'ai pas pu particulièrement exploiter ces outils durant mon parcours, une des perspectives de recherche envisagées (cf. section V.1.3 en page 98) serait de coupler les MFA (d'abord) avec l'ACE, dans un schéma micro ↔ macro. En effet, si les MFA sont généralement statiques et macro, ils peuvent servir de cadre de développement, de validation et de restitution du modèle ACE à un niveau plus agrégé. Il en sera probablement de même pour les TES.

Ce tronçon a produit :

- 1 publication dans une revue scientifique (Lefebvre and Andriamasinoro, 2016).

II.4.5 Le tronçon « géothermie » (2018)

II.4.5.1 Pourquoi l'emprunt de ce tronçon ?

Ce tronçon concernait principalement le projet ANR PréGo dont j'ai pris la coordination après le départ à la retraite du coordonnateur initial, fin 2017. La recherche PréGO portait sur la reconversion des ouvrages profonds en ouvrage géothermique et visait un double objectif :

1. étudier la possibilité d'une évolution de la réglementation vers une obligation de prévoir cette reconversion pour tout futur ouvrage profond, quelle qu'en soit la destination initiale, en lieu et place d'une simple « mise en sécurité », et
2. évaluer les enjeux économiques et sociétaux qui en résulteraient sur le territoire objet de la reconversion.

II.4.5.2 Travaux scientifiques

C'est sur le point 2 ci-dessus que j'ai participé au niveau opérationnel. La question était la suivante : *quels sont les enjeux importants pour les acteurs par rapport au sujet de la reconversion d'un ouvrage profond en ouvrage géothermique ?*

Le terrain d'études retenu (en cours de projet) a été Gardanne qui mettait en œuvre la reconversion de l'ancien puits minier Yvon Morandat en puits géothermique (Lesueur, 2016). Par rapport à mon parcours sur la recherche-action, l'idée dans PréGo était de rester dans cet état d'esprit de la recherche-action participative. Cependant, au moment où Gardanne a été retenu, des actions de recherche-action participative ont déjà été initiées (seule l'évaluation – via simulation – du potentiel du puits n'a pas été complétée). Il semblait donc logique de se rapprocher des personnes ayant initié cette recherche-action participative plutôt que de réinventer la roue.

C'est dans cette démarche que j'ai pu découvrir les cartes cognitives (Guirou, 2017), un outil utilisé pour capter la vision de chaque acteur (Maire de Gardanne, Directeur Technique, DREAL, ADEME ...) par rapport à cette reconversion. Une discussion a alors été menée pour voir le rapprochement possible de cet outil avec INTEGRAAL. Il s'avérait que les cartes cognitives pouvaient bien s'intégrer dans les étapes 2 (collecte et structuration des données) et 4 (support d'évaluation des scénarios) d'INTEGRAAL.

Au-delà de ces aspects scientifiques, j'ai co-organisé, en tant que coordonnateur, la restitution des résultats du projet PréGo auprès d'acteurs de la filière géothermie (industriels, associations, bureau d'études, experts ...).

II.4.5.3 Point sur les acquis

Ces travaux sur la géothermie m'ont permis de m'approprier une vision plus large de la recherche-action participative via la méthodologie INTEGRAAL. En particulier, je suis sorti de mon domaine « traditionnel » des ressources minérales (ici, c'est la géothermie) et du domaine des outils de jeux de rôles ou de simulation ACE (ici, ce sont les cartes cognitives). Si la littérature a montré que la méthode avait déjà cette vision plus large, me l'approprier était une autre histoire, ce qui était ensuite renforcé via PréGo.

Enfin, tout comme avec AGREGA, en tant que coordinateur du projet, j'ai pu m'approcher de bon nombre de parties prenantes, directement ou indirectement. Le débat multi-acteurs à la restitution du projet m'a permis de comprendre encore davantage ce qu'est la vie complexe d'un territoire, notamment dans un environnement multi-acteurs. C'est pour moi un acquis important pour renforcer mes compétences d'accompagnateur-chercheur.

II.4.6 Un tronçon méthodologique (2018 et 2019)

Alors que dans les précédents tronçons, on parle de filières, tel n'est plus le cas dans cette sous-section. Je regroupe ici sous le terme « méthodologique », un tronçon composé d'actions de formation que j'ai réalisées en 2018 et 2019, en parallèle à mon parcours scientifique. Ces actions ne sont donc pas de la recherche en soi, et pourtant, leurs acquis sont des outils importants (a)

pour mes recherches en cours, (b) pour renforcer mes capacités à diriger de la recherche (cf. [Chapitre IV](#)) ou (c) pour construire mes projets de recherche futurs ([Chapitre V](#)), que ce soit en modélisation ACE ou en recherche-action participative.

II.4.6.1 Formation en « agent-based modelling » (ABM) avec le protocole ODD + D

En 2018, j'ai participé à un « summer school » sur les ABM à Dresde ([Zwanzig, 2018](#)). Durant cette formation, j'ai découvert un protocole nommé ODD ([Grimm et al., 2010](#)), dispensé par un des auteurs, Steven Railsback. ODD a été conçu pour décrire, communiquer et reproduire des modèles à base d'agents. J'ai aussi découvert ODD + D ([Müller et al., 2013](#)), une extension de ODD qui explicite les prises de décisions humaines. Cette même formation a également présenté TRACE ([Grimm and Schmolke, 2011](#)). TRACE est un cadre de développement et de documentation de modèles qui se veulent être compréhensibles par des parties prenantes non initiées. Cette compréhension et appropriation se fait via une implication de ces parties prenantes à bon nombre de phases de la modélisation tout en expliquant au modélisateur les attentes des parties prenantes dans chacune de ces phases. TRACE fait appel à ODD pour la partie « description du modèle ». Enfin, la formation a présenté le « Pattern-Oriented-Modeling » ou POM ([Grimm and Railsback, 2012](#)). POM est un mécanisme proposé pour valider les ABM à un niveau multi-échelles (comparaison d'une sortie d'un modèle avec de multiples patterns observés à différentes échelles).

Cette formation a répondu à bon nombre de problématiques que j'avais rencontrées durant mon parcours scientifique depuis mon arrivée au BRGM.

En premier lieu, ODD m'a permis de montrer un chemin possible pour avancer dans l'idée de faire accepter un modèle ACE au monde de l'économie appliquée au domaine des géosciences. En effet, alors que le débat sur l'acceptation des ABM est toujours d'actualité, j'ai appris par la suite que le protocole ODD semble avoir l'adhésion croissante d'un bon nombre de communautés : s'il est devenu populaire dans le domaine des écologistes ([Polhill, 2010](#)), il est en passe de le devenir aussi dans la communauté de la simulation sociale ([Grimm et al., 2013](#)) ainsi que dans d'autres domaines comme l'agriculture ([Perrotton et al., 2017](#); [Kremmydas et al., 2018](#)). Sa particularité est qu'il a été conçu par des modélisateurs écologues, non par des informaticiens, ce qui génère un certain optimisme quant à son acceptation à un niveau thématique. Néanmoins, Il me faut à présent l'expérimenter dans le domaine de l'économie.

Pour la suite de mes travaux, j'utilise(rai) ODD + D plutôt que ODD. Ce choix est motivé par au moins les raisons ci-après. Déjà, et pour reprendre ([Kremmydas et al., 2018](#)), l'ODD original est plutôt orienté écologie alors que ODD + D couvre la prise de décision humaine en général. Ensuite, sur un point de vue plus personnel, l'ordre des éléments suite au réarrangement effectué dans ODD + D me semble plus fluide dans ma manière de concevoir un modèle ACE que celui dans l'ODD original.

En second lieu, TRACE est aujourd'hui une solution potentielle que je trouve adéquate pour corriger la démarche qui a été effectuée dans ANTAG : développer un modèle de simulation à un stade très avancé d'abord, à l'intérieur de l'équipe scientifique, avant de le présenter à un comité d'utilisateurs.

Enfin, POM a été important parce que le manque de protocole de validation clair est aujourd'hui une des sources de non-acceptation d'un modèle agent ([Rand and Rust, 2011](#); [An et al., 2019](#)). POM en serait une solution potentielle. De plus, de par les nombreuses discussions que j'ai pu avoir avec les collègues, l'ACE est souvent perçu comme une interaction à l'échelle locale uniquement. Leur présenter rapidement POM (du local vers le global) a aidé ceux qui sont habitués à modéliser à un niveau « top-down » uniquement à mieux comprendre l'ACE. Le

couplage micro ↔ macro d'un ACE avec les MFA (cf. page 64), des outils mieux acceptés par les experts, pourrait aussi se faire sous forme de POM.

II.4.6.2 Formation en « jeux de rôles » avec le processus COMMOD

En 2019, j'ai suivi la formation Commod (Companion Modelling) ou modélisation d'accompagnement (Barreteau et al., 2014). ComMod est un groupe de chercheurs et d'enseignants-chercheurs du CIRAD, du CNRS, de l'INRAE, de l'IRD, et d'Universités françaises et étrangères qui a mis au point et a formalisé une nouvelle façon d'aborder la modélisation en appui à des processus de décision collective concernant la gestion durable des ressources naturelles renouvelables. La formation expliquait la posture, la méthodologie, les outils spécifiques (jeux de rôles et simulation agent), les effets attendus et les conditions d'application de la démarche de modélisation d'accompagnement dans le cadre d'un appui aux processus de décision territoriaux et environnementaux. La formation a également présenté la méthode ARDI (Etienne et al., 2011) pour 'A'cteur, 'R'essources, 'D'ynamique et 'T'interaction. Cette méthode intervient pour construire le modèle thématique à obtenir en amont du modèle conceptuel implémenté ensuite sous forme d'un jeu de rôles ou d'un outil de simulation (cf. aussi Figure I.3 en page 25).

Par rapport à mon parcours, cette formation a renforcé mes acquis dans l'animation de jeux de rôles et dans la construction de modèles ACE. En particulier, ARDI, à travers des questions-guides, permet de mieux préciser les informations préalables nécessaires à cette construction. La formation m'a aussi permis de rencontrer différents acteurs en France qui s'intéressent à ces méthodes car, comme il a été dit tout au long de ce mémoire, le domaine des géosciences en France a développé très peu d'outils de ce type.

II.4.6.3 Formation « Risques Naturels et SHS »

En 2019, j'ai participé au BRGM à une formation expliquant la place des sciences humaines et sociales (SHS) dans la gestion des risques naturels (programme P5 dans la Figure I.6 en page 30). L'idée a été (a) de comprendre les approches sociales et économiques pour être capable de les intégrer dans la gestion du risque, (b) de connaître les étapes de l'évaluation économique et sociologique d'un territoire exposé à un aléa et (c) d'identifier les acteurs et leurs rôles. La formation s'est terminée par une session de « serious-game » appelé RAMSETE (Fleming et al., 2019).

L'apport de cette formation dans mon parcours scientifique a été de nouveau de m'ouvrir à des domaines des géosciences autres que les ressources minérales. Il y a déjà eu la géothermie (cf. section II.4.5 en page 64) et à présent les risques naturels. Le « serious-game » développé a permis de « vivre » en termes de comportement d'acteurs, la manière dont la société perçoit aujourd'hui objectivement ou subjectivement différents types de risques, ce qui est nécessaire pour un accompagnant-chercheur. C'était aussi l'occasion de voir la montée en puissance des jeux sérieux dans le domaine des géosciences.

II.4.6.4 Appropriation de la méthode Strategyzer

En 2019, je me suis également approprié Strategyzer (Strategyzer, n.d.). C'est une méthode qui permet la co-créativité de nouvelles solutions pour répondre aux besoins du client mais qui, en même temps, rapporte aussi à l'entreprise qui les développe. Elle sensibilise à la valorisation, à l'innovation et à l'entrepreneuriat. Elle favorise clairement le « market-pull » (Benoit-Cervantes, 2012). J'ai pu apprécier Strategyzer en 2019 au moment où le BRGM a appliqué la méthode sur l'outil « jeux de rôles » développé dans AGREGA avec l'idée d'identifier les clients

potentiellement intéressés par le jeu et la forme du jeu (produit dérivé) sous laquelle ces clients le voudraient.

L'apport de Strategyzer à mon parcours est le renforcement du changement de paradigme, passant d'un techno-push vers un market pull. Ce changement a déjà été initié lors de la transition ANTAG → AGREGA (cf. l'histoire en page 49). L'idée dans Strategyzer est cette fois-ci de mettre en premier plan la réflexion sur les aspects d'innovation, de valorisation et de transfert de résultats de recherche vers le monde économique, préconisés par la politique de valorisation du BRGM (cf. section 1.5 en page 29). Cette formation BRGM a surtout suggéré d'identifier le marché des résultats d'un projet, même si ce projet est encore dans une phase très embryonnaire. La réflexion ne consiste pas uniquement à apporter des solutions à des problèmes existants émis par les acteurs du marché. Elle consiste aussi à faire émerger, via la démarche innovante, des problèmes dont ces acteurs n'avaient pas forcément eu conscience au départ et qui sont finalement importants pour eux.

II.5 Les projets en cours (2020)

II.5.1 Le projet « acceptabilité mine » en Europe (recherche-action)

Pour 2019 / 2020, je suis un contributeur d'un projet H2020 en cours appelé MIREU (Grant N° 776811). MIREU a pour objectif général d'identifier les facteurs qui facilitent ou qui freinent le développement minier sur un territoire en Europe. Il n'y a pas ici de filière particulière à suivre.

Mon rôle consiste à alimenter les réflexions sur le développement de jeux de rôles qui aiderait dans la discussion se déroulant entre industriels miniers et communauté locale sur l'acceptabilité sociétale des projets miniers en question.

II.5.2 Le projet « mine artisanale » en Afrique (recherche-action)

II.5.2.1 Pourquoi ce projet ?

En 2019, le BRGM souhaitait reprendre la recherche en Afrique, après l'avoir laissée en 2006 (cf. l'histoire dans la section 1.3.2 en page 48). Par rapport à cette nouvelle situation, j'ai repris le volet socioéconomique de la « mine artisanale » (ASM) – le même volet que le début de ce parcours – mais en mettant à jour l'itinéraire : étudier la filière, non plus dans une démarche de modélisation à des fins de production de connaissances uniquement (itinéraire 1), mais dans une démarche de recherche-action participative (itinéraire 2) avec comme cibles finales les locaux (villageois, travailleurs dans la mine, ordonnateur de sacrifice, autorités locales...).

II.5.2.2 Travaux scientifiques

Mon travail pour 2020 est d'engager une réflexion sur l'imbrication des acquis scientifiques obtenus jusqu'à présent – plus riches qu'en 2006 – pour aborder, dans une démarche d'intelligence collective, une des problématiques demeurant dans le secteur de l'ACE : la formalisation (Mandere, 2019). Cette réflexion vise à mettre en place un processus scientifique clair de conduite d'une recherche-action participative autour des jeux sérieux dans le cadre de cette problématique de formalisation. Les questions autour du jeu seraient de type : *comment chaque acteur local, opérant dans un cadre informel ou non, perçoit-il et comprend-il aujourd'hui, de son propre point de vue et sentiment, les enjeux liés à la formalisation, les jeux d'acteurs induits le long de la chaîne des valeurs, et les impacts de ces enjeux sur son territoire ?*

Un livrable attendu pour 2020 est un premier prototype générique de jeu plateau, sans attachement à un territoire en particulier en Afrique pour l’instant, et construit uniquement à partir de savoir-faire d’experts. Ce prototype devrait être utilisable durant le 28^{ème} congrès africain de géologie (CAG 28) au Maroc en octobre 2020 ([CAG 28 announcement, 2019](#)) avec, comme participants, bon nombre d’acteurs de la filière.

☞ Un résumé de l’avancée technique liée à cette réflexion en cours se trouve en [Annexe II](#), section « [la formalisation du secteur « mine artisanale » \(ASM\)](#) », page 141.

Sur le plan scientifique, ce projet a produit :

- 1 publication dans une revue scientifique ([Andriamasinoro et al., 2020](#)).

II.5.3 Le projet « après-mine » en France (recherche-action)

II.5.3.1 Pourquoi ce projet ?

Depuis sa création en 2019, le programme scientifique « impacts miniers et industriels dans le sol et sous-sol » (P4 dans la [Figure I.6 en page 30](#)) du BRGM a comme un des objectifs le développement de solutions intégrées pour un aménagement durable des territoires associés aux sites miniers et industriels dégradés. Pour cela, un focus est mis particulièrement sur les approches sociologiques, de sciences participatives et multi-acteurs en contexte après-mine. Vu mon intérêt pour les sciences participatives, je me suis inscrit dans l’équipe chargée de l’opérationnalisation de cet objectif, en parallèle à mes réflexions sur la mine artisanale.

II.5.3.2 Travaux scientifiques

Mon travail en 2020 est de contribuer au développement de nouvelles méthodes sociotechniques de gestion des méga-sites miniers qui, dans le plan de gestion, renforcent l’organisation des dynamiques sociales, l’optimisation du fonctionnement du collectif territorial et la connaissance précises des acteurs et des usages du site ([Dumat et al., 2019](#)). Les questions de recherche posées sont : *comment se produit la fabrique des risques face aux transferts de polluants dans l’environnement aux abords des sites miniers ? quelles évolutions possibles (et comment), entre les croyances ancrées des différents acteurs impliqués et la prise en compte rationnelle des faits observables ? Quels moyens de transmissions des croyances et des connaissances ? Quels méthodes et dispositifs pour promouvoir une coconstruction de gestion durable des sites miniers ?*

La phase 2020 consiste à réaliser (a) une revue bibliographique ciblant les dynamiques sociales face aux problèmes de pollution historique posés par les contextes d’après-mine et (b) une analyse de données sociotechniques descriptives d’un panel de sites miniers (différents contextes) d’intérêt pour le BRGM.

II.6 Informations complémentaires sur le parcours

Les différents tronçons du parcours passé étant à présent racontés et les projets en cours étant décrits, cette section regroupe des informations complémentaires qui n’ont pu être situées dans les sections précédentes car revêtent un caractère transversal aux 2 itinéraires racontés précédemment.

II.6.1 Changement dans la discipline de recherche

À l’issue de mon postdoc en 2005, il y a eu une première discussion sur mon transfert au service informatique du BRGM, en vue d’un CDI. Mais les négociations n’ont pas abouti. Une des

raisons a déjà été mentionnée dans la section [II.2.2 en page 42](#) : le service informatique du BRGM ne travaillait pas sur l'approche « multi-agents ». Au final, j'ai été embauché en CDI dans le service des ressources minérales / unité Ei2D, où j'étais déjà en post-doctorat. Cet événement était pour moi le début d'une conversion sans retour, de l'informatique vers l'économie, une mutation dans les faits, progressive dans la pensée. Conversion sans retour signifie que l'approche « agent » n'a plus été un sujet de recherche mais reste en revanche un outil et une compétence pour appui à l'analyse des filières ressources minérales. Par exemple, je suis passé d'un modèle de thèse en informatique sur les robots fourrageurs (cas d'école) à un problème économique (cas concret) de mineurs au Burkina Faso : un modèle économique spatialement explicite. Cependant, je suis resté dans l'interdisciplinarité. La conversion n'empêchait pas, lorsque nécessaire pour répondre à mes questions thématiques, de mobiliser les savoir-faire d'ordre informatique : mobilisation du langage de modélisation objet UML ([Booch et al., 2005](#)) pour concevoir mes modèles, mobilisation du « Machine-Learning » pour traiter les « Big Data » (cf. [page 56](#)), mobilisation de la capacité de développement et de test informatique sur des systèmes complexes consommant beaucoup de ressources informatiques, etc. C'est entre autres cette possibilité de mobilisation qui m'a d'ailleurs permis de faire évoluer la plateforme de simulation ADK vers la plateforme de simulation ACE Is@Tem supportant les données SIG de type vectoriels (cf. [Figure II.3 en page 51](#)) tout en répondant à des problématiques thématiques.

Le choix des revues ou des congrès auxquels je soumettais mes travaux au fil des années reflétait aussi cette mutation. Au départ, ces cibles étaient de type « simulation en général » ou « simulation appliquée ». Puis, selon le travail et le tronçon, les revues devenaient progressivement de type thématique : économie, socioéconomique, politique, etc.

II.6.2 Évaluation d'articles de recherche

En parallèle aux articles que j'ai écrits ou coécrits, j'ai aussi, durant tout le parcours et jusqu'à aujourd'hui, évalué des articles de recherche. Le choix des revues dont j'acceptais les articles à évaluer était également guidé, consciemment ou inconsciemment, par la mutation susmentionnée. Au départ, j'étais évaluateur d'article de revues portant sur de la modélisation ou de la simulation informatique, comme JASSS - « Journal of Artificial Societies and Social Simulation ». Ensuite, j'ai basculé vers « Resources Policy », un journal dédié à l'économie des ressources naturelles et en particulier minérales (et d'ailleurs pas lié à l'ACE). J'y suis resté comme reviewer pendant 4 années consécutives (2013-2016) c'est-à-dire que j'ai été sollicité tous les ans par l'éditeur. Ce renouvellement successif montrait une acceptation de mon expertise de l'année précédente par l'éditeur (la 5^{ème} année, j'ai dû décliner faute de temps). En 2019, j'ai été reviewer pour la revue « International Journal of Sustainable Development » portant que la participation des parties prenantes dans la problématique du développement durable. Ma dernière revue, datant de 2020, était « Natural Resources Research ». Cette revue, appartenant à l'Association internationale des géosciences mathématiques, publie des études quantitatives sur l'exploration, l'évaluation et l'exploitation des ressources naturelles en utilisant des données ou des analyses géoscientifiques. Même si cette dernière revue n'est pas entièrement du domaine de l'économie ou de la socioéconomie, je peux considérer que globalement, ma mutation vers ces domaines est bien avancée.

II.6.3 Démarche bibliographique

En raison de la faible acceptation de l'ACE dans le milieu BRGM (cf. l'histoire dans la section [II.2.2.1 en page 42](#)), les références bibliographiques que j'ai utilisées durant tout ce parcours, pour la partie méthodologique à l'échelle d'un territoire, ont porté généralement sur les ressources naturelles – et renouvelables – (étudiées souvent par le CIRAD, l'INRAE, etc.) en plus des ressources minérales – non renouvelables – en particulier. Cette démarche a été valable

que ce soit pour les jeux de rôles (d'Aquino et al., 2002; Becu et al., 2017; Ducrot et al., 2018) que pour la simulation, notamment par rapport à la construction de la plateforme de simulation Is@Tem et son couplage avec le SIG. En vue de ce couplage, je me suis focalisé entre autres sur le rapport et revue du workshop international sur la modélisation du « Land-Use and Land-Cover Change » (LUCC) par les ABM (Parker et al., 2001), un rapport auquel certains membres du CIRAD ont contribué. Ce rapprochement LUCC/ABM existe toujours aujourd'hui (Groeneveld et al., 2017). Je me suis aussi intéressé à des colloques de type SMAGET (Système Multi-Agents pour la Gestion de l'Environnement et des Territoires). La différence de type de ressources (renouvelable vs. non renouvelable) n'a pas été un obstacle en soi. Néanmoins, malgré le focus sur les agents (LUCC, SMAGET), je me suis aussi intéressé à des ouvrages plus génériques comme (Ott and Swiaczny, 2001) pour la modélisation temporelle d'un espace. Je n'ai sans doute pas pu tout explorer. Par exemple, je n'ai pas pu tester tous les outils SMA existants. Cela est dû en grande partie dû au manque de temps pour faire de la veille (situation abordée en page 42, section II.2.2.1).

II.6.4 Informations complémentaires sur les publications

Le fonctionnement du BRGM en mode EPIC, c'est-à-dire priorité accordée à la gestion de projets (cf. les détails dans la section I.5.2 en page 30), a eu au moins deux conséquences sur le rythme des publications. La première est qu'il y a eu des publications sorties à des dates en décalage avec la fin calendaire du projet. Tel est par exemple le cas des projets sur l'artisanat minier en Afrique (2003-2006) dont la publication finale n'a pu être sortie qu'en 2012 (car recherche et réalisation de nouveaux projets d'abord après arrêt de toute étude ASM en Afrique). La deuxième est que des trous de publications ont existé, notamment entre 2013 et 2016 (conduite du projet ANR AGREGA) et entre 2017 et 2019 (conduite du projet ANR PréGo).

Conclusion de la Partie B

*« Le voyage pour moi, ce n'est pas d'arriver, c'est de partir.
C'est l'imprévu de la prochaine escale,
c'est le désir jamais comblé de connaître sans cesse autre chose ».*
- Roland Dorgelès

CETTE PARTIE A ÉTÉ CELLE de la mise en scène du mémoire. Elle a notamment porté sur la description du contexte de mon parcours et le parcours en lui-même (caractère et chronologie), résumant les travaux dans lesquels je m'étais impliqué durant 17 ans (2003-2020). Au fur et à mesure du récit, elle restitue aussi, progressivement, les acquis du parcours. Au préalable à ce récit, cette partie du mémoire a suggéré différentes catégories de lecteurs possibles à qui ce mémoire s'adressait, une démarche que j'ai considérée comme importante dans une ère où l'obligation de diffusion des connaissances prend de plus en plus d'ampleur. Cet aspect multiple des catégories de lecteurs a induit une phase terminologique pour une compréhension partagée du sujet. Je ne peux pas assurer que l'exercice de partage a réussi. Mais au moins, l'effort a été engagé.

Chronologiquement, mon parcours peut être décomposé en 2 grands itinéraires, définis plus en termes de paradigme que de projets scientifiques. Le premier itinéraire a été caractérisé par une activité de modélisation par ACE à des fins de pure production de connaissances et d'évaluation de leur qualité du point de vue scientifique. Puis, au fil de mes réflexions, j'ai admis que pour m'assurer de la valeur ajoutée effective de ce type de travail scientifique, il fallait aussi m'intéresser aux conditions de son appropriation par la société. La nouveauté à porter dans ce deuxième itinéraire a été d'intégrer cette modélisation ACE dans une démarche de recherche-action participative (RAP) afin de prendre en compte le point de vue sociétal, de co-construire avec eux les solutions à leurs attentes, ce qui inclut l'évaluation de la pertinence des connaissances acquises autrement (via la littérature ou les outils existants par exemple). Et cette démarche devient nécessairement un composant à part entière des programmes de recherche. Les activités dans ce second itinéraire, et pour une problématique donnée d'une filière ressources minérales, ont été menées dans un objectif d'apprentissage social et de co-construction de scénarios prospectifs de gestion de la filière.

Une des principales difficultés que j'ai rencontrées tout le long de ce parcours a été que l'approche par l'ACE et la RAP sont encore très faiblement acceptées par le monde des géosciences. Cela concerne *a fortiori* le BRGM, une entreprise très orientée expertise, qui plus est, focalisée majoritairement sur les paramètres et processus physiques du système étudié. L'étude de la complexité telle qu'elle est définie ici (multi-acteurs, multi-échelles, sciences participatives) y a donc été – et y est toujours – un challenge. En conséquence, les références bibliographiques que j'ai utilisées durant tout ce parcours, que ce soit en simulation ou en jeux de rôles portent généralement sur les ressources naturelles en général (étudiées par le CIRAD, l'INRAE, l'IFREMER, etc.) que sur les ressources minérales en particulier, d'où l'aspect interdisciplinaire de ce parcours.

La partie suivante va maintenant présenter, à l'intérieur d'un chapitre de bilan, le regard que je porte face à mon parcours et à mes acquis.

PARTIE C : BILAN

« Rien ne résume un homme, pas même ses idées »
- Mourad Bourboune

Chapitre III. Regard du candidat sur son parcours scientifique

« De son passage, un poète doit laisser des traces, non des preuves.
Seules les traces font rêver »
- René Char

CE CHAPITRE VISE PRINCIPALEMENT à analyser mon parcours du passé et à préparer la manière dont il serait possible de valoriser les acquis de ce parcours par rapport au programme de recherche qu'aujourd'hui, je suis capable de proposer, de piloter et de faire réussir.

Contenu du chapitre

III.1 Des sciences informatiques aux sciences économiques (et sociales ?)	77
III.2 Les objectifs que le candidat aurait aimé atteindre	79
III.3 Apports du parcours pour le candidat	80
III.4 Regard particulier sur l'avenir de l'ACE dans le travail du candidat	82

Dans la section [III.1](#), je donne d'abord mon regard sur l'évolution factuelle de mon parcours du monde informatique vers le monde socioéconomique, racontée dans la section [II.6.1 en page 69](#). La section [III.2](#) évalue ensuite l'écart entre ce que je visais au fur et à mesure du parcours et ce que j'ai pu atteindre aujourd'hui. La section [III.3](#) résume ce que ce parcours m'a apporté sur les plans professionnel et personnel. Enfin, dans la section [III.4](#), je donne mon point de vue sur l'avenir du concept qui a été l'objet de tout ce mémoire - l'ACE - dans mes travaux futurs dans le monde des géosciences.

☞ En fonction de la catégorie à laquelle le lecteur pense appartenir (cf. tableau [en page 16](#)), il peut poursuivre sa lecture par ce chapitre, s'il le souhaite, ou se référer de nouveau à la Figure [en page 18](#) pour identifier d'autres chemins.

III.1 Des sciences informatiques aux sciences économiques (et sociales ?)

Lorsque j'ai eu mon bac, j'avais comme intention de faire des sciences mathématiques. Finalement, pour diverses raisons, j'ai dû basculer en sciences informatiques ... que j'ai fini par adorer, voire en faire une passion, jusqu'à en obtenir une thèse. Dans le parcours décrit tout le long de ce mémoire, j'ai l'impression d'avoir vécu la même chose : je voulais poursuivre l'informatique et finalement, pour diverses raisons, j'ai dû basculer dans les sciences économiques ... que j'ai fini par adorer aussi, une mutation dans les faits, un changement progressif dans la pensée. Il est certain que si mes discussions à l'époque (2005) avec le service informatique du BRGM quant à mon éventuel embauche dans ce service avaient abouti (cf. l'histoire dans la section [II.6.1 en page 69](#)), ma situation aurait été différente aujourd'hui. L'histoire m'a ensuite informé, plus de 10 ans après (2016), que le service informatique du BRGM a embauché un spécialiste en Intelligence Artificielle mais qui - après une discussion que j'ai eue avec lui - ne connaît que vaguement le monde du « multi-agents ». Ainsi, avec le recul, mon parcours d'aujourd'hui semble donc être la meilleure voie qu'il m'est possible d'avoir eue. Alors qu'il y a des thématiciens, par exemple, des hydrobiologistes, qui se sont mués en spécialiste d'Intelligence

Artificielle ([Guerrin, 2007](#)), mon parcours correspond plutôt à l'inverse : un spécialiste d'Intelligence Artificielle qui s'est mué en économiste.

Cette mutation m'a vraiment enrichi.

J'ai évolué de modélisateur informatique, qui se demande, devant son bureau, comment sera son diagramme de classes ou d'objets UML ([Booch et al., 2005](#)) ou s'il faut écrire `for` ou `while` dans la boucle de son code, à quelqu'un qui discute de la problématique du marché des granulats avec des acteurs de la gouvernance (au ministère, à la DREAL) ou avec des entreprises de gestion des déchets. J'ai aussi évolué de celui qui implémente son modèle multi-acteurs sur ordinateur uniquement, à celui qui participe, dans la réalité, à l'accompagnement de processus collectifs de décision (recherche-action participative), selon une méthodologie multi-acteurs et multicritères. Malgré cette évolution, je reste dans l'interdisciplinarité informatique – économie. Si l'informatique ne sera plus pour moi un sujet de recherche, il restera un outil que je compte bien mobiliser toutes les fois que cela est nécessaire (cf. les détails dans la section [II.6.1 en page 69](#)). Le côté « riche » de mon parcours de modélisation vient aussi du fait que tout n'a pas été ACE (même si c'en était la majorité) : il y a eu aussi, en complément, les systèmes dynamiques, les ACV, etc. J'ai aussi travaillé dans un cadre faisant systématiquement intervenir plusieurs disciplines (géologie, environnement, économie circulaire, sociologie, informatique ...). Le fait que je travaille dans ce cadre ne signifie aucunement que je dois devenir expert dans toutes les disciplines concernées. Il s'agit bien ici d'être une interface entre disciplines, parfois avec le rôle d'un chef d'orchestre qui coordonne mais qui, cependant, ne vise pas à vouloir savoir jouer de tous les instruments de musique.

Néanmoins, pour mettre un bémol à ce qui vient d'être dit (ne pas devenir expert), il y a bien une discipline, outre l'informatique et l'économie, pour laquelle j'ai éprouvé un intérêt croissant dans ce parcours et dans laquelle je pense avoir augmenté (un peu) mes connaissances : la sociologie, et en l'occurrence, l'étude de la réalité d'une société. Le fait d'avoir été coordonnateur de projets ANR ou d'animateur de sessions de jeux de rôles (étudiants, experts, professionnels) m'a permis de mieux comprendre et/ou de mieux gérer les relations humaines à l'intérieur d'un projet (relations humaines entre partenaires) ou à l'extérieur d'un projet (relations humaines entre différents acteurs du territoire entre eux ou vis-à-vis du projet). Avec ce parcours, mon intérêt pour la sociologie est croissant surtout qu'elle se reflète un peu dans ma personnalité, par exemple d'avoir un rêve (désintéressé) d'obtenir des moyens pour le développement d'une population (cf. l'histoire [en page 3](#)). Je ne prétends cependant pas pouvoir être sociologue immédiatement. Car pour l'être, il faut par exemple savoir faire une analyse institutionnelle, une analyse de discours pour identifier - avec un certain esprit de synthèse - la diversité des enjeux autour de la problématique étudiée. Et tout cela se fait en allant souvent lentement car il y a parfois beaucoup d'informations de société (de grosses base de données parfois) à digérer au préalable, ensuite des interprétations globales à réaliser, et enfin du travail de rédaction et de restitution écrite à effectuer. Je ne suis pas sûr d'être encore à ce niveau de compétences pour prétendre être un sociologue.

La position du BRGM par rapport aux sciences participatives a cependant évolué, ce qui pourrait donner plus de place à la considération de la sociologie dans ses analyses. En effet, en 2016, l'établissement a signé la charte avec la société civile ([BRGM_SocCiv, 2016](#)). Par ce biais, il affirme sa volonté de dialoguer avec les acteurs de la société civile dans le cadre de ses activités d'expertise et/ou de recherche. Dans son contrat d'objectif et de performance 2019 ([COP_BRGM, 2019](#)), le BRGM réaffirme cette volonté par une intention de s'impliquer davantage dans les sciences participatives, dans la politique de médiation scientifique et dans la transmission des connaissances scientifiques. Par ailleurs, afin d'établir un dialogue constructif avec les citoyens, il propose également une tentative de comprendre les éléments qui constituent leur sensibilité. Même si la concrétisation de cette stratégie sur le terrain en est encore à ses balbutiements, au moins la stratégie est clairement affichée. Depuis peu, le BRGM a intégré dans

son programme de formation, des formations de type « animer une réunion de dialogue avec la société civile » ou « la gestion intégrée des risques naturels : place des sciences humaines et sociales ».

Au vu de ce qui vient d'être mentionné, et en introduisant un peu ce qui va être développé dans le [Chapitre IV](#) de ce mémoire, j'envisagerais bien de participer à cette évolution, certes non en tant que sociologue, mais en tant qu'un des contributeurs majeurs de l'interface entre les géosciences et la société.

III.2 Les objectifs que le candidat aurait aimé atteindre

Dans cette section, je présente ce que je considérerais comme limites des acquis scientifiques du parcours par rapport à ce que j'aurais aimé que ces acquis soient au moment de la rédaction de ce mémoire. Lorsque cela est possible, j'essaie aussi de donner des raisons (non exhaustives) à ces limites.

En ce qui concerne les jeux de rôles sur les granulats et leur économie circulaire (ANR AGREGA), il y a deux manques que j'ai constatés.

Le premier manque est que seuls les acteurs du marché ont pu être joués. J'aurais aimé avoir pu intégrer les acteurs indirects (représentant de l'État, associations ...) car ils influencent considérablement l'ouverture des carrières et donc la production. Cela aurait été utile pour alimenter la simulation car dans le projet précédent ANTAG, le comportement des associations par rapport à l'ouverture ou non d'une carrière était représenté par une probabilité entre 0 et 1 ([Rodriguez Chavez et al., 2010](#)). L'idée de départ dans AGREGA était alors de faire mieux qu'ANTAG sur ce point (cf. section [II.3.4.2 en page 59](#)) mais finalement, la recherche n'a toujours pas abouti.

Le deuxième manque est que seule une session a pu être jouée avec les professionnels pour l'instant. Avoir d'autres sessions aurait pu être une vraie valeur ajoutée. En attendant, le point positif est que les sessions avec les étudiants se multiplient, surtout avec l'idée d'une analyse intégrée jeux de rôles - matrice de délibération.

À propos de chaque filière « métaux stratégiques », seule une substance issue d'un maillon de la chaîne des valeurs de la filière a pu être suivie « carbonate » pour le lithium, « minerai » pour le cobalt). J'aurais aimé aller au-delà. Considérer un seul maillon est intéressant pour entamer la démarche mais pour répondre à la question de la rupture le long d'une chaîne des valeurs, tous les maillons antérieurs à celui objet de la question devraient être traités. J'aurais aussi aimé pousser ces modèles ACE dans toute la complexité du système. Cela concerne par exemple l'intégration du LME ([LME, n.d.](#)) dans le modèle, une entité centralisée à Londres et qui est un déterminant important du prix mondial des métaux. Il est aussi soupçonné que la financiarisation pourrait avoir un impact sur le niveau des prix et la volatilité des cours des métaux, comme le montre l'ensemble des travaux compilés par ([Cheng and Xiong, 2013](#)). De ce fait, les entités financières comme les banques auraient pu aussi être dans le modèle. D'ailleurs, dans d'autres modèles ACE concernant des marchés non-ressources minérales, ce paramètre de financiarisation est toujours pris en compte ([Derveeuw et al., 2007](#); [Caiani et al., 2016](#); [Hamill and Gilbert, 2016](#)). Une autre dynamique que j'aurais aimé également intégrer est celle de toute la phase d'un projet minier (exploration, développement, abandon si marché pas probant), comme l'ont fait ([Riddle et al., 2015](#)) dans leur modèle ACE du marché des terres rares. Enfin, le couplage de l'ACE avec d'autres méthodes comme le MFA, mieux connues et acceptées par les modélisateurs spécialistes de ces filières, aurait aussi dû déjà être en cours et aurait augmenté probablement l'acceptation de l'ACE – couplé à ces outils - par ces autres modélisateurs, au moins à titre expérimental. Ce mémoire y reviendra dans la section [V.1.3 en page 98](#) concernant les perspectives de recherche.

À un niveau plus conceptuel, j'aurais souhaité que les agents dans mes modèles ACE intègrent l'apprentissage « online » c'est-à-dire celui effectué durant la simulation (l'algorithme d'apprentissage actuel obtenu par « Machine Learning » vient en réalité de données « offline » uniquement). Pour cela, (Kirman and Vriend, 2001), dans leur modèle ACE, ont présenté un algorithme intéressant où producteurs et consommateurs apprennent à se connaître au fil du temps dans le marché de poisson de Marseille. Dans mon marché des granulats/économie circulaire, il aurait alors pu être pris en compte la notion de concurrence dynamique (exemple, sur les bétons) et de loyauté (contrat pluriannuel après mise en confiance), des éléments qui caractérisent ce marché (ADEME, 2012). Enfin, en plus de ce marché, j'aurais aimé développer un modèle ACE de l'économie circulaire des métaux stratégiques également.

Une des raisons de la non-considération de ces aspects a été que le travail aurait nécessité un partenariat avec un universitaire développant un ACE, ce qui n'a pas été possible durant le parcours (cf. l'histoire dans la section II.2.2 en page 42). Or, en parallèle, le statut d'EPIC du BRGM (cf. l'histoire dans la section I.5.2 en page 30) fait que le BRGM veut des résultats d'application et des réponses aux questions avant tout. En conséquence, je n'ai personnellement pas eu le temps de réfléchir davantage sur ces autres aspects de l'ACE, y compris de faire de la veille (situation abordée en page 42, section II.2.2.1). Une autre raison porte sur les données. Les données sur le marché des métaux ne sont pas par défaut taillées pour les simulations complexes. En effet, les producteurs de données comme (EUROSTAT, 2014) se basent sur des besoins qui eux-mêmes sont à satisfaire selon des méthodes. Or, les méthodes ne choisissent généralement pas la complexité mais le global (vu tout le long de ce mémoire). À cela s'ajoute la confidentialité des données fines (souvent des données d'entreprise). En conséquence, la nature des données disponibles suit : à l'échelle de l'année pour les données économiques, et à l'échelle du continent pour les cartes géologiques. De ce fait, il y a ignorance des données socioéconomiques de la mine qui sont généralement à des échelles fines. Nous entrons alors dans un cercle vicieux où les méthodes de modélisation du niveau complexe des systèmes n'ont pas leur place par manque de données. Il est à espérer que l'arrivée de l'IA va briser ce cercle vicieux.

Sur la partie purement computationnelle, j'aurais aimé que la performance (en temps de calcul) de la plateforme de simulation Is@Tem soit plus élevée qu'actuellement. L'introduction d'une application ACE concernant toute une région (pour la région PACA, l'application contient environ 1 450 entités + une table à 900 000 entrées pour le transport) a donné un chargement de 25 secondes contre quelques secondes pour une application sur une zone de 30 x 30 km (projet Mod-Flux). Par ailleurs, la plateforme met 8 secondes pour simuler 1 pas de temps contre quelques millisecondes pour l'application Mod-Flux. Cette lenteur peut parfois être vue comme une évolution logique. Cependant, pour une méthode encore en manque de reconnaissance, des utilisateurs pourraient trouver cela rédhibitoire. L'augmentation attendue de la puissance des ordinateurs dans les années à venir (entre autres) devraient y remédier en partie.

Enfin, en termes de construction et de communication de mes modèles ACE vis-à-vis de la société, j'aurais aimé connaître ODD + D un peu plus tôt (avant 2018), encore un effet du manque de temps pour faire de la veille. Néanmoins, à présent qu'ODD + D est acquis, cette étape de construction et de communication est un des points sur lesquels je dirais : cela n'est plus qu'une question de temps.

III.3 Apports du parcours pour le candidat

Le parcours a connu des périodes de hauts et de bas. Les hauts se situent à mon arrivée au BRGM en 2003 et aujourd'hui (je reviendrai sur ce dernier point plus bas). Les bas se trouvent au milieu du parcours. Le plus difficile a été la période 2006 à partir de laquelle il y a eu l'arrêt de la recherche en Afrique (cf. l'histoire dans la section II.3.2 en page 48), rendant « marginale » l'activité de modélisation ACE que j'avais réalisée. Il en a été de même pour la démarche globale

de construction de méthodologie socio-économique pour la mine, à laquelle je participais dans l'équipe RESE (cf. [Figure II.2 en page 45](#)). Déjà, à mon arrivée (2003), même s'il y a eu un scepticisme à l'égard de la méthode ACE, au moins, il y avait une structure qui soutenait la démarche. À partir de 2006, il y a eu une diminution manifeste du soutien financier. Cependant, si on suit bien le cours de l'histoire, la démarche, ne tournant qu'en toile de fond entre 2007 et 2013, a *finalement porté ses fruits* : un premier aboutissement de la réflexion portant sur le développement de la méthodologie socioéconomique sur les ressources minérales. Cet aboutissement se traduit par une version déclinée BRGM de la méta-méthode INTEGRAAL, enrichie par d'autres outils mobilisables à l'intérieur du processus. Certes, la méthode elle-même ne vient originellement pas du BRGM. Néanmoins, j'ai pu participer à la déclinaison d'une version « granulats et économie circulaire » (projet ANR AGREGA) de la méta-méthode, sous forme de simulation informatique ou de jeux de rôles, et en retrouvant au passage un autre outil : la matrice de délibération. « Retrouver » car cet outil « matrice de délibération » a déjà été utilisé dans une autre action 2004-2007 de l'équipe RESE : l'évaluation d'indicateurs miniers. À l'époque, l'outil a été développé indépendamment de la modélisation. Depuis AGREGA, nous sommes en train de les réunir. En particulier, dans un cadre de continuité méthodologique sur la recherche-action participative, cet ensemble issu des granulats est aujourd'hui valorisé dans la réflexion d'un projet en cours portant sur le volet socioéconomique de l'artisanat minier en Afrique (section [II.5.2 en page 68](#)), là où tout a commencé en 2003. Au final, et malgré les difficultés, les volets « mine artisanale » et « granulats » de ce parcours, ont à présent leur version INTEGRAAL.

☞ Une leçon à tirer de ce voyage, pour l'avenir, est que la persévérance est toujours récompensée et que la difficulté peut parfois en être un bon moteur.

Le premier apport du parcours est donc le renforcement d'une attitude de persévérance dans la réalisation d'un projet de recherche.

Le deuxième apport du parcours est un changement de paradigme vers plus de considération du marché cible et de la société de manière plus générale, à chaque fois que je pense « projet ou programme scientifique » et ce, même si le projet se situe encore dans une phase embryonnaire. Son troisième apport est ma capacité aujourd'hui à gérer des projets de recherche collaborative et l'encadrement de jeunes chercheurs.

Son quatrième apport est que le fait qu'il y ait eu des points non atteints (cf. la section [III.2 débutant en page 79](#)), a aussi montré les aspects positifs. En particulier, la situation m'a permis d'augmenter progressivement ma capacité à mener un travail de recherche en autonomie, sur le plan méthodologique, en collaboration avec les collègues, sur le plan thématique.

Le dernier apport du parcours est le renforcement de l'interdisciplinarité dans ma manière de penser en termes de projets scientifiques, de la multidisciplinarité en termes d'application et de la trans-disciplinarité en termes de recherche-action participative.

Par rapport à ce dernier apport, rappelons que ce parcours a été fait en totalité au BRGM, dans le Service « ressources minérales » (devenu Direction des Géoressources depuis 2012). Il est normal que la majorité de mes travaux porte sur les filières ressources minérales. Néanmoins, en termes de renforcement de compétences en analyse de filières multi-acteurs et de gestion de ressources et de l'espace, je me sens plus aujourd'hui me situer à un niveau « ressources naturelles » plutôt que 'ressources minérales' en particulier. En d'autres termes, je peux tout aussi bien m'ancrer dans les ressources minérales que basculer « assez rapidement » vers d'autres types de filières. Cette transversalité s'explique par les situations ci-après. Tout d'abord, avant d'arriver au BRGM, j'étais déjà sur d'autres applications (cf. l'histoire dans la section [II.2.1 en page 41](#)). Ensuite, lorsque je suis arrivé au BRGM, je connaissais à peine les ressources minérales et ses concepts autour (géologie ou mine), ce qui n'était pourtant pas un handicap pour le BRGM par rapport à ma mission étant donné que j'étais bien entouré thématiquement (cf. l'histoire [en page 42](#)). Enfin, vu la faible acceptation de l'ACE dans le domaine des géosciences, une majorité

de ma bibliographie sur la méthodologie s'est faite sur d'autres types de ressources naturelles (cf. l'histoire dans la section [II.6.3 en page 70](#)). C'est en tout cas en partie cet esprit transversal en continu qui a sans doute facilité l'ouverture de mon parcours hors du domaine des ressources minérales et notamment pour aller aussi vers le volet socioéconomique de l'après-mine.

☞ Cette transversalité peut éventuellement être interprétée comme une instabilité (pas de point d'ancrage définitif sur un programme BRGM donné dont la liste se trouve dans la [Figure I.6 en page 30](#)). Je la considérerais plutôt comme une faculté d'adaptation et d'ouverture à différentes propositions de projets potentiels tout en gardant une cohérence tout le long du parcours : se focaliser sur la partie « acteurs » du système étudié.

III.4 Regard particulier sur l'avenir de l'ACE dans le travail du candidat

Avant de regarder l'avenir de l'ACE, comprenons brièvement le pourquoi de la situation de sa faible acceptation au BRGM dans le passé.

Au fil des années, j'ai trouvé une partie de la raison pour laquelle, dans ce parcours passé, il y a eu une difficulté au BRGM à accepter l'ACE et les sciences participatives en général.

Depuis sa création (1959), le BRGM est un établissement très orienté expertise, focalisé majoritairement sur l'étude des paramètres et processus physiques du sol et du sous-sol. Il fonctionne avec une prescription, c'est-à-dire que l'État français, entouré d'experts – la plupart en géosciences, s'entend avec le BRGM sur la route à suivre et le BRGM suit globalement les instructions. Cela se reflète dans les actions des agents du terrain. Un agent BRGM – généralement un expert – est souvent immédiatement dans une volonté de convaincre sur la solution technique (paradigme 1 dans la [Figure I.4 en page 26](#)). Il n'a pas toujours l'habitude, en amont ou en parallèle à ses solutions sur un problème donné, d'y préparer d'abord les parties prenantes, en essayant de comprendre leur situation, et ensuite d'aller dans la démarche d'accompagnement de la mise en œuvre des solutions afin d'en diminuer le rejet. Dans une expertise, convaincre est évidemment logique (c'est la méthodologie classique) et pertinent sauf que de ce fait, toute idée, opinion et/ou perception de la situation ne provenant pas de ces experts mais *émergeant* du terrain risque de ne pas être pris en compte. L'expert, ayant une vision plutôt transversale (expériences sur plusieurs années et territoires), n'a pas toujours une vision complète du jeu précis de tous les acteurs d'un terrain donné. En conséquence, les initiatives qui adoptent les sciences participatives au BRGM (paradigmes 2 et 3 dans la [Figure I.4 en page 26](#)) n'ont été que locales à certaines composantes : les ressources en eau (P6 dans la [Figure I.6 en page 30](#)) qui plus est dans un territoire précis, les risques naturels (P5 dans la même figure), les ressources minérales (P7 dans la même figure) à travers ce qui a été décrit dans tout ce mémoire et, à présent, en balbutiement, l'après-mine (P4 dans la même figure).

Ayant compris cette raison expliquant le passé, je vois deux facteurs internes BRGM qui me permettent d'être optimiste par rapport à l'avenir de l'ACE. Le premier est l'ouverture affichée du BRGM vers les sciences participatives (cf. l'histoire [en page 78](#)). Le deuxième facteur interne dont je n'ai eu connaissance qu'au fil de mon parcours est que le monde des géosciences, s'il n'est pas encore motivé par la simulation par ACE, est au moins motivé par l'utilisation des jeux sérieux comme outil de dialogue. Or, les deux peuvent être liés par un même modèle conceptuel (cf. [Figure I.3 en page 25](#)). C'est un point d'accroche intéressant pour introduire indirectement l'ACE auprès des collègues.

À ces deux facteurs internes sont associés au moins 2 facteurs externes au BRGM. Le premier facteur d'optimisme externe est l'avènement irréversible de l'Intelligence Artificielle dans notre société ([Bradley, 2018](#); [Bonechi, 2018](#)). Un de ses liens avec l'économie concerne l'économie de la connaissance et notamment l'utilisation du « Big data » pour en élaborer. En effet, pour reprendre ([Amable and Askenazy, 2005](#)), la période contemporaine est caractérisée aujourd'hui

à la fois par une plus grande importance stratégique de la connaissance, comme source de compétitivité pour les firmes, et par de plus grandes possibilités de combiner les connaissances pour produire de nouveaux savoirs. Les firmes ont alors un besoin accru d'avoir accès aux nouvelles connaissances et d'être capables de les mettre à profit pour leurs propres objectifs, aboutissant au final à l'utilisation du « Big data » pour en extraire. Philippe Lanceleur qui a fait sa thèse sur l'économie de la connaissance (Lanceleur, 2019) affirme ainsi que l'accueil qui sera fait à l'IA influencera beaucoup notre avenir et qu'il faut l'inclure dans un nouveau partenariat. Pour mon parcours futur, l'ACE, un sous-domaine de l'Intelligence Artificielle, a donc un rôle à jouer dans cette économie de la connaissance. En particulier, il a la capacité de reproduire le phénomène « effets papillons » dans une situation de « Big Data » où l'entreprise qui possède la petite donnée en plus, et qui peut en mesurer les effets à court-long terme possède une longueur d'avance sur son concurrent. Le travail de (Lengnick, 2013) est un exemple de modèle ACE simulant ce phénomène. Le second facteur d'optimisme externe concerne le protocole ODD + D, un protocole qui, aujourd'hui, est adopté au fil du temps par ceux qui utilisent les « agent-based » alors qu'il a été conçu par des thématiciens, non par des informaticiens.

Néanmoins, cet optimisme sur l'avenir ne doit pas cacher les difficultés toujours inhérentes à l'ACE. Je me joins à (Seppecher, 2016) qui affirme que si l'ABM est à présent considéré comme une technique pertinente dans des disciplines aussi différentes que la géographie, la logistique ou l'immunologie, ses méthodes restent encore un objet d'étonnement parmi les économistes, qu'ils soient orthodoxes ou hétérodoxes (cf. (Lee, 2011) pour ces notions). J'argumenterais cette réserve des économistes par (entre autres) les conclusions émises par un colloque auquel j'ai participé en 2018 : MagEco (Modèles à base d'AGents en ECONomie computationnelle). Ces conclusions portaient notamment sur les 2 points ci-après.

Le premier point porte sur la validation. Un reproche donné aux ACE est qu'ils sont mal validés. Toutefois, cela peut aussi être vu comme une critique de circonstance car il y a des modèles classiques d'équilibre général dynamique stochastique ou DSGE (Fagiolo and Roventini, 2012), qui sont mal validés et qui pourtant se vendent quand même bien, d'autant plus que selon (Collectif_Commod, 2005), il n'existe pas de théorie générale de validation des modèles.

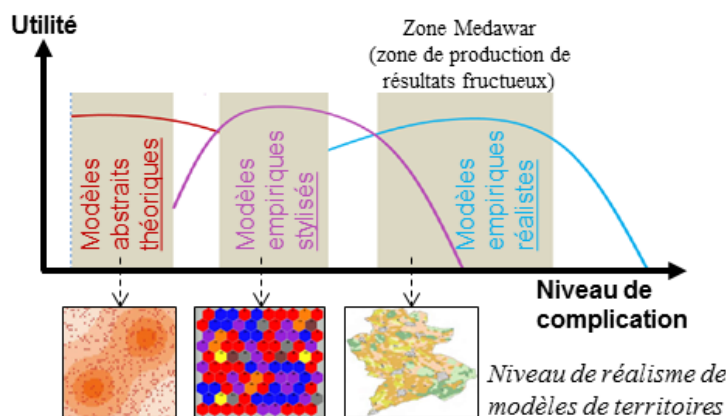
Le deuxième point concerne le niveau de réalisme de l'ACE (ce qui nous fait revenir aussi dans ce mémoire aux paradigmes décrits dans la Figure I.4 en page 26). Pour un économiste pur et dur, s'engager dans un modèle plus réaliste n'a pas de sens. Si l'ACE, supposée plus réaliste, arrive à clairement montrer des éléments non explicables par des modèles moins réalistes (c'est-à-dire à faire la différence), à ce moment-là, cette approche aurait du sens pour un économiste pur et dur. Il faudrait donc que je diffuse davantage mes arguments dans ce sens, acquis au fur et à mesure durant ce parcours. Un domaine dans lequel la simulation ACE pourrait s'imposer est la macroéconomie et la finance, qui montrent des éléments qui n'existe pas dans les modèles classiques : le jeu des réseaux inter-banques et inter-firmes (déjà discuté en page 79, section III.2).

Ce niveau de réalisme a été un point de discussion récurrent dans mon parcours. C'était le cas pour la simulation ACE dans la filière granulats (calcul à l'échelle des sites de production ou de grandes zones de production ?) et dans la filière des métaux stratégiques (calcul au mois ou à l'année ?). La réticence des collègues à aller à un niveau réaliste, outre l'habitude du BRGM de rester à un niveau macro (synthèse régionale de cartes, ...), a été renforcée par le fait que les données correspondantes au niveau réaliste sont des données d'entreprises (donc confidentielles). Le problème de réalisme se présentait aussi pour les jeux de rôles au moment d'AGREGA. S'il y a des acteurs ou des experts qui prônent un jeu moins réaliste et plus simple, d'autres prônent l'inverse. Tel est le cas d'acteurs de la région PACA qui, souhaitant faire une session jeu de rôles avec le projet AGREGA (session non réalisée) ont demandé à ce que ce jeu soit construit sur le département réel des Hautes-Alpes où il n'y a que quelques carrières. En somme, pour l'avenir,

le débat sur le niveau de réalisme - et donc l'acceptation de l'ACE - n'est pas près de se fermer dans l'environnement BRGM.

Pour canaliser le débat concernant le niveau de réalisme d'un modèle, j'entrerais déjà par les 3 types d'environnements d'agents (abstrait, stylisé, réaliste), appliqués à la gestion des ressources, fournis par (Le Page, 2017) et présentés dans la Figure III.1 ci-dessous. Ensuite, pour faire accepter aux collègues l'idée d'aller à un niveau de réalisme lorsque nécessaire, j'essayerais de leur inculquer la décorrélation qui existe entre « échelle de calcul » (le complexe) et « échelle de restitution » (le plus simple) comme suggéré par exemple par le décideur politique Lynn Hamill (Hamill, 2010). Cette décorrélation permettrait aussi de montrer l'intérêt de l'approche vu sa capacité à capter des phénomènes émergents (cf. section I.1.1 en page 20), parfois importants pour la décision mais non détectés si le modèle était resté à un niveau moins réaliste. Enfin, cette décorrélation pourrait aussi servir d'argumentations pour essayer d'obtenir des données confidentielles d'entreprises (car ces données ne serviront que pour le calcul en background).

Figure III.1 : Un outil que le candidat pense utiliser comme guide pour aider ou pour débattre sur le choix du niveau de réalisme de ses futurs modèles.



Source : schéma adapté de (Le Page, 2017).

La Figure III.1 ci-dessus présente un outil à utiliser conjointement avec celui sur les paradigmes, illustré dans la Figure I.4 en page 26.

Enfin, et ce sera une démarche orientée vers moi-même, il faudrait de toute façon, pour l'acceptation, renforcer le couplage ACE / approche mathématique, et voir un ACE comme un outil complémentaire et non une substitution à cette approche classique (Rahmandad and Sterman, 2008; Claudius et al., 2017). Un autre point de conclusion de MagEco va dans ce sens : rechercher des points communs (ce qui rassemble) entre les modèles issus de différentes pensées économiques. Ce n'est pas une tâche facile mais peut-être souhaitable.

Aujourd'hui, dans le domaine des ressources minérales, il y a, à ma connaissance, seulement 3 travaux (hors les miens) qui utilisent les ACE : (Knoeri et al., 2013), (Riddle et al., 2015) et (Yuan et al., 2019). C'est peu. En même temps c'est récent et, curieusement, ils agissent tous au niveau macroéconomique, en traitant la problématique de la criticité des métaux stratégiques.

- ☞ Toute l'analyse menée dans cette section m'amène à la conclusion que pour l'avenir, je préconiserais, pour les filières ressources minérales :
- de renforcer les jeux de rôles / simulation ACE version stylisée comme outil d'analyse des problématiques micros, vu que le monde des géosciences y adhère (réaliser une simulation ACE version réaliste, pour cette échelle, rencontre pour l'instant une faible acceptation) et, en revanche ;
 - de renforcer la simulation ACE version réaliste comme outil de calcul de la problématique macro, en l'occurrence celle de la criticité des métaux stratégiques (réaliser des jeux de rôles à cette échelle est plus difficile à mettre en œuvre).

Conclusion de la Partie C

*« Tout est devant nous. Le chemin ne finit pas.
Plus on avance, plus la route s'ouvre à nos yeux ».*
- Henry Miller

CETTE PARTIE A DRESSÉ globalement mon regard sur les acquis scientifiques accumulés durant mon parcours.

☞ Si le lecteur cherche une zone de ce mémoire qui pourrait résumer très brièvement la contribution de mon parcours pour le BRGM, ce serait la [Figure I.4 en page 26](#) : renforcer la place des ressources minérales dans les paradigmes 2 (simulation par l'ACE) et 3 (délibération multi-acteurs) dans un contexte essentiellement dominé par le paradigme 1 (expertise).

Le bilan, au regard du futur, est que malgré les obstacles, ma démarche de recherche est prometteuse car a priori inévitable et ce, pour au moins 3 raisons.

La première raison est l'avènement progressif (a) dans la société en général et (b) dans l'économie en particulier, d'une des origines du monde des « agents », à savoir l'Intelligence Artificielle et toute la complexité qu'elle peut appréhender et gérer. Ici, l'aspect 'économie' concerne notamment l'intensification de la compétitivité des entreprises, pilotée par l'économie du savoir, en complexité croissante.

La deuxième raison est le renforcement progressif de l'utilisation des jeux sérieux (plus acceptés par le monde des géosciences), dont le monde des « agents » peut permettre une implémentation informatique.

La troisième raison est qu'au BRGM, il y a aujourd'hui un vent d'évolution caractérisé par une volonté stratégique - affichée publiquement - de l'entreprise d'intégrer de plus en plus les sciences participatives dans ses actions futures.

Une fois établie cette interprétation du parcours du passé, la partie suivante propose ce qu'il m'est possible de faire avec cet acquis : les utiliser comme arguments, d'abord, pour offrir mes capacités à diriger des recherches, et ensuite, pour poursuivre/construire le programme collaboratif scientifique de recherche actuelle/future qu'aujourd'hui, je suis capable de proposer, de piloter et de faire réussir.

PARTIE D : CAPACITÉ ET PERSPECTIVES

« L'avenir n'est jamais que du présent à mettre en ordre »
- Antoine de Saint-Exupéry

Chapitre IV. Offre du candidat en capacité à diriger des Recherches

« L'art de diriger consiste à savoir abandonner la baguette pour ne pas gêner l'orchestre ».
- Herbert Von Karajan

LN S'APPUYANT SUR LES ACQUIS du parcours passé, ce chapitre vise à argumenter sur mes capacités à diriger des recherches pour la suite de ma carrière. Précisons que ce chapitre se focalise sur mon aptitude à diriger des recherches. Quant aux projets de recherche futurs en eux-mêmes, que je serais capable de proposer, pour moi (avec mes collègues) et/ou pour mes doctorants, ils seront présentés plutôt dans le [Chapitre V](#).

Contenu du chapitre

IV.1 Préambule : motivations du candidat pour une soutenance de HDR.....	91
IV.2 Lettre aux membres du jury : offre en capacité.....	92

Dans la section [IV.2](#), je m'adresserais aux membres du jury pour présenter mes arguments dans le cadre d'une demande d'Habilitation. Au préalable, la section [IV.1](#) explique les raisons qui me motivent à présenter cette demande.

☞ En fonction de la catégorie à laquelle le lecteur pense appartenir (cf. tableau [en page 16](#)), il peut poursuivre sa lecture par ce chapitre, s'il le souhaite, ou se référer de nouveau à la Figure [en page 18](#) pour identifier d'autres chemins.

IV.1 Préambule : motivations du candidat pour une soutenance de HDR

La HDR est pour moi une opportunité pour faire un point d'étapes sur mes travaux scientifiques et sur la carrière que je mène actuellement dans la Direction des Géoressources (c'est-à-dire ressources minérales et géothermie). Mon objectif est d'avoir un meilleur affichage et un (re)positionnement dans la politique actuelle du BRGM pour, ensuite, pouvoir proposer à celui-ci une offre adaptée en capacité de pilotage de Recherches.

Par rapport à cet objectif, ma motivation pour une soutenance d'une HDR tourne (au moins) autour des 2 points développés ci-après.

Le premier point est que dans le domaine des géoressources, il n'y a actuellement pas au BRGM un co-directeur HDR qui soit disponible au niveau opérationnel pour assurer de manière proximale et continue le suivi des thèses en économie ou en socio-économie des géoressources (je parle de « co-directeur » car le BRGM n'étant pas habilité à délivrer une thèse, aucun de ses agents ne peut être « directeur » de thèse à moins d'être inscrit dans une école doctorale). En ce qui concerne l'économie, il y a bien un agent BRGM qui pourrait assurer cette tâche pour les ressources minérales. Toutefois, non seulement ses compétences ne couvrent pas la géothermie, mais en outre, il est aujourd'hui affecté à d'autres fonctions qui ne relèvent pas du domaine opérationnel du BRGM. De ce fait, pour les futures thèses en économie ou en socio-économie des géoressources, il y aura très probablement un manque de co-directeurs de thèse dans les mois

et années à venir. Ce cas est aussi valable pour le volet socio-économique de l'après-mine, un domaine dans lequel je me suis investi depuis peu (cf. la section [II.5.3 en page 69](#)).

Le deuxième point concerne mon désir de me repositionner scientifiquement dans la stratégie d'avenir du BRGM, notamment par rapport au domaine des sciences humaines et sociales (SHS). Pour rappel, il a été développé [en page 78](#) que le BRGM souhaite, à l'avenir, augmenter les interactions avec les associations environnementales, s'impliquer dans les sciences participatives, dans la politique de médiation scientifique et dans la transmission des connaissances scientifiques, d'où ce souhait. Cela ne signifie cependant pas qu'il y a actuellement au BRGM une démarche de créer une nouvelle équipe SHS. Cela signifie en revanche que le BRGM, notamment en recherche, souhaite établir des collaborations externes avec - entre autres - des universités ou des centres de recherche du domaine des SHS (le BRGM ne va pas sous-traiter une activité scientifique mais collaborer). Cependant, pour que cette collaboration puisse se faire, il faudrait déjà parler le même langage. Aussi, il est nécessaire pour le BRGM d'identifier des compétences internes comme interface pouvant porter cette collaboration, des compétences qui ont une sensibilité SHS. C'est dans cette dynamique que je souhaiterais m'inscrire car ces compétences et ces objectifs du BRGM sont en totale adéquation avec mes problématiques de recherche actuelles dans le volet recherche-action participative. Plus concrètement, je souhaiterais contribuer, côté BRGM, à la mise en place, avec les collègues internes et les collaborateurs externes, de cet interfaçage entre géosciences et société. Cette contribution peut se faire au travers des programmes scientifiques, en priorité à ceux à portée socioéconomique (cf. la [Figure I.6 en page 30](#)).

C'est à partir de ces motivations non exhaustives que je présente maintenant mon offre en capacité à diriger des Recherches.

IV.2 Lettre aux membres du jury : offre en capacité

☞ Dans mon inspiration rédactionnelle, j'ai rédigé mon offre en capacité, adressée aux membres du jury, dans le même style qu'une lettre de motivation « comme si » je postulais à un emploi proposé.

Madame, Monsieur le membre du jury,

À travers cette lettre, je formule une offre en capacité à diriger des recherches dans la discipline des sciences économiques, et qui mobilisera aussi d'autres disciplines.

Je pense répondre aux critères demandés par une Habilitation à Diriger des Recherches, pour les raisons développées ci-après.

En premier lieu, durant tout mon parcours d'au moins 17 ans depuis mon doctorat, plus de 90 % de mon temps a été consacré à des activités de recherche. Ces activités ont abouti à des publications scientifiques ou à des communications en congrès dont la liste peut être trouvée [en page 10](#) de ce mémoire. Cette activité de publication constitue, comme vous le savez, un des critères importants pour une Habilitation.

En second lieu, mon parcours faisait systématiquement intervenir plusieurs disciplines, ce qui est un acquis important pour maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique et technologique suffisamment large.

Premièrement, le parcours a été multidisciplinaire. Si, dans la majorité du temps de parcours, les questions à résoudre se trouvaient dans le domaine des ressources minérales, elles se trouvaient aussi, pour certains projets, dans le domaine de la géothermie et de l'après-mine respectivement. Ce travail multiple a renforcé mes acquis d'avant-thèse qui portaient sur le domaine des ressources agricoles et des risques naturels.

Deuxièmement, le parcours a été interdisciplinaire. Ma thèse était issue de la discipline des sciences informatiques. Pour différentes raisons expliquées notamment dans la section [II.6.1 en page 69](#), j'ai ensuite évolué vers les sciences économiques tout en m'appuyant cependant sur mes acquis en informatique, comme la fois où j'ai utilisé les « Machine-Learning » pour implémenter des règles de décisions dans le marché des métaux stratégiques ou la fois où j'ai manipulé du « Big Data » dans la gestion du transport des granulats à l'échelle de régions françaises. Cette interdisciplinarité m'a aussi permis de développer une plateforme de simulation informatique sur laquelle sont implémentés et simulés mes modèles (socio)économiques, souvent spatialement explicites.

Troisièmement, le parcours est pluridisciplinaire car les différents projets auxquels j'ai contribué ou les personnes que j'ai encadrées ont apporté chacun leurs connaissances dans son domaine respectif (mathématiques, statistiques, géologie, géographie, économie, informatique, environnement, etc.) par rapport à l'édifice méthodologique que j'ai essayé de mettre en place au fil du parcours.

Enfin, le parcours a été transdisciplinaire via la recherche-action participative dans laquelle différents acteurs ayant différents compétences et intérêts discutent dans un même espace d'intelligence collective, notamment dans les jeux de rôles. Cette diversité est pilotée par un fil conducteur : l'étude du composant « acteurs hétérogènes » du système étudié.

Toujours dans cette argumentation concernant la maîtrise d'une stratégie de recherche dans un domaine scientifique et technologique suffisamment large, mes recherches ont couvert à la fois la micro-économie et sa dynamique (dialogue direct entre acteurs d'un territoire ...) et la macro-économie et sa dynamique (effet de la politique d'un pays sur un autre en termes d'approvisionnement en ressources ...).

En troisième lieu, mon parcours m'a permis de mûrir en conduite de projet de recherche et parvenir aujourd'hui à une réelle autonomie scientifique. Dans les premières années de mon parcours post-thèse, j'ai été intégré dans une structure de recherche où les projets étaient déjà définis. Ma mission consistait alors « uniquement » à les réaliser. Par la suite, et ce jusqu'à présent, j'ai développé mes propres sujets en cohérence avec les besoins du BRGM et je les ai conduits, d'abord en interne, puis en externe, dans un cadre collaboratif, notamment en tant que coordonnateur (2 projets ANR notamment). Le parcours a présenté des difficultés au sens où j'ai participé au développement d'une activité nouvelle pour le BRGM : l'approche « agent » appliquée à l'économie (ACE), une approche dont l'acceptation n'est pas encore acquise dans le monde des géosciences alors que l'approche est justifiée (arguments développés le long de ce mémoire). Malgré cette difficulté, ma persévérance dans la réflexion, il est vrai aidé parfois par des conditions extérieures (comme l'arrivée de l'Intelligence Artificielle dans la société) me permet aujourd'hui de mieux positionner mon approche pour mieux y intéresser les collègues, et ainsi d'asseoir progressivement les projets de recherche scientifique que j'aimerais proposer / continuer dans le futur. Les différents projets que j'ai menés ont été aussi pour moi l'occasion, en parallèle, d'encadrer différentes personnes issues de différentes disciplines comme cela a déjà été évoqué précédemment. Je pense ainsi posséder une capacité à encadrer de jeunes chercheurs. Enfin, j'assure également des cours avec des étudiants, à travers la méthode des jeux de rôles, ce qui, au passage, est un bon entraînement sur l'accompagnement d'un processus collectif de décision, en parallèle à celui mené sur le terrain.

En dernier lieu, mon parcours scientifique m'a permis de mettre en place une méthodologie de recherche-action participative dans une période où la société souhaite de plus en plus se rapprocher de la recherche. Cette méthodologie s'appuie notamment – en termes de développement technologique – sur des outils de modélisation / simulation prospectif par ACE, de jeux de rôles multi-acteurs, et de délibération sur les scénarios prospectifs. Ces outils sont complémentaires au sens où les deux premiers peuvent expliciter les paramètres spatiotemporels

mais souvent pour un seul scénario en même temps alors qu'à l'inverse, l'outil de délibération peut représenter plusieurs scénarios mais en n'intégrant pas le volet spatiotemporel.

Pour construire, entre autres, ces outils, j'ai pu collecter des ingrédients :

- pour guider les différentes étapes principales d'un projet de gestion d'un territoire dans une démarche participative ;
- pour identifier les acteurs économiques du projet, vers qui ensuite seront valorisés et transférés les résultats innovants obtenus, rapportant ainsi économiquement au projet producteur également ;
- pour construire un modèle de simulation ACE ou un jeu de rôles via un langage de plus en plus standard, et qui faciliterait ainsi la compréhension du modèle par un utilisateur final – important pour une approche pas encore entièrement acceptée - ainsi que sa réutilisation par d'autres chercheurs ;
- pour valider un modèle ACE dans un contexte multi-échelle où chaque utilisateur trouverait son échelle d'intérêt (micro à macro) ;
- pour impliquer les parties prenantes du territoire dès le début d'un processus de modélisation scientifique ;
- pour accompagner les parties prenantes dans un processus collectif de décision.

Un exemple d'application de ces ingrédients dans la réflexion en cours sur la mine artisanale en Afrique, peut être trouvé en [Annexe II](#), section « [la formalisation du secteur « mine artisanale » \(ASM\)](#) », page 141.

☞ C'est avec tous ces acquis que je pense élaborer mon offre de recherche de demain, que je décris à présent.

D'une manière globale, mon offre en capacité à diriger des recherches sera mise au service de toute question de recherche BRGM nécessitant la mise en œuvre d'outils ou de méthode d'accompagnement sociétal des acteurs dans les 3 programmes scientifiques BRGM suivants : les ressources minérales primaires et secondaires (P7 dans la [Figure I.6 en page 30](#)), les impacts miniers et industriels dans le sol et sous-sol (P4 dans la même figure) et le sous-sol dans la transition énergétique (P8 dans la même figure).

De par sa nature, mon offre de recherche-action participative sera donc conduite avec l'aide de la société dans une démarche de coconstruction de connaissances et pourra traiter des problématiques posées aussi bien à l'échelle d'un territoire (microéconomie) qu'à l'échelle mondiale (macroéconomie). Elle n'exclura pas une coconstruction de connaissances à des fins de publications scientifiques. Cependant, les résultats envoyés à cette destination - que je considère comme intermédiaire - devraient par la suite être intégrés dans – et appropriée par - la société avec l'aide de la société. Pour l'échelle internationale, et en prenant le cas du marché des métaux stratégiques, la recherche-action participative ne vise pas à faire dialoguer des acteurs de chaque pays impliqué (démarche irréaliste) mais par exemple de faire dialoguer, devant les supports idoines, les acteurs français au sein du Comité des métaux stratégiques ou COMES (introduit [en page 54](#)).

Un premier niveau de ce que j'appellerais la société (ou plutôt ici l'environnement socioprofessionnel) concerne mes collègues BRGM. En effet, le premier client de cette offre de capacité de recherche en tant qu'interface « géosciences et société », si l'offre est validée, serait d'abord le BRGM qui jugera de la correspondance de l'offre à ses besoins. Certes, mon parcours a montré que ce que je propose sur le plan scientifique va peut-être plus intéresser des personnes issues des SHS ou de l'informatique que des géologues ou des hydrogéologues. En revanche, je pense pouvoir fédérer et entraîner plusieurs personnes dans un enthousiasme qu'ensembles, il est possible de faire évoluer les choses. En particulier, pour mener à bien un projet de recherche, l'idéal serait de créer une équipe de projet qui n'est pas préoccupée par la seule production de

connaissances, mais aussi par sa valorisation et par son bon usage par rapport à des problèmes de société. Pour construire cette équipe, je m'appuierai sur des personnes qui ont une connaissance sur plusieurs types d'analyse ou de processus (jeu, simulation, autres outils comme le SIG, ...) et sur leur évaluation croisée. Au fil du parcours, j'ai progressivement identifié ces personnes.

Quel que soit le groupe cible de mes études futures, et que celui-ci soit à l'intérieur ou à l'extérieur du BRGM, je tiendrai compte de leur diversité, de leur niveau de connaissances et/ou de leur position sociale. Par exemple, je prendrais en considération le fait que les artisans miniers en Afrique ont un accès très limité à l'éducation et ont une structure sociale fortement hiérarchisée, alors que c'est moins le cas en Europe. Mes compétences scientifiques et ma personnalité (cf. j'en ai parlé [en page 3](#)) seront sensibles à ces conditions.

Pour mener à bien tout cela, je pourrais mobiliser entre autres les ingrédients mentionnés précédemment. Cependant, cette mobilisation s'effectuera de manière souple c'est-à-dire dépendra de la nature du projet (ex : de l'échelle de l'étude – micro ou macro), des acquis et compétences des collègues internes et des collaborateurs externes. Elle saura également que les acteurs de terrain ont aussi déjà d'autres outils à leur disposition (ex : base de données, document de planification, etc.) qu'ils mobiliseront lors des différents dialogues. Ainsi, mon attitude consistera à être un chef d'orchestre sans vouloir avoir envie de jouer de tous les instruments de musique. Je pense néanmoins qu'il est important pour une offre de capacité de recherche d'avoir un minimum de bagages à proposer pour pouvoir mener à bien les travaux dans le futur et pour être crédible vis-à-vis des futurs partenaires, d'où les ingrédients susmentionnés.

En ce qui concerne les réflexions scientifiques à proposer à mes futurs thésards, à l'intérieur d'une activité globale, cela dépendra du projet. Néanmoins, pour une première réponse (très) générique, et si je reprends la méthode INTEGRAAL – qui est ici le conducteur opérationnel de l'activité globale en question – et notamment les étapes principales de celle-ci décrites dans la [Figure II.5 en page 61](#) (identifier, structurer, représenter, juger, s'interroger), les thésards pourraient par exemple avoir deux sous-objectifs, situés respectivement dans les étapes « représenter » et « s'interroger ».

Le premier sous-objectif de leur thèse serait de répondre à la question sociétale posée dans leur thèse, par la coconstruction, avec les acteurs du territoire d'étude, d'un modèle de simulation participative qui décrirait une représentation partagée (par ces acteurs) de ce territoire et de ses enjeux (l'identification des acteurs intégralement ne ferait pas forcément partie de la thèse).

Le deuxième sous-objectif de leur thèse, serait d'analyser les apports du dispositif mis en place : comment le dispositif coconstruit a aidé les acteurs dans l'atteinte des objectifs et comment ce mode de travail pourrait être amélioré et élargi à d'autres contextes. Les résultats seront ensuite remontés dans l'activité globale.

Autour de cet encadrement scientifique, j'aimerais préparer les thésards à savoir exposer leurs travaux en 20 minutes (format congrès) et en 45 minutes (format soutenance). J'aimerais aussi leur inculquer, dès le début de leur thèse, cet état d'esprit « sciences vers société » de leurs travaux, allant donc au-delà de la seule production de connaissances scientifiques, surtout dans un contexte particulier de l'ACE (si le sujet porte sur l'ACE), encore en quête de reconnaissance. Par rapport à ce dernier objectif, les événements comme « ma thèse en 180 secondes » ([Thèse_180, n.d.](#)) seront privilégiés si le BRGM donne son accord. Les ingrédients mentionnés précédemment seront aussi enseignés au thésard. Cependant, tout comme avec les collègues et partenaires, les thésards ne seront pas obligés de reprendre ces ingrédients entièrement. Ils peuvent même en formuler de nouveaux. De mon côté, je respecterais comme attitude d'encadrement, ce que ([Pink, 2016](#)) a suggéré comme une des conclusions de ses études en sciences sociales : l'accordage. Cela signifie être un « Servant as Leader » en me mettant dans

les perspectives du thésard et en essayant de voir le monde par les yeux de celui-ci. Expliciter une attitude d'encadrement est important car s'il y a une des leçons que j'ai apprises de ce parcours, c'est qu'un projet de recherche est avant tout une relation humaine (si problème il y a, à résoudre en premier) avant d'être une relation intellectuelle.

Pour résumer, je pense disposer de connaissances, d'expériences, et d'une aptitude à maîtriser une stratégie de recherche dans un domaine scientifique et technologique suffisamment large. Je pense également, de par mon parcours, posséder les caractéristiques humaines nécessaires à la conduite d'un projet - des caractéristiques toujours essentielles pour accompagner ou pour piloter un projet scientifique. Les capacités que j'offre incluent également mes obligations à mobiliser les collègues internes au BRGM pour composer une capacité de recherche distribuée à travers plusieurs équipes et/ou plusieurs compétences qui se complètent. Enfin, ces obligations couvrent aussi la mobilisation de la société, la destination finale de toute démarche de recherche-action participative.

Pour terminer, je serai, par rapport à tous les futurs travaux que j'aurais à mener, naturellement actif dans la recherche de cofinancement (Horizon Europe, ANR, Banque Mondiale, ADEME, etc.).

En espérant vous avoir vaincu de mes capacités à diriger des recherches, je vous prie d'agréer, Madame, Monsieur le membre du jury, l'expression de mes salutations respectueuses.

Fenitsoa An'riamasinoro 

Chapitre V. Perspectives de recherche

*« Si l'on m'apprenait que la fin du monde est pour demain,
je planterais quand même un pommier »*

- Martin Luther King

ALORS QUE DANS LE [Chapitre IV](#), je me suis focalisé sur mes capacités, dans ce chapitre, je me focalise sur la nature d'un programme de recherche que je suis capable de proposer, de piloter et de faire réussir.

Contenu du chapitre

V.1 Les questions de recherche concrètes (à court-moyen terme)	97
V.1.1 Poursuite du volet « mine artisanale » en Afrique	98
V.1.2 Ouverture et renforcement sur le volet « après-mine » en France.....	98
V.1.3 Amorçage du bouclage macroéconomique du volet « métaux stratégiques »	98
V.2 Les questions de recherche plus génériques (jusqu'à long-terme)	99

La description de mon programme de recherche se fera à deux niveaux.

Le premier niveau (Section [V.1](#)) se veut être dans le concret en décrivant clairement les projets applicatifs que je pourrais diriger à court-moyen terme (5 ans). Le second niveau (Section [V.2](#)) se veut plus ouvert et présente les types de questions de recherche plus génériques, auxquelles je pourrais répondre sur le long terme. Le terme « générique » signifie que ces questions sont valables indépendamment de leur champ d'application, que le programme scientifique BRGM concerné soit celui des ressources minérales ou de l'après-mine ou de la géothermie, que l'on développe des jeux de rôles plateau ou un outil de simulation informatique, etc. Ce deuxième niveau présente donc un cadre général.

☞ En fonction de la catégorie à laquelle le lecteur pense appartenir (cf. tableau [en page 16](#)), il peut poursuivre sa lecture par ce chapitre, s'il le souhaite, ou se référer de nouveau à la Figure [en page 18](#) pour identifier d'autres chemins.

V.1 Les questions de recherche concrètes (à court-moyen terme)

Pour décrire ce premier niveau, je reprendrai ici la conclusion concernant le regard sur l'avenir (Section [III.4](#)) et que j'énonce [en page 85](#) : plutôt des outils de type jeux de rôles ou simulation stylisée pour l'échelle micro et plutôt des outils de simulation réalistes pour l'échelle macro.

Pour les projets à l'échelle micro, j'envisagerais plus concrètement de me renforcer sur deux des trois projets en cours situés à cette échelle. Ces projets ont tous commencé en 2020 pour une durée prévisionnelle de 5 ans :

- le projet « mine artisanale » (Section [V.1.1](#)) ;
- le projet « après-mine ». (Section [V.1.2](#)).

L'autre projet en cours sur l'acceptabilité minière en Europe (cf. section [II.5.1 en page 68](#)) se termine en octobre 2020.

Pour les projets à l'échelle macro, il y en aurait un à élaborer dans l'immédiat (Section [V.1.3](#)), à mener probablement sous forme de thèse.

V.1.1 Poursuite du volet « mine artisanale » en Afrique

Par rapport au projet en cours (2020), les questions de recherche sur ce volet – la problématique de la formalisation du secteur - ont déjà été décrites dans la section [II.5.2 en page 68](#). Un premier prototype de jeu de rôles, version générique (c'est-à-dire associé à aucun territoire réel) devrait voir le jour en vue d'un premier test de terrain notamment au congrès africain sur la géologie (CAG) dans sa 28^{ème} édition au Maroc en octobre ([CAG 28 announcement, 2019](#)). Dans ce congrès, j'animerai des sessions de jeu et de dialogue avec les acteurs participants, majoritairement issus d'Afrique. Ceci n'est que le début : l'idée serait ensuite, pour les années qui suivent, de déclencher des partenariats avec les Africains (ex : avec un financement Banque mondiale), en déclinant la version générique vers une version plus ancrée à un territoire en particulier. Les données géologiques, gîtologiques, etc. concernant ces territoires sont actuellement collectés par une équipe de géologues du BRGM.

Par ailleurs, les questions de recherche sur ce volet ne devraient pas se limiter à la formalisation du secteur car la problématique de la filière est vaste et ces questions sont de toute façon liées entre elles. Il suffit de se rappeler le cas du Burkina Faso en 2005, décrit dans ce parcours (cf. section [II.3.1.2 en page 46](#)), avec des questions portant en même temps sur les ruées et sur la gouvernance de la filière. Une autre question qui intéresse actuellement le BRGM concerne les conflits d'usage transfrontaliers qui nécessitent naturellement du dialogue. On voit bien ici la place ascendante que pourrait prendre la recherche-action participative dans les années à venir dans le secteur minier en Afrique.

En parallèle à l'accompagnement de ces problèmes concrets du terrain, mon idée serait aussi de renforcer le volet éducatif (avec des universités en Afrique, etc.) via ces méthodes.

V.1.2 Ouverture et renforcement sur le volet « après-mine » en France

Par rapport au projet en cours (2020), les questions de recherche sur ce volet – la fabrique du risque sanitaire face aux transferts de polluants dans un territoire en France - ont déjà été décrites dans la section [II.5.3 en page 69](#). Ces questions ne devraient pas être exhaustives. Elles pourraient aussi concerner par exemple les freins actuels à la transmission des informations, empêchant une compréhension partagée de la situation sur l'après-mine.

En termes de processus, il y a une similarité avec le volet « mine artisanale » au sens où des échanges avec des acteurs de terrain dans un cadre de recherche-action participative seront réalisés, notamment à partir de 2021 (2020 concerne uniquement la bibliographie). Je ferai partie intégrante de ce processus. Des sessions de jeux de rôles que j'animerai pour des étudiants (dans un premier temps) seront aussi programmées.

V.1.3 Amorçage du bouclage macroéconomique du volet « métaux stratégiques »

Un bouclage macroéconomique d'un modèle à une échelle micro (plus hétérogène) permettrait d'accroître la confiance que l'on peut avoir dans ce type de modèle, surtout en termes d'évaluation de politique publique. J'envisagerais de faire avancer les modèles du marché des métaux stratégiques dans ce sens. Cet objectif de bouclage, envisagé sur 5 ans, va se faire en deux temps

Dans un premier temps, il faudrait terminer la représentation de la complexité des métaux stratégiques le long de la chaîne des valeurs, avec comme application le cobalt. Si les modèles

développés durant le parcours ont porté sur une substance issue d'un seul maillon de la chaîne (cf. page 79), la suite porterait cette fois-ci sur l'ensemble des maillons. La question est la suivante, transversale aux maillons : *quels sont les effets de la variation du comportement d'un ou de plusieurs des pays producteurs (c'est-à-dire le premier maillon) en minerai de cobalt sur l'importation d'un pays utilisateur du produit final contenant du cobalt – probablement en version transformée ? En particulier, y a-t-il des effets papillon (exemple : effets d'une ouverture d'une mine de cobalt en Russie sur cet importateur) ? si oui, à quelle échelle de temps se feront-ils ressentir (exemple : 15 ans) ?*

Pour cela, et en partant du modèle ACE du cobalt (Andriamasinoro and Danino-Perraud, 2019), il sera approfondi l'identification des règles de décision des agents (les pays) sur tous ces maillons, avec notamment, pour élaborer ces règles dans la tête de l'agent, un couplage entre l'apprentissage offline (algorithme généré à partir du « Machine-Learning » sur les données du cobalt) et online (algorithme généré par un apprentissage progressif, par l'agent, de son environnement c'est-à-dire les autres pays). Il sera aussi question de renforcer la validation de ce modèle ACE en intégrant dans celui-ci les données issues du MFA cobalt effectué par (Danino-Perraud, 2019) à l'échelle de l'Europe.

Dans un deuxième temps, le bouclage sera ensuite amorcé en effectuant un couplage entre le modèle ACE résultant et ce qu'on appelle le SFC ou « Stock-Flow Consistency » (Nikiforos and Zezza, 2012), en s'inspirant de ce qu'ont réalisé (Seppecher, 2016) ou encore (Caiani et al., 2016). Le SFC permettra d'introduire dans le modèle les paramètres financiers, ce qui manquait durant le parcours (cf. page 79). Il s'assure que tous les flux financiers viennent de quelque part et vont quelque part et que les stocks enregistrés comme un passif pour quelqu'un est un actif pour quelqu'un d'autre, et ainsi éviter une absence de trous financiers dans le modèle. C'est donc un mécanisme de vérification de la cohérence logique globale du modèle que, comme le stipule (Caiani et al., 2016), tout modèle macroéconomique – et donc celui des métaux stratégiques – devrait avoir comme propriété.

V.2 Les questions de recherche plus génériques (jusqu'à long-terme)

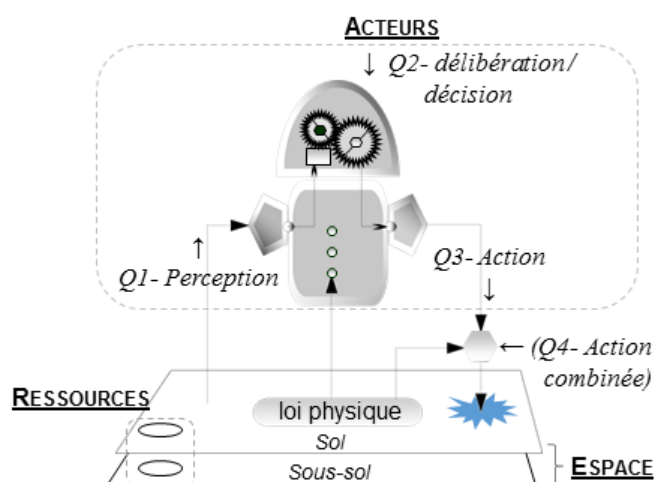
Ce niveau est important pour éviter l'impression que les projets futurs sont exhaustifs, limités uniquement aux projets concrets de la section V.1. En réalité, une vision plus large du programme du futur peut aussi être proposée.

Pour décrire ce niveau je vais :

- reprendre un schéma conceptuel sur les agents, fournis par (Calderoni, 2002), basés sur une triade agent « perception – délibération – action ». L'intérêt de ce schéma théorique est (a) de représenter les trois types de composants du processus de décision d'un agent ou d'un acteur et (b) d'explicitier également le type de composant implémentant des lois physiques ;
- le couvrir par la triade « acteurs – ressources – espaces » de la Figure II.2 en page 45 ;
- contextualiser l'ensemble dans le domaine du sol et du sous-sol (domaine BRGM).

La Figure V.1 en page 100 en représente l'ensemble mais simplifié à un seul acteur pour des raisons de lisibilité. Dans cette figure, les types de questions de recherche que je pourrais piloter ou accompagner dans le futur correspondent à l'un et/ou l'autre des 3 composants Q1, Q2, Q3 de ce système BRGM « acteurs – ressources – espaces ».

Figure V.1 : Le champ de questions de recherche génériques que le candidat pourrait aborder dans ses perspectives par rapport au système global sol / sous-sol.



Source : schéma adapté de (Calderoni, 2002) et de la Figure II.2 en page 45.

Les questions génériques sont les suivantes :

- Q1 - perception : comment les membres de la société d'un territoire à enjeux liés au sol / sous-sol perçoivent-ils (a) les relations entre eux ou (b) l'état de leur sol / sous-sol ou (c) l'état de leurs ressources ? comment caractériser cette perception ? quels indicateurs ?
- Q2 – délibération / décision : quelles sont les règles de décision d'un acteur (réel si jeu de rôles plateau ou agent si simulé), dans un cadre individuel ou collectif ? quels sont les critères qui l'ont amené à cette décision et les conditions dans lesquelles cette décision est valable ?
- Q3 - action : quels sont les impacts de cette décision (individuelle ou collective) sur le sol / sous-sol, sur les ressources et sur les autres membres de la société ?

La question *Q4 (action combinée)* mérite précision. Il arrive qu'une action décidée par un acteur se heurte à des lois physiques (ex : frappe sur une roche, ralentie par la dureté de la roche). Mon champ de recherche se limitera normalement à *Q3*. Cependant, en fonction des compétences mobilisées, cette combinaison de lois physique et anthropique pourrait être prise en compte. Je n'exclus pas non plus de travailler sur les actions situées, c'est-à-dire un passage direct de *Q1* à *Q3*.

Ces questions de recherche génériques pourraient mobiliser des outils dont j'ai pris connaissance durant le parcours mais qui ne sont pas mentionnés dans les projets à questions de recherche concrètes (Section V.1). Je pense notamment aux tableaux d'entrée-sortie ou TES (page 64) et aux cartes cognitives (page 65). D'ailleurs, durant les discussions dans ces projets concrets, rien n'empêche à ce que ces outils émergent finalement comme nécessaires à ces projets également.

PARTIE E : ÉPILOGUE

*« Il est peut-être agréable qu'un voyage prenne fin
mais, finalement, c'est le voyage qui compte »*
- Ursula Le Guin

Conclusion générale

« Communiqué final.

*La hantise des diplomates qui doivent réussir à expliquer en trois minutes
ce qu'ils n'ont pas réussi à analyser en trois jours »*

- Jacques Mailhot

LE PRÉSENT MÉMOIRE RETRACE le parcours de recherche scientifique que j'ai effectué au BRGM (service géologie national français) entre 2003 et 2020. Le parcours s'appuie sur l'utilisation des « Agent-based Computational Economics » ou ACE, pour appréhender l'analyse économique et socioéconomique des filières ressources minérales (or, quartz, granulats, lithium, cobalt) dans sa complexité. De plus, et selon les applications, l'étude de ces filières ressources minérales peut aussi inclure la chaîne des valeurs de leur économie circulaire et les impacts environnementaux.

Chronologiquement, mon parcours se caractérise par 2 grands itinéraires, définis plus en termes de paradigme que de projets scientifiques. Le premier itinéraire a été caractérisé par une activité de modélisation par ACE à des fins de pure production de connaissances et d'évaluation de leur qualité du point de vue scientifique. Puis, au fil de mes réflexions, j'ai admis que pour m'assurer de la valeur ajoutée effective de ce type de travail scientifique, il fallait aussi m'intéresser aux conditions de son appropriation par la société. La nouveauté à porter dans ce deuxième itinéraire a été d'intégrer cette modélisation ACE dans une démarche de recherche-action participative (RAP) afin d'évaluer la pertinence des connaissances du point de vue sociétal. Et cette démarche devient nécessairement un composant à part entière des programmes de recherche. Les activités dans ce second itinéraire, et pour une problématique donnée d'une filière ressources minérales, ont été menées dans un objectif d'apprentissage social et de co-construction de scénarios prospectifs de gestion de la filière. Au niveau outils et méthodes, la RAP s'est concrétisée par la simulation multi-acteurs de ces scénarios, soit par ordinateur (uniquement), soit par des jeux de rôles plateau sous forme de « serious-game » (uniquement), soit par une combinaison des deux, en sachant que la possibilité de cette combinaison dépend des applications. Dans tous les cas, l'idée, lorsque cela est possible, serait que ces simulations soient ensuite suivies d'une délibération multi-acteurs et multicritères en vue de cet apprentissage social.

Diplômé en sciences informatiques dans le domaine du multi-agent, à l'issue de ma thèse, j'ai progressivement basculé vers les sciences économiques, en raison de mon contexte de travail au BRGM ainsi que de l'évolution de mon intérêt de recherche. Cela signifie que l'approche « agent » n'a plus été un sujet de recherche mais un outil d'analyse des filières ressources minérales, celle-ci pouvant être à l'échelle d'un territoire (ex : pour les matériaux de construction) ou à l'échelle mondiale (ex : pour les métaux stratégiques). Cependant, je suis resté dans l'interdisciplinarité en mettant à profit mes compétences en informatique pour répondre à des problématiques économiques et environnementales. Dans cet objectif, l'approche ACE peut parfois être couplée avec d'autres approches comme le « Machine Learning » ou l'ACV (analyse de cycle de vie). J'ai aussi développé une plateforme de simulation agent appelée Is@Tem, supportant les données géographiques de type vectoriel (point, ligne, polygone) pour implémenter de manière réaliste mes modèles économiques spatialement explicites.

Une des principales difficultés que j'ai rencontrées tout le long de ce parcours a été – et est toujours mais en diminution progressive – que l'approche par l'ACE et la recherche-action participative sont encore très faiblement acceptées par le monde des géosciences. Cela concerne

a fortiori le BRGM, une entreprise très orientée expertise, qui plus est, focalisée majoritairement sur les paramètres et processus physiques du système étudié. L'étude de la complexité telle qu'elle est définie ici (multi-acteurs, multi-échelles, sciences participatives) y a donc été un challenge. En conséquence, les références bibliographiques que j'ai utilisées durant tout ce parcours, que ce soit en simulation ou en jeux de rôles portent également sur les ressources naturelles en général (étudiées par le CIRAD, l'INRAE, l'IFREMER, etc.) au-delà des ressources minérales en particulier, d'où l'aspect multidisciplinaire de ce parcours.

☞ Si le lecteur cherche une zone de ce mémoire qui pourrait résumer très brièvement la contribution de mon parcours pour le BRGM, ce serait la [Figure I.4 en page 26](#) : renforcer la place des ressources minérales dans les paradigmes 2 (simulation par l'ACE) et 3 (délibération multi-acteurs) dans un système BRGM traditionnellement dominé par le paradigme 1 (expertise).

Le bilan, au regard du futur, est que malgré les obstacles, ma démarche de recherche est prometteuse car a priori inévitable et ce, pour au moins 3 raisons. La première raison est l'avènement progressif (a) dans la société en général et (b) dans l'économie en particulier, d'une des origines du monde des « agents », à savoir l'Intelligence Artificielle et toute la complexité induite. Ici, l'aspect « économie » concerne notamment l'intensification de la compétitivité des entreprises, pilotée par l'économie du savoir, en complexité croissante. La deuxième raison est le renforcement progressif du concept des jeux sérieux (plus accepté par le monde des géosciences), dont le monde des « agents » en est une implémentation informatique. La troisième raison est qu'au BRGM, il y a aujourd'hui un vent d'évolution caractérisé par une volonté stratégique - affichée publiquement - de l'entreprise d'intégrer de plus en plus les sciences participatives dans ses actions futures.

C'est sur ce vent d'évolution dans l'entreprise où je travaille que j'ai fait une offre de programme de recherche actuelle et future, un programme visant à contribuer au renforcement, sur le long-terme, de l'interface entre la géoscience et la société. Cette contribution se concrétiserait par le pilotage ou l'accompagnement de différents projets scientifiques basés sur la recherche-action participative et répondant avant tout aux besoins du BRGM et à ceux des acteurs du territoire (acteurs économiques, associatifs, politiques, etc.). Cela devrait être possible, même pour l'échelle internationale (marché des métaux stratégiques). Pour ce cas, la recherche-action participative ne vise pas à faire dialoguer des acteurs de chaque pays impliqué (démarche irréaliste) mais par exemple de faire dialoguer, devant les supports idoines (montrant le modèle prospectif complexe du contexte international), les acteurs français au sein du Comité des métaux stratégiques ou COMES (introduit [en page 54](#)). Le dialogue porterait alors sur les scénarios prospectifs d'approvisionnement de la France à une échelle de temps donnée. Cette idée pourrait être soumise aux experts du BRGM.

Les projets futurs contiendront toujours le volet « ressources minérales » (entre autres la simulation informatique des métaux stratégiques à l'échelle internationale, ou encore les jeux de rôles sur l'artisanat minier en Afrique, etc.). Toutefois, ces projets s'ouvrent aussi désormais à un autre domaine des géosciences : le volet « après-mine ». La problématique associée à ce dernier est par exemple celle de comprendre la perception sociétale des risques environnemental, de santé, et économique liées à la fermeture des mines, ou encore celle de la perception sociétale des solutions proposées par les experts de l'État pour y remédier.

Par ailleurs, outre la partie scientifique, un des faits marquants de mon parcours a été de coordonner deux projets ANR : (a) le projet AGREGA (ANR-13-ECOT-0008) sur les matériaux de construction « granulats » et leur économie circulaire, et (b) le projet PréGo (ANR-14-CE05-0049) sur la géothermie, renforçant ainsi mon ouverture à d'autres thématiques que les ressources minérales. Il y a eu également différents encadrements se déroulant dans un cadre pluridisciplinaire.

En somme, mon travail a été à la fois multidisciplinaire, interdisciplinaire, pluridisciplinaire et transdisciplinaire. Et j'espère qu'il continuera à être ainsi dans l'avenir...

Le présent travail n'est évidemment pas un aboutissement. Il constitue au contraire une ouverture vers un certain nombre de possibilités qui, je l'espère, composeront une part non négligeable de la recherche de demain dans le renforcement de la recherche-action participative et de l'ACE dans le domaine des géosciences. De ce point de vue, l'ACE et les jeux sérieux ont tout à gagner sur des collaborations entre plusieurs disciplines, comme celles que j'ai essayé d'entreprendre durant ces 17 dernières années. Je souhaite, par le récit de ce parcours scientifique, avoir permis à d'autres chercheurs du monde des géosciences de progresser ne serait-ce que de quelques pas dans la compréhension (a) de la modélisation socioéconomique d'une filière minière complexe et (b) de la justification de cette modélisation. Je souhaite également que le fil suivi dans ce mémoire, à savoir l'explicitation du paradigme ACE, amène de nombreux lecteurs à explorer la voie du couplage entre un modèle ACE et les modèles physiques classiques, une voie très certainement riche en surprises et découvertes de toutes sortes. C'était là toute l'ambition de ce travail, et j'espère qu'elle aura été perçue comme telle.

Je souhaiterais terminer ce mémoire en mettant en avant 2 leçons de vie majeures que je tire de ce parcours. La première est que la persévérance est toujours récompensée (cela est valable sur le plan professionnel et personnel) et que la difficulté peut même parfois en être un bon moteur. Malgré les obstacles, un parcours doit toujours progresser à partir du moment où cette progression est bien argumentée. Il arrive ensuite parfois que des facteurs externes non prévus y contribuent positivement – mais cette contribution ne viendrait que si on est dans un état d'esprit de ne pas l'attendre pour avancer. En tout cas, en ce qui concerne mon parcours, le proverbe français « Aide-toi, le ciel t'aidera » s'est bien appliqué. La deuxième leçon est qu'un projet de recherche est avant tout une relation humaine avant d'être une relation intellectuelle. Moi qui crois aux contributions positives futures de l'Intelligence Artificielle dans notre société - pour y avoir consacré une partie de ma vie scientifique - je ne suis néanmoins pas convaincu qu'il y aura un jour des projets collaboratifs type ANR ou Horizon Europe dont les partenaires seront composés uniquement de robots ou de programmes, si intelligents soient-ils. Je suis convaincu qu'un tel projet sans êtres humains s'arrêtera après seulement 1 matinée de réalisation.



Références par ordre alphabétique

*« Ordre : Que chaque chose chez vous ait sa place,
que chacune de vos affaires ait son temps. »*

- Benjamin Franklin

CETTE SECTION PRÉSENTE LES RÉFÉRENCES sous la forme d'une organisation classique : par ordre alphabétique. Cependant, afin de mieux comprendre les références mobilisées dans les travaux réalisés, celles-ci peuvent aussi être réparties en grandes fonctions, une organisation présentée dans la section '[Références par fonction](#)' débutant à la page [121](#).

ADEME, 2012. Étude sur le prix d'élimination des déchets inertes du BTP. Etude. 13 p. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/86091_synthese-etude-prix-dechets-inertes-btp-2012.pdf. (accessed March 2020)

Amable, B., Askenazy, P., 2005. Introduction à l'économie de la connaissance. rapport UNESCO "Construire des sociétés du savoir". http://www.ecolabs.org/img/pdf/unesco_20final.pdf.

Anadon, M., Savoie-Zajc, L., 2007. La recherche-action dans certains pays anglo-saxons et latino-américains, in: Anadon, M. (Ed.), La recherche participative, multiple regards. Québec: Presses de l'Université du Québec, pp. 11-30, ISBN : 978-2-76051-930-5.

Andriamasinoro, F., 2003. Proposition d'un modèle d'agents hybrides basé sur la motivation naturelle. PhD Thesis. University of La Réunion (France) - IREMI Laboratory. 202 p., HAL Id: tel-00474542. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00474542/document>.

Andriamasinoro, F., 2004. Modeling Natural Motivations into Hybrid Agents, in: the 4th International ICSC Symposium on Engineering of Intelligent Systems (EIS 2004), Island of Madeira, Portugal February 29 – March 2, p. 66. ISBN: 3-906454-35-5. <http://www.icsc.ab.ca/conferences/eis2004/conf/14.pdf>

Andriamasinoro, F., 2011. Rupture d'approvisionnement sur le marché du lithium : analyse prospective par une approche multi-échelle. BRGM/RP-60442-FR, 3 fig., 23 tab. BRGM. 52 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/rp-60442-fr.pdf>. (accessed November 2014)

Andriamasinoro, F., 2013. Reinforcing the place of dynamic spatialised indicators in a generic socioeconomic model, in: Boruso, G., Bertazzon, S., Favretto, A., Murgante, B., Torre, C.M. (Eds.), Geographic Information Analysis for Sustainable Development and Economic Planning: New Technologies. IGI Global. Ch. 21, pp. 313-334, ISBN13: 978-1-46661-924-1. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-1924-1.ch021> (accessed November 2019)

Andriamasinoro, F., Ahne, H., 2013. Prospective analysis of the world lithium market: contribution to the evaluation of supply shortage periods. International Business & Economics Research Journal. 12 (3), 359-372. <https://doi.org/10.19030/iber.v12i3.7679>.

Andriamasinoro, F., Angel, J.-M., 2005. High-Level vs. Low-Level Abstraction Approach for the Model and Simulation Design of Ultra-pure Quartz Exploitation in Northeastern Madagascar, in: Proceedings of the Joint Conference on Multi-Agent Modelling for Environmental Management (CABM-HEMA-SMAGET), Bourg St-Maurice, France March, 25-28. <http://fenintsoa.net/htmldata/publis.php?dwn=smaget2005.pdf>

- Andriamasinoro, F., Angel, J.M., 2007. Modeling the Ultra-pure Quartz Exploitation in Northeastern Madagascar: Impact of the Activity on the Socio-Economical Situation of the Population. *Journal of Socio-Economics*. 36 (2), 311-329. <https://doi.org/10.1016/j.socec.2005.11.035> (accessed November 2019).
- Andriamasinoro, F., Angel, J.M., 2012. Artisanal and small-scale gold mining in Burkina Faso: suggestion of multi-agent methodology as a complementary support in elaborating a policy. *Resources Policy*. 37 (3), 385-396. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2012.04.004> (accessed November 2019).
- Andriamasinoro, F., Cassard, D., Martel-Jantin, B., 2010. ISATEM: An Integration of Socioeconomic and Spatial Models for Mineral Resources Exploitation, in: Taniar, D., Gervasi, O., Murgante B, Pardede, E., Apduhan, B.O. (Eds.), *Computational Science and Its Applications - ICCSA 2010*. Fukuoka, Japan: ICCSA 2010, part I, LNCS 6016, Springer, Heidelberg, pp. 476-490. March 23-26, ISBN: 978-3-64212-155-5. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12156-2_36
- Andriamasinoro, F., Courdier, R., 2000. A model of virtual competition between remote agents, in: *proceedings of the International ICSC Symposium on Multi-Agents and Mobile Agents in Virtual Organizations and E-Commerce (MAMA'2000)*, Wollongong, Australia december 11-15.
- Andriamasinoro, F., Courdier, R., 2001. Un modèle dynamique de comportement agent à base de besoins, in: *Les Journées Francophones sur l'Intelligence Artificielle Distribuée et les Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'01)*, Montréal, Québec, Canada 12-14 novembre, 351-353. ISBN 2-7462-0349-9.
- Andriamasinoro, F., Courdier, R., 2002. The Basic Instinct of Autonomous Cognitive Agents: : From individual to collective behavior, in: Nahavandi, S. (Ed.), *Proceedings of the 1st International Congress on Autonomous Intelligent System (ICAIS'2002)*, Geelong, Australia February 12-15, p. 61. ISBN 3-906454-30-4.
- Andriamasinoro, F., Courdier, R., 2004. Integration of Generic Motivations in Social Hybrid Agents, in: *Regulated Agent-Based Social Systems. Lecture Notes in Computer Science n°2934*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 281-300, ISBN: 9783540209232. https://doi.org/10.1007/978-3-540-25867-4_17
- Andriamasinoro, F., Courdier, R., Piquet, E., 2001. Enhancing a multi-agent system's performance: from implementation to simulation analysis, in: *First IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid*, 464-469. ISBN 0769510108. <https://doi.org/10.1109/ccgrid.2001.923228>
- Andriamasinoro, F., Danino-Perraud, R., 2019. Use of artificial intelligence to assess mineral substance criticality in the French market: the example of cobalt. *Mineral Economics*. 1-19. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00206-2> (accessed November 2019).
- Andriamasinoro, F., Hohmann, A., Douguet, J.M., Angel, J.M., 2020. Serious games as a social learning tool in formalizing the artisanal and small-scale mining sector in African territories. *The Extractive Industries and Society*. 7 (3), 1108-1120. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.07.017>.
- Andriamasinoro, F., Jaques, E., Pelon, R., Martel-Jantin, B., 2005. Artisanal and Small-scale Gold Mining in Alga (Burkina Faso): Building a Decision-Aid Model for Development and Governance, in: Bruzzone, A.G. & Williams, E. (Eds.), *Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference*, Philadelphia, USA July 24-28, 292-297. ISBN 1-56555-299-7.

Andriamasinoro, F., Levorato, V., 2014. Appréciation de l'intérêt du secteur minier pour les SMA pour l'analyse prospective du marché des métaux stratégiques, in: Courdier, R. & Jamont, J.-P. (Eds.), Les 22èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'14), Lorient-sur-Drôme, 161-170. ISBN : 978-2-36493-154-1. <https://doi.org/10.13140/2.1.3090.2724>

Andriamasinoro, F., Martel-Jantin, B., 2013. Proposal of agent simulation methodology for the prospective analysis of mineral commodities markets, in: Affenzeller, M., Bruzzone, A.G., De Felice, F., Del Rio, D., Frydman, C., Massei, M. & Merkuriev, Y. (Eds.), the 12th International Conference on Modeling and Applied Simulation, Athens 25 - 27 September, 1-10. ISBN: 978-1-62993-490-7.

Andriamasinoro, F., Thevenot, A., 2018. Approfondissement de la connaissance du tissu industriel français pour les substances stratégiques : application pilote sur le tungstène. BRGM/RP-67477-FR, 7 fig., 11 tabl., 2 ann. 58 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/rp-67477-fr.pdf>. (accessed March 2020)

An, L., Grimm, V., Turner II, B.L., 2019. Editorial: Meeting Grand Challenges in Agent-Based Models. Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 23 (1), <https://doi.org/10.18564/jasss.4012> (accessed March 2020).

Anon, 2010. Agents of change: Conventional economic models failed to foresee the financial crisis. Could agent-based modelling do better? [Web]. <http://www.economist.com/node/16636121> (accessed May 2020).

Arthur, W.B., Durlauf, S., Lane, D., 1997. Introduction: Process and Emergence in the Economy, in: Arthur, W.B., Durlauf, S., Lane, D. (Eds.), The Economy as an Evolving Complex System II. Westview Press / Santa Fe Institute Series. Ch. 1, pp. 1-11, ISBN-13 : 978-0-20132-823-3. http://tuvalu.santafe.edu/~wbarthur/papers/adl_intro.pdf

Audion, A., Hocquard, C., Labbé, J., 2014. Panorama 2013 du marché du cobalt. BRGM/RP-63626-FR, 45 fig., 33 tabl. 155 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/rp-63626-fr.pdf>. (accessed March 2019)

Augiseau, V., 2017. La dimension matérielle de l'urbanisation : Flux et stocks de matériaux de construction en Ile-de-France. PhD Thesis. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne. 554 p. (accessed December 2019)

Bailly, L., Labbé, J.F., Marot, A., Lips, A., Tourlière, B., Perrin, J., Blanchin, R., Chevrel, S., Bah, N., Diallo, E., Bah, M.A., Diabi, S.Y., Sy Savané, M.L., Diabaté, B., 2015. Aluminium for future generation: new bauxite resources identified in Guinea, in: André-Meyer, A.S. (Ed.), Proceedings of the 13th Biennial SGA Meeting, Nancy 24-27 August 2015, 1149-1152. ISBN: 978-2-85555-065-7.

Barreteau, O., Bousquet, F., Étienne, M., Souchère, V., D'Aquino, P., 2014. Companion Modelling: A Method of Adaptive and Participatory Research, in: Étienne, M. (Ed.), Companion Modelling. Springer. Ch. 2, pp. 13-40, ISBN: 978-9-40178-556-3. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8557-0_2 (accessed October 2019)

Barthélémy, F., Bouchut, J., 2002. Quartz ultra pur à Madagascar : impact socio-économique au niveau local de la filière à usage industriel. BRGM/RP-52027-FR. 68 p.

Bazghandi, A., Pouyan, A.A., 2008. Considering Geographic Information Systems In Buyer/Seller Agents Simulation, in: 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, 7-11 April 2008. Print ISBN: 978-1-42441-751-3. <https://doi.org/10.1109/ictta.2008.4529992>

- Becu, N., Amalric, M., Anselme, B., Beck, E., Bertin, X., Delay, E., Long, N., Marilleau, N., Pignon-Mussaud, C., Rousseaux, F., 2017. Participatory simulation to foster social learning on coastal flooding prevention. *Environmental Modelling & Software*. 98, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.003> (accessed September 2019).
- Benoit-Cervantes, G., 2012. *La boîte à outils de l'Innovation*. Dunod. 192 p. ISBN: 978-2-10058-657-8. (accessed 2019)
- Beylot, A., Villeneuve, J., 2015. Assessing the national economic importance of metals: An Input-Output approach to the case of copper in France. *Resources Policy*. 44 (C), 161-165. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.02.007>.
- Billa, M., Lescuyer, J.L., 2005. West African GIS Birimian gold potential. BRGM/RC-54093-FR, 11 fig. 44 p. (accessed October 2019)
- BIO by Deloitte, 2015. Study on Data for a Raw Material System Analysis: Roadmap and Test of the Fully Operational MSA for Raw Materials. Report prepared for the European Commission, DG GROW. 179 p.
- Bonabeau, E., Theraulaz, G., Dorigo, M., 1999. *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. OUP USA. 320 p. ISBN-13 : 978-0-19513-159-8. (accessed January 2020)
- Bonechi, B., 2018. Intelligence artificielle : quel impact sur les emplois ? [Web]. <https://www.journaldunet.com/solutions/expert/69076/intelligence-artificielle---quel-impact-sur-les-emplois.shtml> (accessed 2018). Site 'Journal du Net (JDN)'.
- Booch, G., Rumbaugh, J., Jacobson, I., 2005. *The Unified Modeling Language User Guide*. 2nd Ed. Addison Wesley. 496 p. ISBN-13 : 978-0-32126-797-9.
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., Le Page, C., 1998. Cormas:common-pool resources and multi-agent Systems, in: del Pobil, A., Mira, J. & Ali, M. (Eds.), *Proceedings of the 11th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 826-838. Print ISBN 978-3-540-64574-0. <https://doi.org/10.1007/3-540-64574-8>
- Bradley, R., 2018. 16 Examples of Artificial Intelligence (AI) in Your Everyday Life. [Web]. <https://themanifest.com/development/16-examples-artificial-intelligence-ai-your-everyday-life>.
- Breiman, L., 2001. Random forests, in: *Machine Learning*. 45 (1), 5-32., Springer. ISSN: 0885-6125. Springer.
- BRGM_SocCiv, 2016. Le BRGM signe la charte de l'ouverture à la société. [Web]. <https://www.brgm.fr/actualite/brgm-signe-charte-ouverture-societe> (accessed March 2020).
- Brown, T., McEvoy, F., Ward, J., 2011. Aggregates in England — Economic contribution and environmental cost of indigenous supply. *Resources Policy*. 34 (4), 295-303. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.07.001> (accessed March 2020).
- CAG 28 announcement, 2019. The 28th Colloquium of African Geology, Fez, Morocco, 2020. [Web]. <http://gsafr.org/cag28/> (accessed November 2019).
- Caiani, A., Godin, A., Caverzasi, E., Gallegati, M., Kinsella, S., Stiglitz, J.E., 2016. Agent based-stock flow consistent macroeconomics: Towards a benchmark model. *Economic Dynamics and Control*. 69, 375-408. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2016.06.001> (accessed March 2020).
- Calderoni, S., 2002. *Ethologie Artificielle et Contrôle Auto-Adaptatif dans les Systèmes d'Agents Réactifs: de la Modélisation à la Simulation*. Ph.D thesis. University of La Réunion - IREMA Laboratory. 175 p. <https://www.theses.fr/2002lare0020>.
- Caté, A., Perozzi, L., Gloaguen, E., Blouin, M., 2017. Machine learning as a tool for geologists. *The Leading Edge*. 36 (3), 215-219. <https://doi.org/10.1190/tle36030215.1>.

Catroux, M., 2002. Introduction à la recherche-action : modalités d'une démarche théorique centrée sur la pratique. Recherche et pratiques pédagogiques en langues de spécialité – Cahiers de l'APLIUT. XXI (3), 8-20. <https://doi.org/10.4000/apliut.4276> (accessed December 2019).

Chamaret, A., Récoché, G., O'Connor, M., 2007. Top-down/bottom-up approach for developing sustainable development indicators for mining: application to the Arlit uranium mines (Niger). International Journal of Sustainable Development. 10 (1/2), 161-174. <https://dx.doi.org/10.1504/ijisd.2007.014420> (accessed September 2019).

Cheng, I.-H., Xiong, W., 2013. *The Financialization of Commodity Markets*. [Web]. <http://ssrn.com/abstract=2350243>.

Claudius, G., Bale, C., Furtado, B.A., Alvarez-Pereira, B., Gentile, J.E., Henderson, H., Lipari, F., 2017. Getting the Best of Both Worlds? Developing Complementary Equation-Based and Agent-Based Models. Computational Economics. 53, 763–782. <https://doi.org/10.1007/s10614-017-9763-8> (accessed March 2020).

Collectif Histoire, 2009. Objectif Terre - 50 ans d'histoire du BRGM. Brgméditions. 160 p. ISBN : 978-2-71592-475-5. <https://www.geosoc.fr/environnement-et-patrimoine/53-notes-de-lecture/225-objectif-terre-50-ans-d-histoire-du-brgm.html/> (accessed December 2019)

Collectif Commod, 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement, in: Natures Sciences Sociétés. 13 (2), 165-168., NSS-Dialogues, EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/nss:2005023> (accessed March 2020)

COMES, 2013. Comité pour les métaux stratégiques. [Web]. <http://www.mineralinfo.fr/page/comite-metaux-strategiques> (accessed March 2020).

COP_BRGM, 2019. Contrat d'objectifs et de performance Etat-BRGM 2018/2022. 44 p. ISBN 978-2-71592-690-5. <https://www.brgm.fr/brgm/contrat-objectifs-performance-etat-brgm/contrat-objectifs-performance-etat-brgm-2018-2022>

Courdier, R., Guerrin, F., Andriamasinoro, F., Paillat, J.-M., 2002. Agent-based simulation of complex systems: application to collective management of animal wastes. Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 5 (3), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/3/4.html> (accessed November 2016).

Courdier, R., Guerrin, F., Andriamasinoro, F.H., Paillat, J.-M., 2003. Simulation agent appliquée à la gestion collective d'effluents d'élevage. Mise en œuvre des concepts génériques de la plateforme Geamas au sein de l'application Biomas, in: Guerrin, F., Paillat, J.-M. (Eds.), Modélisation des flux de biomasse et des transferts de fertilité - Cas de la gestion des effluents d'élevage à l'île de la Réunion. 1st (Ed.) Montpellier, France, p.21. Restitution des travaux de l'ATP 99/60. Actes du séminaire, 19-20 juin 2002, Cirad, EAN13 CD-ROM : 9782876145436.

Crit_BRGM, 2015. *Fiches de criticité*. [Web]. <http://www.mineralinfo.fr/page/fiches-criticite> (accessed December 2019).

Cuney, M., n.d. Les ressources minérales. [Web]. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/ressources-minerales/1-les-ressources-minerales/> (accessed February 2020).

Danino-Perraud, R., 2019. *A Material Flow Analysis of cobalt: Observation of the evolutions of cobalt flows in Europe from 2008 to 2017*. [Web]. <https://www.minersoc.org/wp-content/uploads/2019/05/3ICM-Danino-Perraud.pdf> (accessed March 2020).

- d'Aquino, P., Le Page, C., Bousquet, F., Bah, A., 2002. Jeux de rôles, SIG et SMA pour la gestion territoriale. Et si les acteurs-décideurs construisaient leurs propres outils ?, in: *Annales des Mines. Responsabilité & Environnement*. 27, 67-82. <http://www.annales.org/re/2002/re27/aquino067-082.pdf>
- Daré, W., Venot, J., Le Page, C., Aduna, A., 2018. Problemshed or Watershed? Participatory Modeling towards IWRM in North Ghana. *Water*. 10 (6), 721. <https://doi.org/10.3390/w10060721> (accessed July 2019).
- DataAnalytics, 2018. L'explicabilité des algorithmes : une affaire de compromis. [Web]. <https://dataanalyticspost.com/lexplicabilite-des-algos-une-affaire-de-compromis/> (accessed December 2018). Site 'Data analytics post'.
- Datta, A., Sen, S., Zick, Y., 2016. Algorithmic Transparency via Quantitative Input Influence: Theory and Experiments with Learning Systems, in: *Proceedings of the 37th IEEE Symposium on Security and Privacy*, San Jose, CA, USA 22-26 May 2016. ISSN: 2375-1207. <https://doi.org/10.1109/sp.2016.42>
- Daw, G., Labbé, J.-F., 2012. Panorama 2011 du marché du lithium. Rapport final. BRGM/RP-60460-FR. 157p., 51 fig., 30 tab. 157 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/rp-61340-fr.pdf>.
- de Andrade, P.R., Monteiro, A.M., Camara, G., 2010. From Input-Output Matrixes to Agent-Based Models: A Case Study on Carbon Credits in a Local Economy, in: Dimuro, G.P., da Rocha Costa, A.C., Sichman, J.S., Tedesco, P., Adamatti, D.F., Balsa, J. & Antunes, L. (Eds.), 2010 Second Brazilian Workshop on Social Simulation, Sao Bernardo do Campo, Sao Paulo 24-25 Oct, 58-65. Print ISBN: 978-1-4577-0895-4. <https://doi.org/10.1109/bwss.2010.16>
- DeAngelis, D.L., Diaz, S.G., 2019. Decision-making in agent-based modeling: A current review and future prospectus. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 6, Article 237; 16 p. <https://doi.org/10.3389/fevo.2018.00237> (accessed March 2020).
- Derveeuw, J., Beauflis, B., Brandouy, O., Mathieu, P., 2007. L'apport des SMA à la modélisation des marchés financiers. *Revue d'intelligence artificielle*. 21 (5), 617-641. <https://doi.org/10.3166/ria.21.617-641> (accessed March 2020).
- Djaouti, D., Alvarez, J., Jessel, J., Rampnoux, O., 2011. Origins of Serious Games, in: Ma, M., Oikonomou, A., Jain, L.C. (Eds.), *Serious Games and Edutainment Applications*. Springer. Ch. 4, pp. 25-43, Print ISBN 978-1-4471-2160-2. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2161-9_3 (accessed November 2019)
- Douguet, J.M., Morlat, C., Lanceleur, P., Andriamasinoro, F., 2019. Subjective evaluation of aggregate supply scenarios in the Ile-de-France region with a view to a circular economy: the ANR AGREGA research project. *International Journal of Sustainable Development*. 22 (3/4), 123-157. <https://dx.doi.org/10.1504/ijsd.2019.105321> (accessed December 2019).
- Drogoul, A., 1993. De La Simulation Multi-Agent A La Résolution Collective de Problèmes. Thèse de doctorat. Université Paris VI. 214 p. <http://www.lirmm.fr/~ferber/documents/drogoul.these.fr.pdf>. (accessed March 2020)
- Ducrot, R., Otake, M., Riera, A., Famba, S., Nguenha, R., 2018. Upscaling maintenance operations in a large-scale irrigation scheme to solve drainage issues: going beyond a managerial perspective. *Irrigation and Drainage*. 67 (4), 582-593. <https://doi.org/10.1002/ird.2272> (accessed November 2019).
- Dumat, C., Pelfrène, A., Shahid, M., 2019. Environment-health link in a context of urban agricultures: studies of oral exposure to pollutants in order promote the human health. *Environmental Science and Pollution Research*. 26, 20015-20017. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04588-2> (accessed March 2020).

EcCRM, 2017. Study on the review of the list of Critical Raw Materials in EU. Final Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 92 p., ISBN: 978-9-27947-937-3. <https://doi.org/10.2873/876644>.

Epstein, J.M., 2006. Generative Social Science: Studies in Agent-Based Computational Modeling. Princeton University Press. 356 p. ISBN: 978-0-69112-547-3.

Epstein, J.M., 2008. Why Model? Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 11 (412), <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html>.

Etienne, M., Du Toit, D.R., Pollard, S., 2011. ARDI: a Co-construction Method for Participatory Modeling in Natural Resources Management. Ecology and Society. 16 (1), 44. <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art44/> (accessed September 2019).

Etter-Phoya, R., 2019. Socio-economic profile of ASM in Malawi, in: Tychsen, J. (Ed.), Artisanal and Small Scale Mining Handbook for Malawi with a regional perspective. Design Printers Limited, Lilongwe, Malawi, pp. 105-112, ISBN: 978-87-7871-512-8. (accessed October 2019)

EUROSTAT, 2014. *Your key to European statistics*. [Web]. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>. European Commission.

Fagiolo, G., Roventini, A., 2012. Macroeconomic Policy in DSGE and Agent-Based Models, in: Agent-based models and economic policy. University of Paris: OFCE. Ch. 4, pp. 67-116, ISSN 1265-9576. <https://www.cairn.info/revue-de-l-ofce-2012-5-page-67.htm> (accessed November 2019)

Farmer, J.D., Foley, D., 2009. The economy needs agent-based modelling. Nature. 460 (7256), 685-686. <https://doi.org/10.1038/460685a> (accessed March 2020).

Ferber, J., 1999. Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Addison Wesley. 528 p. ISBN-10: 0201360489.

Fleming, K., Abad, J., Schueller, L., Booth, L., Baills, A., Scolobig, A., Petrovic, B., Zuccaro, G., Leone, M., 2019. The use of serious games for information elicitation from Disaster Risk Reduction and Climate Change Adaption stakeholders, in: EGU General Assembly 2019, Vienna 7-12 April 2019. <https://meetingorganizer.copernicus.org/egu2019/egu2019-13926.pdf>

Frame, B., O'Connor, M., 2011. Integrating valuation and deliberation: the purposes of sustainability assessment. Environmental Science & Policy. 14 (1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2010.10.009> (accessed January 2020).

Fromm, J., 2004. The Emergence of Complexity. Kassel: Kassel university press. 200 p. ISBN: 978-3-89958-069-3. (accessed July 2019)

Fullgraf, T., 2019. Geological Mapping and Mineral Assessment of Malawi, in: Artisanal and Small Scale Mining Handbook for Malawi with a regional perspective. Geological Survey of Denmark and Greenland (Ed.), pp. 17-18, ISBN: 978-87-7871-512-8. (accessed October 2019)

Geisendorf, S., Pietrulla, F., 2018. The circular economy and circular economic concepts: A literature analysis and redefinition. Thunderbird International Business Review. 60 (5), 771-782. <https://doi.org/10.1002/tie.21924> (accessed June 2019).

Gems-plus, n.d. Toutes les gemmes à vendre ou déjà vendues sur Gems-Plus.com. [Web]. <https://www.gems-plus.com/gemmes/> (accessed February 2020).

Gomez, J., 2019. Stochastic global optimization algorithms: A systematic formal approach. Information Sciences. 472, 53-76. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.09.021> (accessed September 2019).

- Graedel, T.E., Chandler, C., Barr, R., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., Friedlander, E., Henly, C., Jun, C., Nassar, N.T., Schechner, D., Warren, S., Yang, M., Zhu, C., 2012. Methodology of Metal Criticality Determination. *Environmental Science & Technology*. 46 (2), 1063-1070. <https://doi.org/10.1021/es203534z> (accessed November 2016).
- Graveline, N., 2009. Analyse coûts-bénéfices de stratégies d'approvisionnement en eau à La Réunion. BRGM/RP-56230-FR, 45 fig., 33 tabl. 82 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/rp-56230-fr.pdf>. (accessed February 2020)
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D.L., Polhill, J.G., Giske, J., Railsback, S.F., 2010. The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*. 221, 2760-2768. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.08.019> (accessed Augustus 2019).
- Grimm, V., Polhill, G., Touza, J., 2013. Documenting Social Simulation Models: The ODD Protocol as a Standard, in: Edmonds, B., Meyer, R. (Eds.), *Simulating Social Complexity. Understanding Complex Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 117-133, Print ISBN 978-3-540-93812-5. https://doi.org/10.1007/978-3-540-93813-2_7 (accessed February 2020)
- Grimm, V., Railsback, S.F., 2012. Pattern-oriented modelling: a 'multi-scope' for predictive systems ecology. *Philosophical Transactions*. 367, 298-310. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0180> (accessed December 2019).
- Grimm, V., Schmolke, A., 2011. How to Read and Write TRACE Documentations. 1st draft - 2011-03-04. Helmholtz Centre for Environmental Research. 39 p. (accessed June 2019)
- Groeneveld, J., Müller, B., Buchmann, C.M., Dressler, G., Guo, C., Hase, N., Hoffmann, F., John, F., Klassert, C., Lauf, T., Liebelt, V., Nolzen, H., Pannicke, N., Schulze, J., Weise, H., Schwarz, N., 2017. Theoretical foundations of human decision-making in agent-based land use models – A review. *Environmental Modelling & Software*. 87, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.10.008> (accessed March 2020).
- Guerin, C., Moreau, S., 2000. Ilakaka (Madagascar) : la ruée vers le saphir, in: *Cahiers d'outre-mer*. 53 (211), 253-272. <https://doi.org/10.3406/caoum.2000.3769>
- Guerrin, F., 2007. Représentation des connaissances pour la décision et pour l'action. Habilitation à Diriger des Recherches. INRA / CIRAD. 155 p. (accessed March 2020)
- Guirou, C., 2017. Faciliter le débat sur les croyances dans les organisations : l'utilisation des cartes cognitives dans la décision publique locale. Ph.D thesis, University of Aix-Marseille. 446 p. <http://www.theses.fr/2017aixm0583>
- Guyonnet, D., Planchon, M., Rollat, A., Escalon, V., Tuduri, J., Charles, N., Vaxelaire, S., Dubois, D., Fargier, H., 2015. Material flow analysis applied to rare earth elements in Europe. *Journal of Cleaner Production*. 107, 215-228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.123> (accessed October 2017).
- Hamill, L., 2010. Agent-based modelling: the next 15 years. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 13 (4). <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/13/4/7.html>.
- Hamill, L., Gilbert, N., 2016. *Agent-Based Modelling in Economics*. 1st Ed. John Wiley & Sons, Ltd. 348 p. ISBN: 9781118456071. (accessed March 2020)
- Hilson, G., 2009. Small-scale mining, poverty and economic development in sub-Saharan Africa: An overview. *Resources Policy*. 34 (1-2), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2008.12.001> (accessed January 2020).
- Hilson, G., 2016. Farming, small-scale mining and rural livelihoods in Sub-Saharan Africa: A critical overview. *The Extractive Industries and Society*. 3 (2), 547-563. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2016.02.003> (accessed November 2019).

- Jaques, E., Zida, B., Billa, M., Greffié, C., Thomassin, J.-F., 2006. Artisanal and small-scale gold mines in Burkina Faso: today and tomorrow, in: Gavin, M.H. (Ed.), *Small-Scale Mining, Rural Subsidence and Poverty in West Africa*. Practical Action Publishing. Ch. 10, pp. 114-134, ISBN: 9781853396359. <https://doi.org/10.3362/9781780445939.011> (accessed July 2019)
- Jonsson, J.B., Bryceson, D.F., 2009. Rushing for Gold: Mobility and Small-Scale Mining in East Africa. *Development and Change*. 40 (2), 249-279. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7660.2009.01514.x> (accessed December 2018).
- Kaufmann, D., Kraay, A., Mastruzzi, M., 2011. The Worldwide Governance Indicators, Methodology and Analytical Issues. *Hague Journal on the Rule of Law*. 3 (2), 220-246. <https://doi.org/10.1017/s1876404511200046> (accessed March 2020).
- Kirman, A.P., Vriend, N.J., 2001. Evolving market structure: An ACE model of price dispersion and loyalty. *Journal of Economic Dynamics & Control*. 25 (3-4), 459-502. [https://doi.org/10.1016/s0165-1889\(00\)00033-6](https://doi.org/10.1016/s0165-1889(00)00033-6) (accessed 2019).
- Knoeri, C., Wäger, P.A., Stamp, A., Althaus, , Weil, M., 2013. Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand with material flow supply modelling approaches. *Science of the Total Environment*. 461, 808-812. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.001>.
- Kremmydas, D., Athanasiadis, I.N., Rozakis, S., 2018. A review of Agent Based Modeling for agricultural policy evaluation. *Agricultural Systems*. 164, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.03.010> (accessed February 2020).
- La_H2020, 2013. Le libre accès aux publications et aux données de recherche. [Web]. <https://www.horizon2020.gouv.fr/cid82025/le-libre-acces-aux-publications-aux-donnees-recherche.html> (accessed May 2020).
- Lanceleur, P., 2019. L'expérience KerBabel : une aventure dans la « nouvelle » économie de la connaissance. Thèse de doctorat. Université Paris Saclay. 397 p.
- Lanini, S., Courtois, N., Giraud, F., Petit, V., Rinaudo, J.-D., 2004. Socio-hydrosystem modelling for integrated water-resources management – The Hérault catchment case study, southern France. *Environmental Modelling and Software*. 19 (11), 1011-1019. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.11.004>.
- Le Page, C., 2017. Simulation multi-agent interactive: engager des populations locales dans la modélisation des socio-écosystèmes pour stimuler l'apprentissage social. Habilitation à Diriger des Recherches. UPMC Sorbonne Universités. 126 p. (accessed March 2020)
- Le Page, C., Abrami, G., Barreteau, O., Bécu, N., Bommel, P., Botta, A., Dray, A., Monteil, C., Souchère, V., 2010. Des modèles pour partager des représentations, in: Etienne, M. (Ed.), *La modélisation d'accompagnement : une démarche participative en appui au développement durable*. Quae, pp. 71-101, ISBN: 978-2-7592-0620-9. <https://www.quae.com/produit/150/9782759213894/la-modelisation-d-accompagnement> (accessed March 2020)
- Le Port, J.P., 2017. Planification : Le projet ANR AGREGA simule les enjeux, in: Le Port, J.P. (Ed.), *Mines et Carrières*, pp. 40-42 (accessed May 2018)
- Lee, F.S., 2011. Être ou ne pas être hétérodoxe : réponse argumentée aux détracteurs de l'hétérodoxie, in: *Revue Française de Socio-Économie*. 8, 123-144., La Découverte. ISBN 978-2-7071-7003-3. <https://doi.org/10.3917/rfse.008.0123> (accessed May 2020)

- Lefebvre, G., Andriamasinoro, F., 2016. Mining economist opinions on using multi-agent methodology to simulate metal markets. *International Journal of Trade and Global Markets*. 9 (1), 83-102. <https://doi.org/10.1504/ijtgm.2016.074139> (accessed June 2017).
- Lengnick, M., 2013. Agent-based macroeconomics: A baseline model. *Journal of Economic Behavior & Organization*. 86, 102-120. <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2012.12.021> (accessed September 2015).
- Lesueur, H., 2016. Utilisation géothermique du puits Yvon Morandat - Gardanne. BRGM/RP-65723-FR, 104 fig., 26 tabl., 5 ann. 218 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/rp-65723-fr.pdf>.
- Lewin, K., 1946. Action Research and Minority Problems. *Journal of Social Issues*. 2, 34-36. <https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.1946.tb02295.x> (accessed March 2020).
- LME, n.d. London Metal Exchange: Home. [Web]. <https://www.lme.com/> (accessed March 2020).
- Mandere, H., 2019. Formalisation of the ASM sector, in: Tychsen, J. (Ed.), *Artisanal and Small Scale Mining Handbook for Malawi with a regional perspective*. Design Printers Limited, Lilongwe, Malawi, pp. 119-127, ISBN: 978-87-7871-512-8. (accessed November 2019)
- Marcoux, E., 2011. Introduction aux ressources minérales. [Web]. https://www.univ-orleans.fr/sites/default/files/OSUC/documents/ressources_minerales.pdf (accessed February 2020).
- Marshall, D., Pearce, T., Ford, J.D., Prno, J., Duerden, F., 2009. Les changements climatiques et l'exploitation minière au Canada: des occasions d'adaptation, in: *Fondation David Suzuki*. ISBN 1-897375-25-9.
- Michaut, C., 2015. *Vulgarisation scientifique : Mode d'emploi*. EDP Sciences. 159 p. ISBN : 978-2-7598-1160-1.
- Moyaux, T., Chaib-Draa, B., D'Amours, S., 2006. Supply Chain Management and Multiagent Systems: An Overview, in: Chaib-draa, B., Müller, J.P. (Eds.), *Supply Chain Management and Multiagent Systems*. SCI (Ed.) Springer-Verlag, pp. 1-27, ISBN-10: 3-540-33875-6. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2f978-3-540-33876-5_1.pdf (accessed September 2019)
- Mueller, M., Pyka, A., 2016. Economic Behaviour and Agent-Based Modelling, in: Frantz, R., Chen, C.-H., Dopfer, K., Heukelom, F., Mousavi, S. (Eds.), *Routledge Handbook of Behavioral Economics*. 1st (Ed.). Ch. 28, pp. 405-415, ISBN 1317589246.
- Müller, B., Bohn, F., Dreßler, G., Groeneveld, J., Klassert, C., Martin, R., Schlüter, M., Schulze, J., Weise, H., Schwarz, N., 2013. Describing human decisions in agent-based models – ODD + D, an extension of the ODD protocol. *Environmental Modelling & Software*. 48, 37-48. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.06.003> (accessed November 2019).
- Nardone, C., 2019. Agent-Based Computational Economics and Industrial Organization Theory, in: Cecconi, F., Campennì, M. *Information and Communication Technologies (ICT) in Economic Modeling*. Springer, Cham. Ch. 1, pp. 3-14, Print ISBN: 978-3-030-22604-6. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22605-3_1 (accessed February 2020)
- Nassar, N.T., Brainard, J., Gulley, A., Manley, R., Matos, G., Lederer, G., Bird, L.R., Pineault, D., Alonso, E., Gambogi, J., Fortier, S.M., 2020. Evaluating the mineral commodity supply risk of the U.S. manufacturing sector. *Sciences advances*. 6 (8), <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay8647> (accessed March 2020).

- Niazi, M., Hussain, A., 2011. Agent-based computing from multi-agent systems to agent-based models: a visual survey. *Scientometrics*. 89, 479–499. <https://doi.org/10.1007/s11192-011-0468-9> (accessed February 2020).
- Nikiforos, M., Zezza, G., 2012. The Stock-Flow Consistent Approach: Selected Writings of Wynne Godley. 276 p. Print ISBN: 978-1-349-33275-5. <https://doi.org/10.1057/9780230353848> (accessed March 2020)
- O'Connor, M., Da Cunha, C., 2011. Présentation de la démarche INTEGRAAL pour le projet D2SOU. Rapport de recherche RRR n.2011-05. Centre international REEDS, Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines. 27 p. (accessed July 2019)
- OECD_Restrict, 2010. The Economic Impact of Export Restrictions on Raw Materials. Paris: Editions OCDE, Paris. 176 p. ISBN: 978-9-26409-644-8. <https://doi.org/10.1787/9789264096448-en> (accessed March 2020)
- Oeffner, M., 2008. Agent-Based Keynesian Macroeconomics - An Evolutionary Model Embedded in an Agent-Based Computer Simulation. Munich Personal RePEc Archive (MPRA) Paper N° 18199. Munich: University Library of Munich, Germany. https://mpra.ub.uni-muenchen.de/18199/1/mpra_paper_18199.pdf. (accessed March 2008)
- Orru, J.-F., Rajaonson, H.F., Pelon, R., Andriamasinoro, F., 2007. Artisanal mining and preservation of the environment in Madagascar: development of a methodological approach to help identify the challenges and constraints for territorial development. University of East Anglia, Norwich March, 30-31. <https://hal-brgm.archives-ouvertes.fr/hal-00727448/document>. (accessed October 2019)
- Ott, T., Swiaczny, F., 2001. Time-Integrative Geographic Information Systems. Springer. 234 p. ISBN 9783540410164. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56747-6> (accessed March 2020)
- Panousi, S., Harper, E.M., Nuss, P., Eckelman, M.J., Hakimian, A., Graedel, T.E., 2015. Criticality of Seven Specialty Metals. *Journal of Industrial Ecology*. <https://doi.org/10.1111/jiec.12295> (accessed December 2016).
- Parker, D.C., Berger, T., Manson, S., McConnell, W., d'Aquino, P., August, P., Balmann, A., Bousquet, F., Brondizio, E., Brown, D., Couclelis, H., Deadman, P., Goodchild, Michael and Gotts, N., Goodchild, M., Gotts, N., Gumerman, G., Hoffmann, M., Huigen, M., Irwin, E., Warren, K., 2001. Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change. LUCS Report Series No. 6. Irvine, California, USA: LUCS International Project Office., ISSN: 1138-7424. International Workshop.
- Pelon, R., Martel-Jantin, B., 2006. Guidance Note on Formalising Artisanal Mining. BRGM/RP-54563-FR, 2 fig., 8 tabl., 1 app. 88 p. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/rp-54563-fr.pdf>. (accessed October 2019)
- Perrotton, A., de Garine-Wichatitsky, M., Valls-Fox, H., Le Page, C., 2017. My cattle and your park: Codesigning a role-playing game with rural communities to promote multistakeholder dialogue at the edge of protected areas. *Ecology and Society*. 22 (1), art35. <https://doi.org/10.5751/es-08962-220135> (accessed July 2019).
- Pink, D.H., 2016. Convincez qui vous voudrez: L'étonnante vérité sur notre capacité d'influence. Flammarion Ed. 274 p. ISBN: 978-2-08139-050-8. Collection Clés Des Champs.
- Polhill, G., 2010. ODD Updated. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. 13 (4), <http://doi.org/10.18564/jasss.1700> (accessed March 2020).

- Rahmandad, H., Sterman, J., 2008. Heterogeneity and Network Structure in the Dynamics of Diffusion: Comparing Agent-Based and Differential Equation Models. *Management Science*. 54 (5), 998–1014. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1070.0787> (accessed December 2019).
- Railsback, S.F., Grimm, V., 2019. *Agent-based and Individual-based Modeling: A Practical Introduction*. 2nd Ed. Princeton University Press. 360 p. ISBN: 978-0-69119-082-2. (accessed November 2019)
- Rand, W., Rust, R.T., 2011. Agent-Based Modeling in Marketing: Guidelines for Rigor. *International Journal of Research in Marketing*. 28 (3), 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijresmar.2011.04.002> (accessed December 2019).
- Reichel, V., Chamaret, A., O'Connor, M., 2010. Définir un avenir commun de territoire sur un espace protégé. L'exemple de la Boucle de Moisson, in: Laslaz, L., Gauchon, C., Duval-Massaloux, M., Héritier, S. (Eds.), *Collection Edytem. Cahiers de géographie*. 10, 51–62., *Espaces protégés, acceptation sociale et conflits environnementaux*. <https://doi.org/10.3406/edyte.2010.1112> (accessed October 2019)
- Riddle, M., Macal, C.M., Conzelmann, G., Combs, T.E., Bauer, D., Fields, F., 2015. Global critical materials markets: An agent-based modeling approach. *Resources Policy*. 45, 307–321. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.01.002> (accessed July 2018).
- Rinaudo, J., 2012. *Approches économiques de la gestion des eaux souterraines. Habilitation à Diriger des Recherches*. BRGM/Université de Montpellier. 62 p.
- Rodriguez Chavez, M.L., Schleifer, J., Dubus, J.-L., Lebret, P., Andriamasinoro, F., 2010. Breaking present schemes of the access to the aggregate resource, in: Martens, P.N. (Ed.), *Third International Symposium of Mineral Resources and Mine Development*, Aachen, Germany May 26–27, 441–455.
- Rodriguez-Chavez, M.-L., 2010. *Anticipation of the access to the aggregate resource by breaking present schemes in the long term. Thesis (PhD)*. Paris: MINES ParisTech. 141 p.
- Rossignol, J.-Y., 2018. *Complexité: Fondamentaux à l'usage des étudiants et des professionnels*. 1st Ed. EDP Sciences - Collection : PROfil. 262 p. EAN13: 9782759821945. (accessed June 2019)
- Rouchier, J., 2013. Agent-Based Simulation as a Useful Tool for the Study of Markets, in: Edmonds, B., Meyer, R. (Eds.), *Simulating Social Complexity: a Handbook*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Ch. 23, pp. 617–650, ISBN: 978-3-540-93812-5. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-93813-2> (accessed March 2020)
- Roudier, P., Muller, B., d'Aquino, P., Roncoli, C., Soumaré, M.A., Batté, L., Sultan, B., 2014. The role of climate forecasts in smallholder agriculture: Lessons from participatory research in two communities in Senegal. *Climate Risk Management*. 2, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2014.02.001> (accessed November 2019).
- Schleifer, J., Tessier, B., Thenevin, I., Deneuve, C., Mallens, C., Goethals, L., 2019. Le projet AGREGA : vers un outil pédagogique et ludique pour simuler le marché des granulats en région Île-de-France, in: *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, Eska. 96 (4), 107–119. <https://doi.org/10.3917/re1.096.0107> (accessed February 2020)
- SCSC, 2005. SCSC2005 Best Paper Award. [Web]. http://www.liophant.org/scsc/scsc2005/cfp/scsc_best.html (accessed March 2020).
- Seppacher, P., 2016. Modèles multi-agents et stock-flux cohérents : une convergence logique et nécessaire. CEPN Working Papers 2016-03. Centre d'Economie de l'Université de Paris Nord. <https://ideas.repec.org/p/upn/wpaper/2016-03.html>. (accessed March 2020)
- Serra, D., 2017. *Économie Comportementale*. Economica. 208 p. ISBN-13 : 978-2717869293.

Sherwood, J., Ditta, A., Haney, B., Haarsma, L., Carbajales-Dale, M., 2017. Resource Criticality in Modern Economies: Agent-Based Model Demonstrates Vulnerabilities from Technological Interdependence. *Biophysical economics and resource quality*. 2 (9), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s41247-017-0026-z> (accessed Augustus 2019).

Speirs, J., Houari, Y., Gross, R., 2013. Materials Availability: Comparison of material criticality studies - methodologies and results. UKERC Report, Working paper III. UKERC/WP/TPA/2013/002. 30 p. <http://www.ukerc.ac.uk/asset/b0251acf-8bfd-4bc7-b537d7b2eded48f8/>.

Squazzoni, F., 2010. The impact of agent-based models in the social sciences after 15 years of incursions. *History of Economic Ideas*. 18 (2), 197-233. <https://www.jstor.org/stable/23723517> (accessed March 2020).

Storup, B., 2013. La recherche participative comme mode de production des savoirs. Un état des lieux des pratiques en France. *Fondation Sciences citoyennes*. 94 p. (accessed October 2019)

Strategyzer, n.d. Strategyzer. [Web]. <https://www.strategyzer.com/> (accessed March 2020).

Tesfatsion, L., 2006. Agent-based computational economics: A constructive approach to economic theory, in: Tesfatsion, L., Judd, K. (Eds.), *Handbook of Computational Economics*. Elsevier. Ch. 16, pp. 831-880, ISBN: 978-0-444-51253-6.

Thèse_180, n.d. Ma thèse en 180 secondes. [Web]. <http://mt180.international/> (accessed March 2020).

TradeMap, 2018. Trade statistics for international business development. [Web]. <http://trademap.org/Index.aspx>.

van Asselt Marjolein, B.A., Rijkens-Klomp, N., 2002. A look in the mirror: reflection on participation in Integrated Assessment from a methodological perspective. *Global Environmental Change*. 12 (3), 167-184. [https://doi.org/10.1016/s0959-3780\(02\)00012-2](https://doi.org/10.1016/s0959-3780(02)00012-2) (accessed October 2019).

Vriend, N.J., 2006. ACE models of endogenous interactions, in: Tesfatsion, L., Judd, K. (Eds.), *Handbook of Computational Economics*. Elsevier. Ch. 21, pp. 1048-1078 [https://doi.org/10.1016/s1574-0021\(05\)02021-6](https://doi.org/10.1016/s1574-0021(05)02021-6) (accessed July 2014)

Wein, A., Labiosa, W., 2013. Serious games experiment toward agent-based simulation. *Open-File Report*. USGS publication warehouse. 30 p., Series number 2013-1152. <https://doi.org/10.3133/ofr20131152>. (accessed March 2020)

Weyns, D., Helleboogh, A., Holvoet, T., 2009. How to get multi-agent systems accepted in industry? *International Journal of Agent-Oriented Software Engineering*. 3 (4), 383-390. <https://doi.org/10.1504/ijaose.2009.025316> (accessed March 2020).

Yuan, Y., Yellishetty, M., Muñoz, M.A., Northey, S.A., 2019. Toward a dynamic evaluation of mineral criticality: Introducing the framework of criticality systems. *Industrial Ecology*. 1-14. <https://doi.org/10.1111/jiec.12920> (accessed January 2020).

Zwanzig, M., 2018. IBM/ABM summer school overview. [Web]. <https://tu-dresden.de/bu/umwelt/forst/ww/bsa/courses-workshops/summerschool/overview> (accessed May 2020).

Références par fonction

*« Sur la terre, tout a une fonction,
chaque maladie une herbe pour la guérir, chaque personne une mission »*
- Sagesse indienne



FIN DE MIEUX COMPRENDRE LES RÉFÉRENCES mobilisées dans les travaux réalisés, celles-ci peuvent aussi être réparties en 6 grandes fonctions :

1. Les travaux réalisés sur chaque filière
2. Les travaux transverses à des filières
3. Les travaux (hors filières) portant sur l'acceptation du paradigme ACE
4. Les travaux par rapport à la terminologie de ce mémoire
5. Les travaux portant sur la communication ou valorisation d'une recherche
6. Les travaux réalisés jusqu'à la thèse

Chaque fonction est subdivisée en sous-fonctions. Selon les fonctions, chaque sous-fonction peut encore éventuellement être séparée en 2 blocs :

- celui qui regroupe les références qui ne proviennent pas du web (bloc non web), c'est-à-dire dont l'objet référé peut être retrouvé autrement que par le web (même si une copie de l'objet existe aussi sur le web) ;
- et celui qui regroupe les références qui proviennent uniquement du web (bloc web).

Ce sont les références dans chaque sous-bloc final qui sont ensuite listées par ordre alphabétique.

Cependant, pour éviter les redondances avec les références par ordre alphabétique déjà présentées (cf. page 107) et pour optimiser ainsi l'espace du manuscrit, ce sont plutôt des citations, pointant ensuite vers ces références par ordre alphabétique, qui seront présentées dans cette section.

Fonction 1 : les travaux sur les filières

Filière « mine artisanale » : modélisation ACE

Bloc non web :

(Andriamasinoro and Angel, 2005) ; (Andriamasinoro and Angel, 2007) ; (Andriamasinoro and Angel, 2012) ; (Andriamasinoro et al., 2005) ; (Bailly et al., 2015) ; (Barthélémy and Bouchut, 2002) ; (Billa and Lescuyer, 2005) ; (Bousquet et al., 1998) ; (Calderoni, 2002) ; (Collectif Histoire, 2009) ; (Drogoul, 1993) ; (Etter-Phoya, 2019) ; (Fagiolo and Roventini, 2012) ; (Farmer and Foley, 2009) ; (Fullgraf, 2019) ; (Guerin and Moreau, 2000) ; (Hilson, 2009) ; (Hilson, 2016) ; (Jaques et al., 2006) ; (Jonsson and Brycesson, 2009) ; (Orru et al., 2007) ; (Pelon and Martel-Jantin, 2006).

Bloc web :

(SCSC, 2005) ; (Anon, 2010).

Filière « mine artisanale » : recherche-action***Bloc non web :***

(Andriamasinoro et al., 2020) ; (Chamaret et al., 2007) ; (Etienne et al., 2011) ; (Mandere, 2019) ; (O'Connor and Da Cunha, 2011) ; (Railsback and Grimm, 2019).

Bloc web :

(CAG 28 announcement, 2019)

Filière « granulats économie circulaire » : modélisation

(ADEME, 2012) ; (Gomez, 2019) ; (Rodriguez Chavez et al., 2010) ; (Rodriguez-Chavez, 2010) ; (Schleifer et al., 2019).

Filière « granulats économie circulaire » : recherche-action participative

(d'Aquino et al., 2002) ; (Dougnet et al., 2019) ; (Frame and O'Connor, 2011) ; (Le Port, 2017) ; (O'Connor and Da Cunha, 2011).

Filière « granulats économie circulaire » : autres

(Augiseau, 2017)

Filière « métaux stratégiques » : modélisation ACE***Bloc non web :***

(Andriamasinoro and Ahne, 2013) ; (Andriamasinoro and Danino-Perraud, 2019) ; (Andriamasinoro and Levorato, 2014) ; (Andriamasinoro and Martel-Jantin, 2013) ; (Breiman, 2001) ; (Caiani et al., 2016) ; (Caté et al., 2017) ; (Datta et al., 2016) ; (Derveeuw et al., 2007) ; (Farmer and Foley, 2009) (Knoeri et al., 2013) ; (Nikiforos and Zezza, 2012) ; (Seppecher, 2016).

Bloc web :

(Anon, 2010) ; (Cheng and Xiong, 2013) ; (Danino-Perraud, 2019) ; (DataAnalytics, 2018) ; (LME, n.d.).

Filière « métaux stratégiques » : criticité***Bloc non web :***

(Audion et al., 2014) ; (BIO by Deloitte, 2015) ; (Daw and Labbé, 2012) ; (EcCRM, 2017) ; (Graedel et al., 2012) ; (Kaufmann et al., 2011) ; (Marshall et al., 2009) ; (Nassar et al., 2020) ; (OECD_Restrict, 2010) ; (Panousi et al., 2015) ; (Speirs et al., 2013)

Bloc web :

(COMES, 2013) ; (Crit_BRGM, 2015) ; (EUROSTAT, 2014) ; (TradeMap, 2018).

Filière « métaux stratégiques » : recherche-action***Bloc non web :***

(Beylot and Villeneuve, 2015) ; (de Andrade et al., 2010) ; (Guyonnet et al., 2015) ; (Hamill, 2010) ; (Lefebvre and Andriamasinoro, 2016).

Bloc web :

(COMES, 2013)

Filière « géothermie »

(Guirou, 2017) ; (Lesueur, 2016)

Filière « après-mine »

(Dumat et al., 2019)

Fonction 2 : les travaux transverses à des filières**Couplage SMA/SIG**

(Andriamasinoro et al., 2010) ; (Andriamasinoro, 2013) ; (Bazghandi and Pouyan, 2008) ; (Bousquet et al., 1998) ; (Calderoni, 2002) ; (Groeneveld et al., 2017) ; (Ott and Swiaczny, 2001) ; (Parker et al., 2001).

Lien informatique ↔ économie

(Amable and Askenazy, 2005) ; (Booch et al., 2005) ; (Guerrin, 2007) ; (Lanceleur, 2019).

Fonction 3 : les travaux (hors filières) sur l'acceptation du paradigme ACE**Acceptation de l'ACE : modélisation*****Bloc non web :***

(An et al., 2019) ; (Brown et al., 2011) ; (Caiani et al., 2016) ; (Cheng and Xiong, 2013) ; (Claudius et al., 2017) ; (DeAngelis and Diaz, 2019) ; (Derveeuw et al., 2007) ; (Fagiolo and Roventini, 2012) ; (Farmer and Foley, 2009) ; (Fleming et al., 2019) ; (Graveline, 2009) ; (Grimm and Railsback, 2012) ; (Grimm and Schmolke, 2011) ; (Grimm et al., 2010) ; (Grimm et al., 2013) ; (Hamill and Gilbert, 2016) ; (Kirman and Vriend, 2001) ; (Knoeri et al., 2013) ; (Kremmydas et al., 2018) ; (Lanini et al., 2004) ; (Le Page, 2017) ; (Lee, 2011) ; (Lengnick, 2013) ; (Müller et al., 2013) ; (Rahmandad and Sterman, 2008) ; (Rand and Rust, 2011) ; (Riddle et al., 2015) ; (Rinaudo, 2012) ; (Seppecher, 2016) ; (Squazzoni, 2010) ; (Weyns et al., 2009) ; (Yuan et al., 2019).

Bloc web :

(Zwanzig, 2018)

Acceptation de l'ACE : la recherche-action

Bloc non web :

(Barreteau et al., 2014) ; (Becu et al., 2017) ; (Calderoni, 2002) ; (Collectif_Commod, 2005) ; (d'Aquino et al., 2002) ; (Djaouti et al., 2011) ; (Ducrot et al., 2018) ; (Etienne et al., 2011) (Hamill, 2010) ; (Polhill, 2010) ; (Reichel et al., 2010) ; (Wein and Labiosa , 2013).

Bloc web :

(BRGM_SocCiv, 2016)

Fonction 4 : les fonctions sur la terminologie utilisée

Terminologie : Intelligence Artificielle et agents (hors ACE)

(Bonabeau et al., 1999) ; (Calderoni, 2002) ; (Epstein, 2006) ; (Ferber, 1999) ; (Fromm, 2004) ; (Grimm and Railsback, 2012) ; (Moyaux et al., 2006) ; (Mueller and Pyka, 2016) ; (Niazi and Hussain, 2011) ; (Railsback and Grimm, 2019).

Terminologie : ACE

Bloc non web :

(Arthur et al., 1997) ; (d'Aquino et al., 2002) ; (Fagiolo and Roventini, 2012) ; (Farmer and Foley, 2009) ; (Fromm, 2004) ; (Hamill and Gilbert, 2016) ; (Kirman and Vriend, 2001) ; (Le Page et al., 2010) ; (Lengnick, 2013) ; (Mueller and Pyka, 2016) ; (Nardone, 2019) ; (Oeffner, 2008) ; (Perrotton et al., 2017) ; (Pink, 2016) ; (Railsback and Grimm, 2019) (Rossignol, 2018) ; (Serra, 2017) ; (Sherwood et al., 2017) ; (Tsfatsion, 2006) ; (Vriend, 2006).

Bloc web :

(Anon, 2010)

Terminologie : recherche-action participative

(Anadon and Savoie-Zajc, 2007) ; (Catroux, 2002) ; (Collectif_Commod, 2005) ; (d'Aquino et al., 2002) ; (Daré et al., 2018) ; (Epstein, 2008) ; (Frame and O'Connor, 2011) ; (Le Page et al., 2010) ; (Lewin, 1946) ; (Perrotton et al., 2017) ; (Pink, 2016) ; (Rouchier, 2013) ; (Roudier et al., 2014) ; (Storup, 2013) ; (van Asselt Marjolein and Rijkens-Klomp, 2002).

Terminologie : géosciences

Bloc non web :

(ADEME, 2012) ; (COP_BRGM, 2019) ; (Geisendorf and Pietrulla, 2018) ; (Gems-plus, n.d.).

Bloc web :

(Cuney, n.d.) ; (Marcoux, 2011).

Fonction 5 : les fonctions sur la communication / valorisation de la recherche

Bloc non web :

(Benoit-Cervantes, 2012) ; (Michaut, 2015).

Bloc web :

(Bonechi, 2018) ; (Bradley, 2018) ; (La_H2020, 2013) ; (Strategyzer, n.d.) ; (Thèse_180, n.d.).

Fonction 6 : les travaux réalisés jusqu'à la thèse

(Andriamasinoro, 2003) ; (Courdier et al., 2002) ; (Courdier et al., 2003).

ANNEXE

*« La société se caractérisera par une surabondance d'informations.
Le défi sera de ne pas confondre l'accessoire et l'essentiel »*
- Aurélie Royet-Gounin

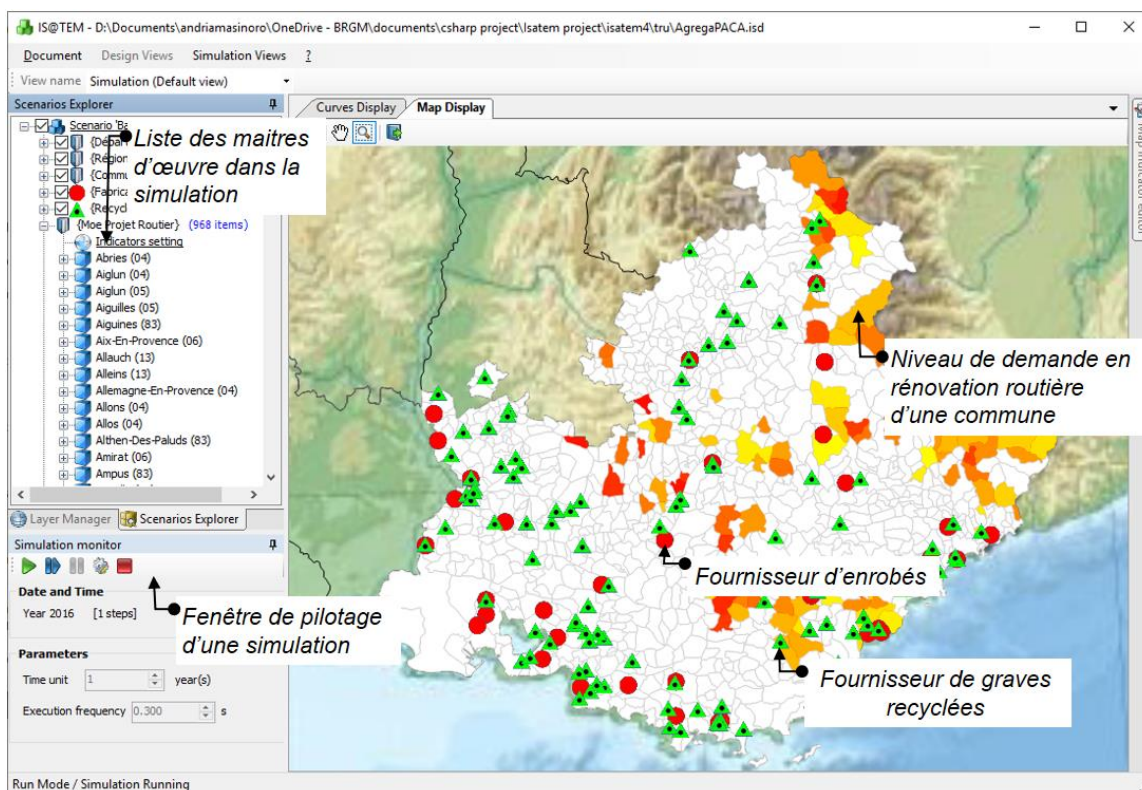
Annexe I. Les modèles de simulation développés (extraits résultats)

« La mathématique est une science dangereuse :
elle dévoile les supercheries et les erreurs de calcul »
- Galilée

Préambule : une vue de l'interface de la plateforme de simulation Is@Tem

Avant que les différents modèles ACE développés ne soient présentés, la Figure 1 ci-dessous présente au préalable l'interface de la plateforme de simulation ACE Is@Tem (cf. détail dans la section II.3.2.4 en page 51) que j'ai développée durant le parcours et qui intègre des données SIG au format vectoriel (point, ligne, polygone). L'exemple montré sur la figure porte sur la simulation de la répartition géographique de la demande en granulats recyclés et en enrobés pour la rénovation de route en région PACA (France).

Annexe Figure 1 : Un aperçu de l'interface de la plateforme de simulation ACE Is@Tem développée par le candidat durant le parcours.



Tous les modèles ACE de mon parcours, sauf ceux de la mine artisanale, ont été implémentés sur cette plateforme.

Passons à présent en revue les différents modèles de filière.

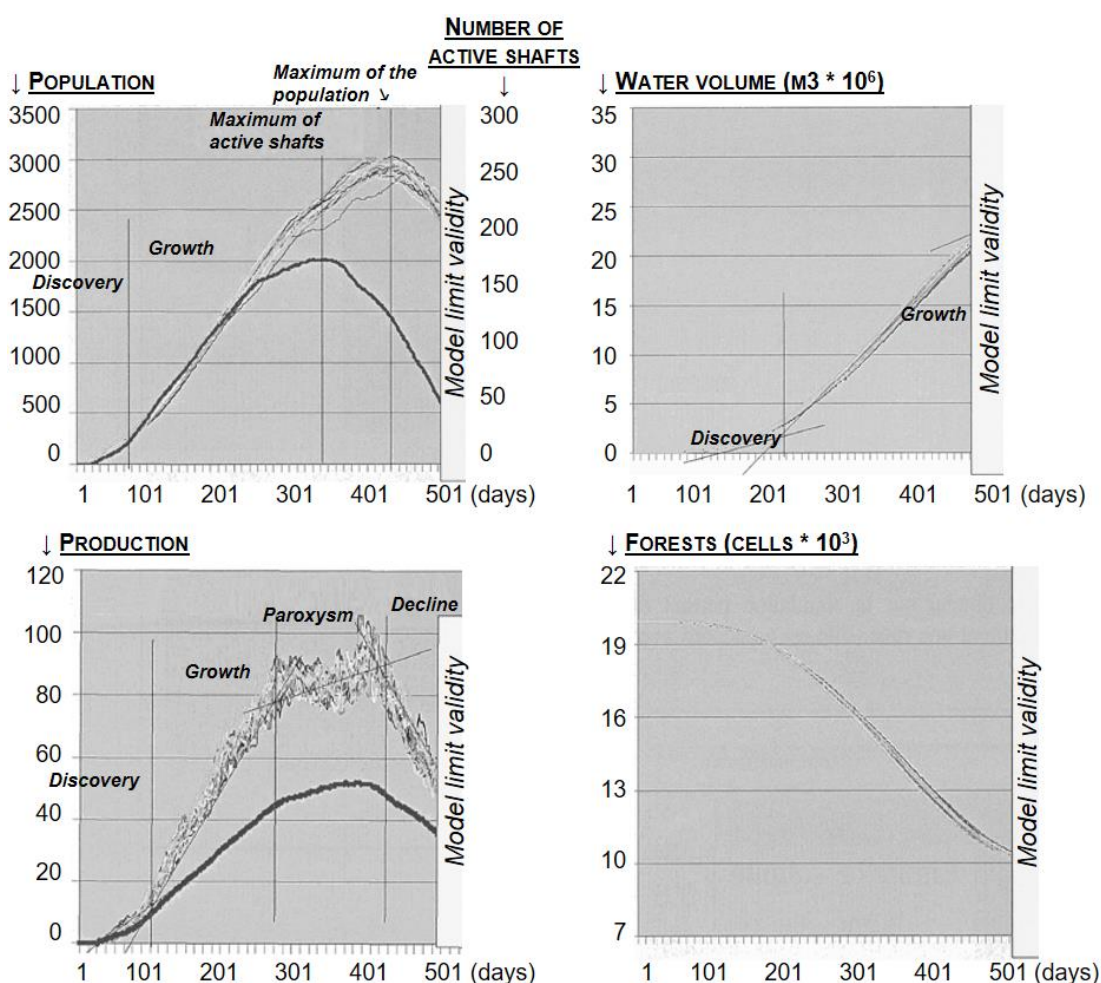
La filière « mine artisanale »

☞ le contexte détaillé de cette sous-section peut être trouvé dans la section II.3.1.2 en page 46, du texte principal.

La ruée vers l'or (Burkina Faso)

La Figure 2 ci-dessous montre un échantillon des résultats de la simulation ACE de la ruée vers l'or au Burkina Faso. Les questions posées ont été les suivantes : (a) quelle est l'étendue géographique d'une ruée ? (b) combien de temps dure-t-elle ? (c) quel est son impact dans le temps en termes de taille de population attirée, de production réalisée et environnemental (mesuré en bois utilisé et volume d'eau dépensé) ?

Annexe Figure 2 : Extraits des résultats de la simulation de la ruée vers l'or au Burkina Faso : durée, production et impacts.



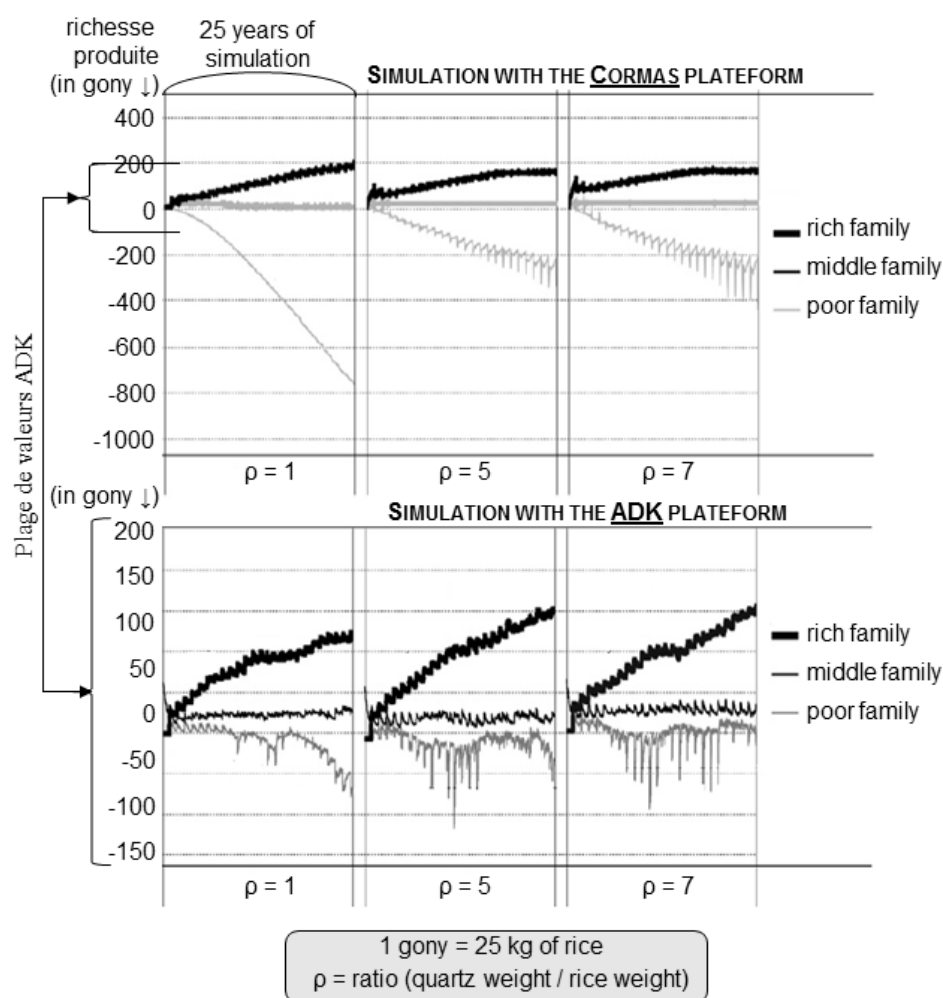
Le modèle a été implémenté par un collègue sur la plateforme multi-agents Cormas (Bousquet et al., 1998). Mon intervention portait sur l'intégration du travail dans l'état de l'art et le pilotage de la publication correspondante.

Par rapport aux questions posées, la Figure en page 130 indique que la durée d'une ruée est d'environ 500 jours, de sa création à son déclin.

L'impact socioéconomique de la filière quartz (Madagascar)

La Figure 3 ci-dessous montre un échantillon des résultats de la simulation ACE de la filière quartz à Madagascar. La filière est active uniquement dans une stratégie de survie (c'est-à-dire lorsque l'agriculture n'est pas rentable). Les questions posées ont été les suivantes : *quels seraient les impacts de l'activité dans cette filière sur l'évolution de la répartition de la population locale (riche, moyenne, pauvre) – dont l'état est mesuré en stock de riz, si l'on tient compte des activités autres que minières comme la culture du riz, du girofle et de la vanille (tous ramenés à l'équivalent riz) ?*

Annexe Figure 3 : Extraits de résultats de la simulation de la filière quartz à Madagascar selon 2 modèles : Cormas (sans réactivité de la famille) et ADK (avec réactivité de la famille).



Avant mon arrivée au BRGM, un premier modèle a déjà été développé par un collègue, sur la plateforme CORMAS. À mon arrivée, avec un des bagages la plateforme ADK (cf. l'histoire dans

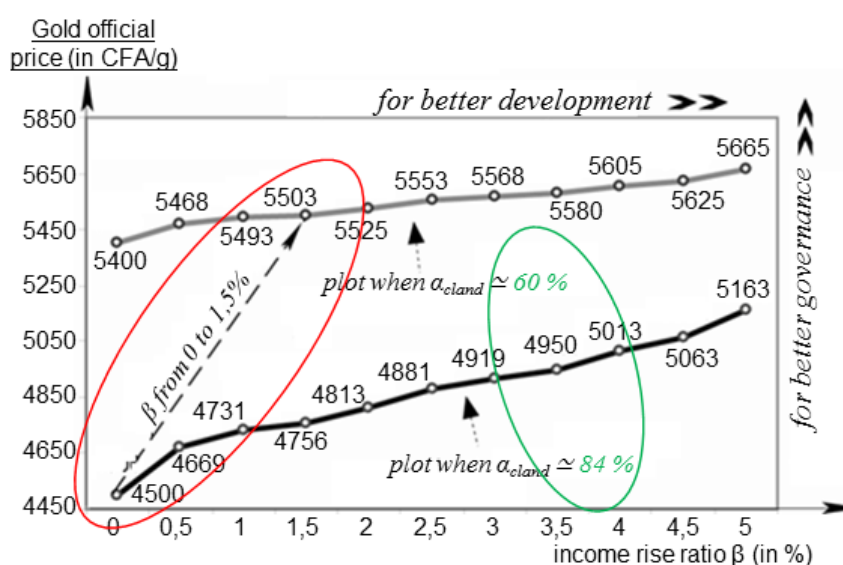
la section II.2.1 en page 41), j'ai développé un second modèle sur cette dernière plateforme. Dans ce second modèle, il a été ajouté un comportement de réactivité de la famille.

La Figure en page 131 montre que sur les deux plateformes, l'exploitation du quartz a un impact positif sur la situation économique de la population. Cependant, comme nous sommes dans une stratégie de survie, une richesse implique un abandon de l'activité au profit de l'agriculture (la culture de base) et donc une diminution du quartz à exporter pour le besoin du marché mondial. La figure indique également que la réactivité introduite particulièrement dans le modèle ADK a eu un impact sur le nombre des populations riches (réduites de moitié) et pauvres (moins nombreuses aussi).

La gouvernance de la filière or (Burkina Faso)

La Figure 4 ci-dessous montre un échantillon des résultats de la simulation ACE de la formalisation de la filière mine artisanale « or » sur le site Alga au Burkina Faso. Les questions posées ont été les suivantes : (a) dans un objectif de développement, jusqu'où serait-il possible d'augmenter le salaire d'une population de ce site ? et (b) dans un objectif de bonne gouvernance, jusqu'où serait-il possible de réduire l'importance des acheteurs clandestins dans la filière ASGMA ?

Annexe Figure 4 : Extraits de résultats de la simulation de la formalisation de la filière « or » sur le site Alga (Burkina Faso) : effet du salaire (β) sur le niveau de clandestinité (a).



J'ai piloté intégralement le développement de ce modèle. Il a été implémenté sur la plateforme ADK.

La Figure ci-dessus peut être interprétée comme suit : si les autorités souhaitent augmenter le revenu des acteurs de $\beta = 1.5\%$ (pour un meilleur développement) tout en diminuant la part des acheteurs clandestins, α de 84 à 60 % (pour une meilleure gouvernance), le prix officiel de l'or devrait être augmenté jusqu'à au moins 5 500 CFA/g.

La filière « granulats et économie circulaire »

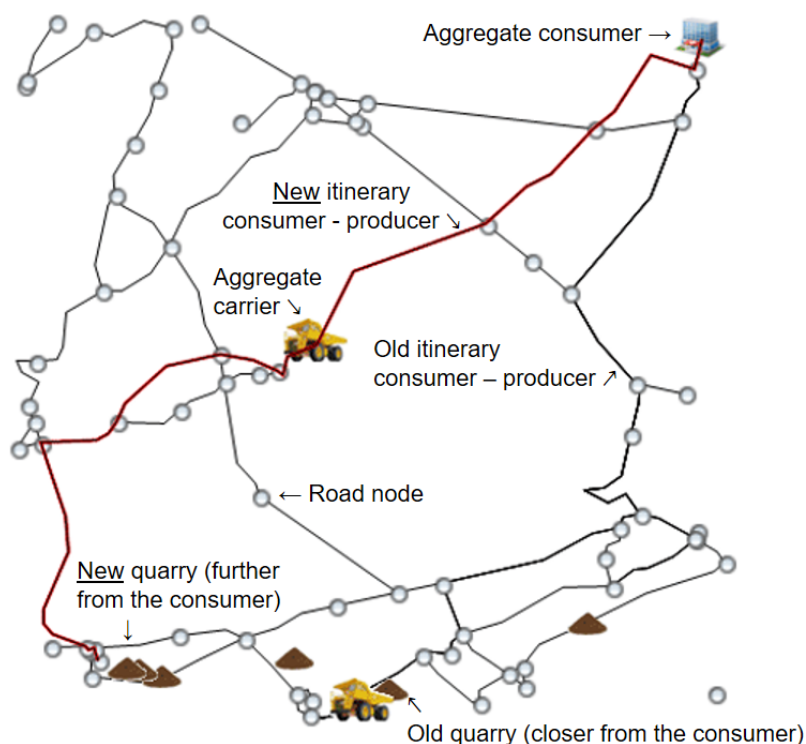
☞ le contexte détaillé de cette sous-section peut être trouvé dans la section II.3.2.2 en page 48, du texte principal.

Les conséquences de la fin de centres de production - Seine-Maritime (France)

La Figure 5 ci-dessous montre un échantillon des résultats que j'ai produits sur la simulation ACE de la filière des granulats à l'échelle d'une boucle en Seine-Normandie (France). La question posée était la suivante : où la consommation locale trouverait-elle de nouvelles carrières en cas de fermeture de carrières alluvionnaires existantes, en sachant les contraintes de coût de transport ?

La Figure ci-dessous propose un nouvel itinéraire pour aller vers une carrière non épuisée (forcément plus loin que la carrière initiale fermée).

Annexe Figure 5 : Extraits de résultats de la simulation ACE de la filière granulats dans une boucle en Seine-Normandie (France) : passage d'un itinéraire de 12 km de la zone de consommation vers la carrière actuelle (en fin de vie) à un itinéraire de 16 km (vers la nouvelle carrière).



Les conséquences de la fin de centres de production - échelle nationale (France)

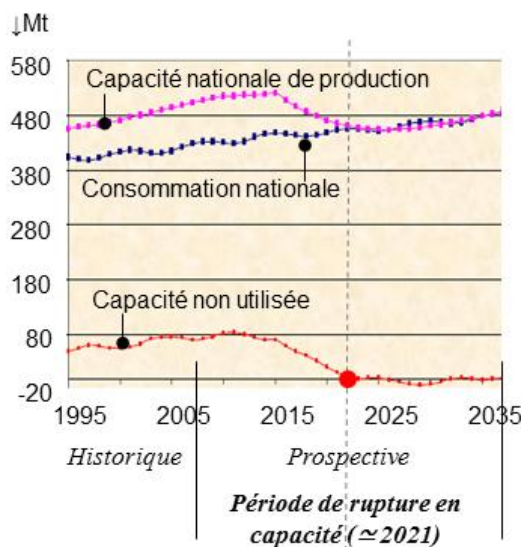
La Figure 6 en page 134 montre un échantillon des résultats de la simulation de la filière des granulats à l'échelle de la France. La question posée était la suivante : quelles seraient, à l'échelle de la France et sur les 30 prochaines années (2005-2035), les conséquences de la fin du

renouvellement des réserves autorisées actuelles (2006) des granulats, sur les aspects environnementaux, marché et société, appareil de production et de transport ?

Le modèle a été implémenté sous VENSIM® par le partenaire ARMINES. J'ai contribué à la réflexion durant toute la mise en œuvre du modèle de simulation.

La Figure ci-dessous indique que la fin du renouvellement des réserves autorisées pour les roches meubles à partir de 2015 pourrait conduire à une pénurie possible de granulats en France à l'échéance 2020-2022 si aucune stratégie de report vers d'autres types de granulats n'est organisée.

Annexe Figure 6 : Extraits de résultats de la simulation prospective (2005-2035) de la filière granulats à l'échelle nationale (France) : rupture en capacité d'approvisionnement en granulats pour 2021 si pas de renouvellement de réserves.

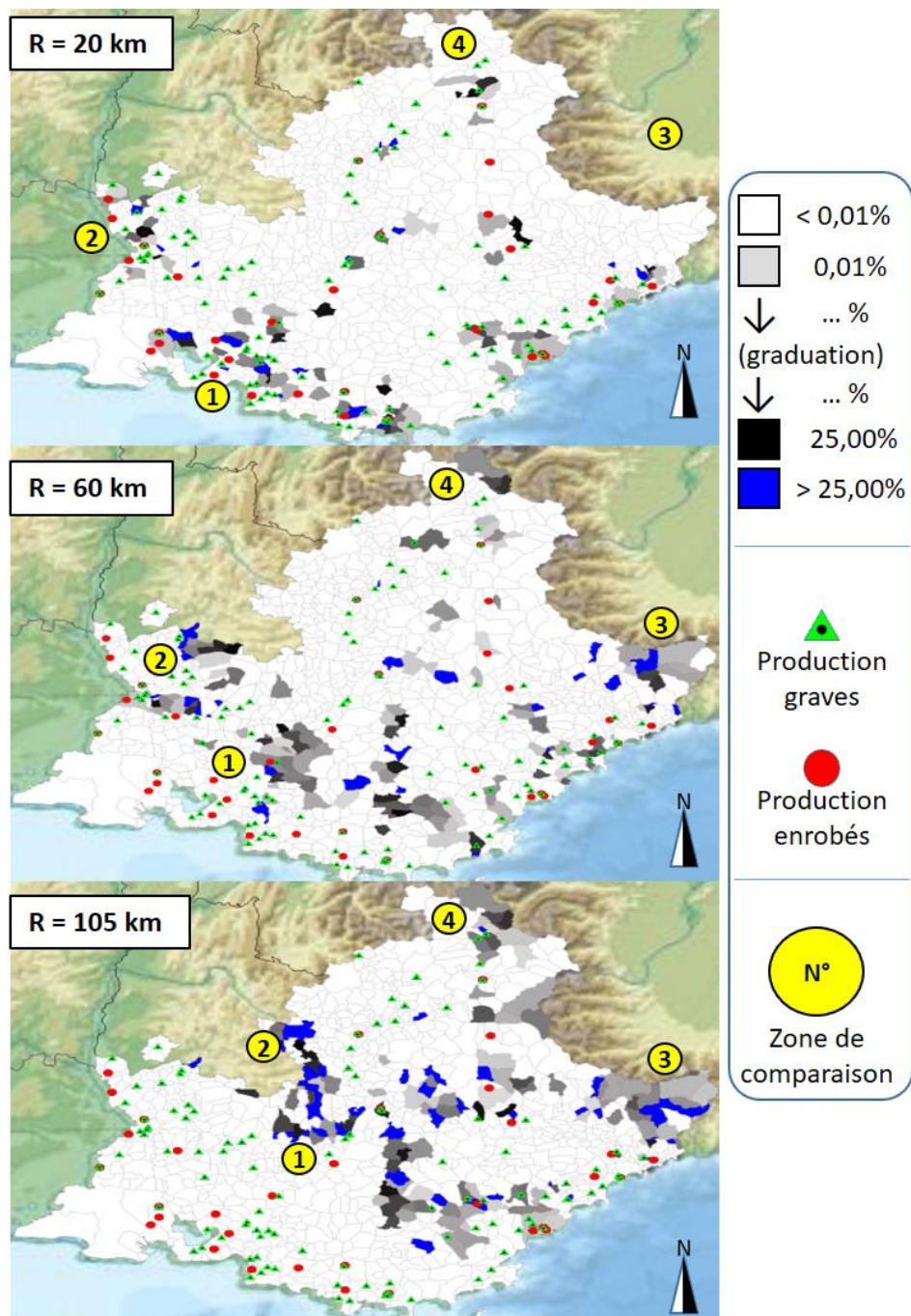


La distribution géographique de la demande en granulats recyclés - région PACA (France)

La Figure 7 en page 135 montre un échantillon des résultats qui ont émergé de la simulation ACE de l'économie circulaire des granulats en région PACA. La question posée était la suivante : *dans le cadre de l'élaboration plan régional de prévention et de gestion des déchets (PRPGD) en région PACA, et en se basant sur la localisation des sites de production de granulats recyclés et d'enrobés, quelle serait, en 2015, la répartition géographique possible, par municipalité, et par département, du taux de rénovation des routes ?*

La Figure en page 135 indique que les plateformes de recyclage et les centrales d'enrobés qui se situent à proximité entre elles créent un effet « rénovation » dans les municipalités voisines. *A contrario*, les plateformes ou centrales qui sont isolées ne le génèrent pas. Parfois le calcul va jusqu'à estimer des municipalités qui renouvellent 25 % de leurs routes ou plus, ce qui paraît un chiffre très important et très éloigné de la réalité. Cela correspond à des situations où une municipalité « monopolise » la production d'un couplet centrale-plateforme. Plus le rayon d'influence est important, plus cet effet s'incrémente. Par ailleurs, si on observe également les zones numérotées de 1 à 4 et l'évolution de leur déplacement lorsqu'on augmente le rayon de recherche, on constate que les travaux de rénovation de la zone Nord-Est s'intensifient au détriment de ceux de la zone Sud-Ouest.

Annexe Figure 7 : Extraits de résultats de la simulation de l'économie circulaire des granulats en région PACA : répartition du taux de rénovation de chaque municipalité en fonction du rayon de recherche R simultanée de fournisseurs en graves et en enrobés.



La filière « charbon »

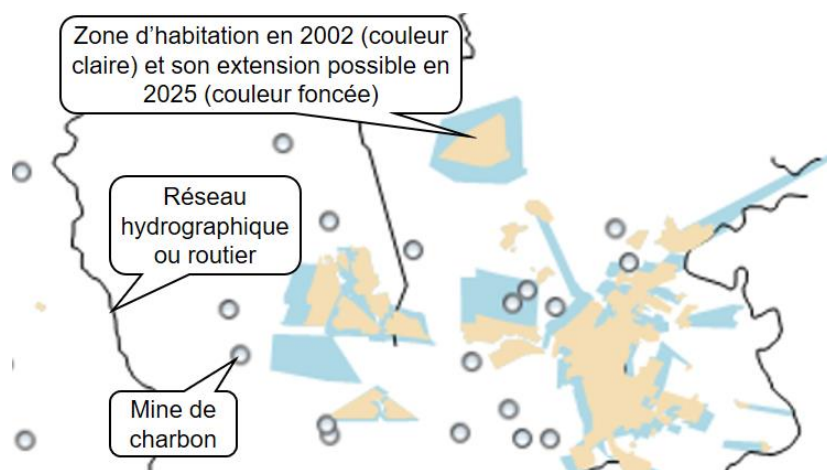
☞ le contexte détaillé de cette sous-section peut être trouvé dans la section [II.3.3.2 en page 53](#), du texte principal.

L'impact de l'activité minière sur l'extension urbaine - eMalahleni (Afrique du Sud)

La Figure 8 ci-dessous montre un échantillon des résultats que j'ai produits sur la simulation ACE de la filière « charbon » à eMalahleni en Afrique du Sud. La question posée était la suivante : *quel serait l'impact de l'activité minière (charbon) sur l'extension urbaine dans eMalahleni en 2025 ?*

L'extension devait ici tenir compte des contraintes géographiques comme les réseaux hydrogéologiques et les zones protégées.

Annexe Figure 8 : Extraits de résultats de la simulation de l'impact prospectif de l'activité minière sur l'évolution de la zone urbaine d'eMalahleni en 2025.



La filière « métaux stratégiques »

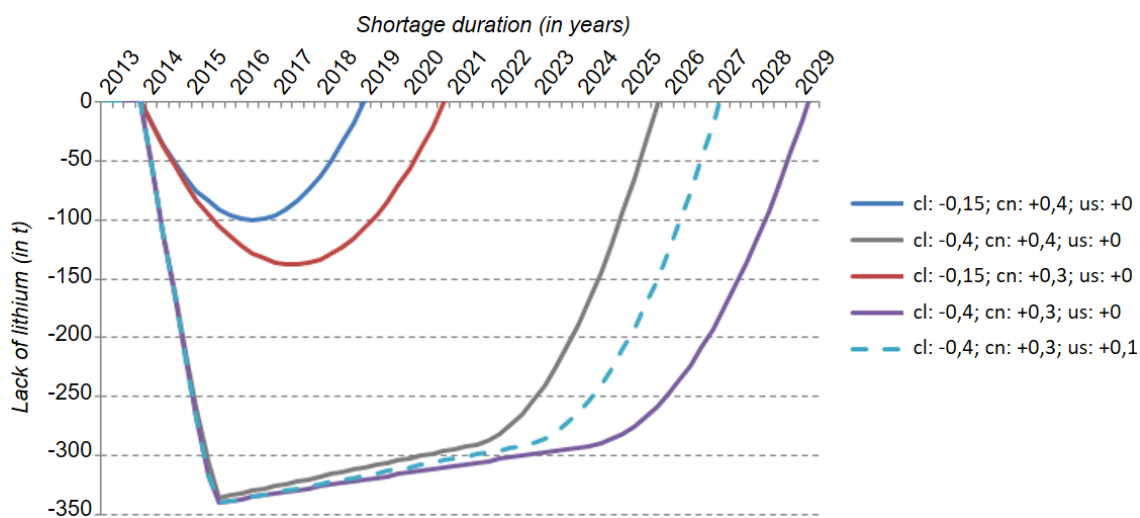
☞ le contexte détaillé de cette sous-section peut être trouvé dans la section [II.3.4.2 en page 54](#), du texte principal.

L'évaluation prospective des périodes de rupture d'approvisionnement en lithium (France)

La Figure 9 en page 137 montre un échantillon des résultats qui ont émergé de la simulation ACE de la filière « lithium » à l'échelle internationale. La question posée était la suivante : *suite à une certitude de hausse de la demande, croisée à une incertitude de l'approvisionnement, dans combien de temps y aurait-il une rupture d'approvisionnement en lithium, à la fois sur le marché mondial et dans les industries de consommation en France ?*

La Figure en page 137 présente un scénario de restriction d'exportation par le Chili (cl) suivi d'une tentative de compensation conjointe par la Chine (cn) et par les États-Unis (us).

Annexe Figure 9 : Extraits de résultats de la simulation de l'évaluation prospective des périodes de rupture d'approvisionnement en lithium (France) selon des scénarios de restriction et de compensation par le marché mondial.

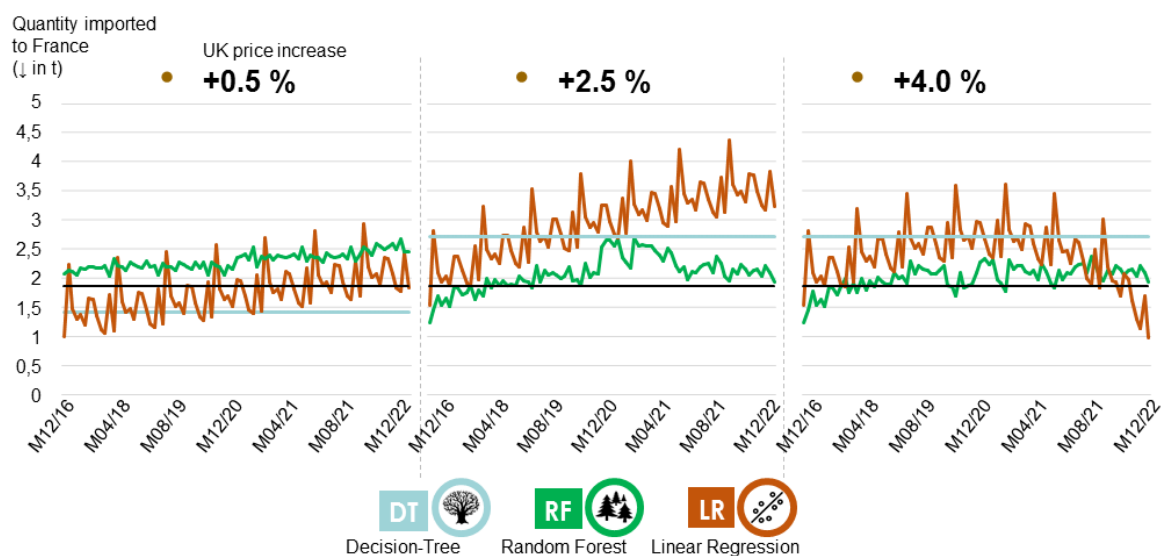


L'évaluation prospective de l'importation du cobalt (France)

La Figure 10 en page 138 montre un échantillon des résultats que j'ai produits sur la simulation ACE de la filière cobalt à l'échelle internationale. La question posée était la suivante : *quels sont les déterminants de l'importation française en cobalt ? comment un changement prospectif de ces déterminants affecterait l'importation française en cobalt dans le futur ?*

La Figure en page 138 montre les effets de l'augmentation du prix du cobalt (selon 3 scénarios) en provenance du Royaume-Uni sur cette importation, et selon 3 modèles de « Machine-Learning » : la régression linéaire (LR), l'arbre de décision (DT) et les forêts aléatoires (RF).

Annexe Figure 10 : Extraits de résultats de la simulation prospective (2022) de l'importation du cobalt en (France) en fonction de l'augmentation du prix du cobalt en provenance du Royaume-Uni et selon 3 modèles de « Machine-Learning ».



Annexe II. Des exemples d'outils issus de la recherche-action

« On peut utiliser les ordinateurs les plus fous pour étudier les chiffres mais au final, il faudra faire un planning et passer à l'action »

- Lee Lacocca

Le calculateur simplifié d'accompagnement du jeu de rôles

le contexte détaillé de cette sous-section peut être trouvé dans la section II.4.3.3 en page 61, du texte principal.

La Figure 11 ci-dessous présente une vue de l'outil d'aide à la décision que j'ai développé, visant à accompagner les joueurs du jeu de rôles 'granulats et économie circulaire (déchets BTP)'. L'outil se présente sous forme de calculateur simplifié permettant à un joueur d'évaluer les coûts de ses décisions (ex : implantation de sa carrière) avant de l'exécuter effectivement dans le jeu. Il permet aussi un gain de temps pour le jeu car il implémente tout calcul nécessaire au jeu, hormis les négociations.

Annexe Figure 11 : L'outil d'accompagnement (calculateur thématique) pour le jeu de rôles 'granulats et économie circulaire' : pour 5 km de route à rénover, il y a besoin de 9.6 kt de graves recyclées.

Action : rénover route

EN ENTRÉES DU CALCUL

Paramétrage des variables en entrée

Nom propriété	Valeur	Unité
DÉCISION IMPLANTATION		
Longueur route à rénover	5	km

Données en entrée : 5 km à rénover

Réinitialiser

RESULTATS DU CALCUL

Nom propriété	Valeur	Unité
Besoins en matériaux		
Besoins en enrobés pour rénovation route	17,3	kt
Besoins en graves recyclées pour rénovation route	9,6	kt
CO2		
CO2 généré par la construction de route	1925	t

Données en sortie : besoins en matériaux (kt) et CO2 généré (t)

LES CONSTANTES DU CALCUL (HYPOTHÈSES)
(affichées uniquement à titre d'information)

Nom propriété	Valeur	Unité
Nombre de voies route à rénover	2	
Ratios		
Ratio enrobés pour rénovation route	0.675	t/voie/m
Ratio graves recyclées pour rénovation route	0.375	t/voie/m
Ratio CO2 par surface construite	55	kg/m2

Coefficients de transformation utilisés

AUTRE OUTIL D'AIDE AU CALCUL

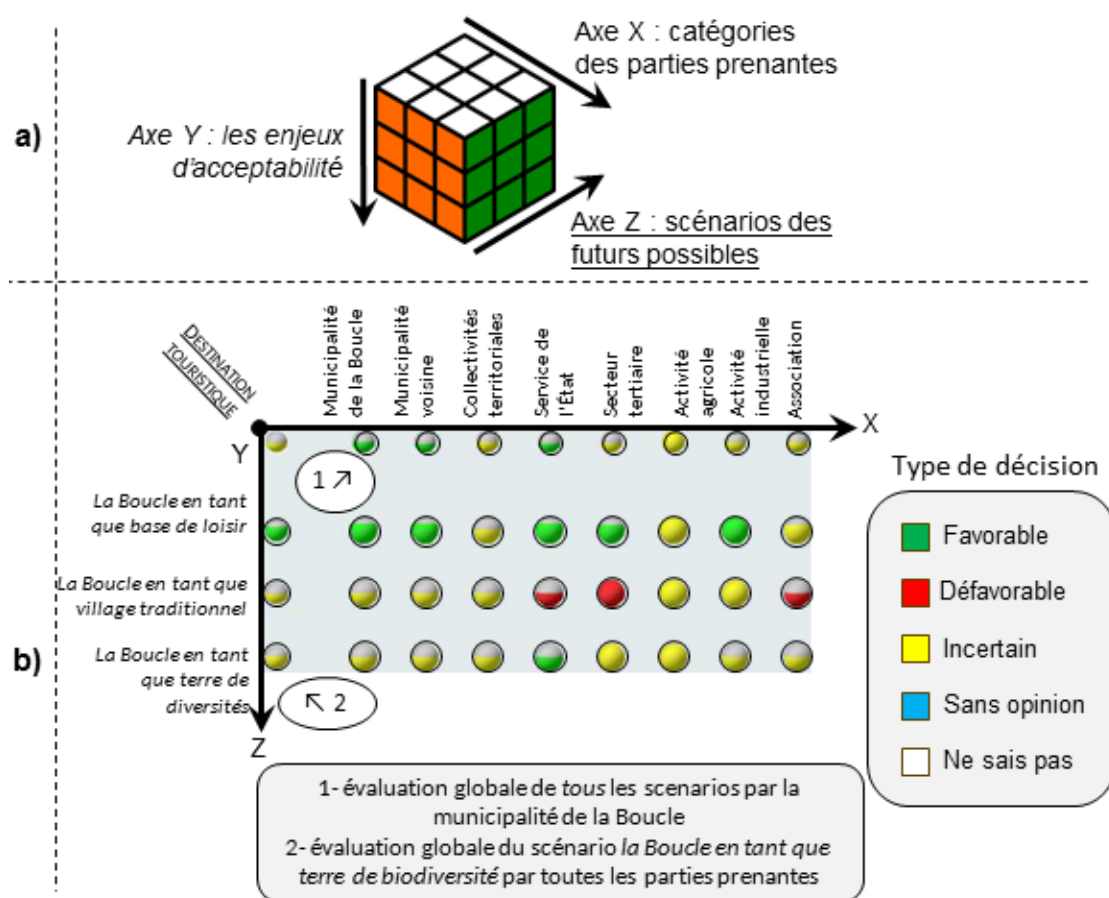
Lancer le calculateur Windows

La matrice de délibération

le contexte détaillé de cette sous-section peut être trouvé dans la section II.4.3.3 en page 61, du texte principal.

Conçu sur l'idée du Rubik's Cube(TM), la matrice de délibération constitue une méthode et un outil informatique qui permet de structurer la comparaison de différents scénarios d'avenir d'un territoire, coconstruits par les acteurs. Elle est structurée en 3 axes d'évaluation multicritères et multi-acteurs : (X) un axe « catégories d'acteurs », ceux qui vont porter un jugement, (Y) un axe « enjeux de performance » et (Z) un axe « scénarios ». Le jugement est composé d'un panier composé de 1 à 5 indicateurs qui proviennent, soit d'indicateurs préconçus, soit d'indicateurs proposés directement par les acteurs eux-mêmes. Pour chacun des indicateurs retenus, un jugement via une affectation de codes couleurs sera exprimé. Ce jugement va de « Favorable » – couleur verte – à « Ne sais pas » – couleur blanche. La Figure 12 ci-dessous donne un exemple concret de cette matrice.

Annexe Figure 12 : L'outil « matrice de délibération » utilisé par INTEGRAAL pour l'évaluation de scénarios : (a) sa structure et (b) un exemple d'enjeu consistant à faire de la Boucle de Moisson une destination touristique.



Source : l'exemple est tiré de (Reichel et al., 2010).

L'exemple illustre les travaux de (Reichel et al., 2010) portant sur l'évaluation, par les parties prenantes, de 3 scénarios en vue de considérer la commune de la Boucle de Moisson (région Île-de-France) comme une destination touristique.

L'attribution des couleurs sur le jugement final à partir des évaluations de chaque type d'acteurs se déroule comme suit :

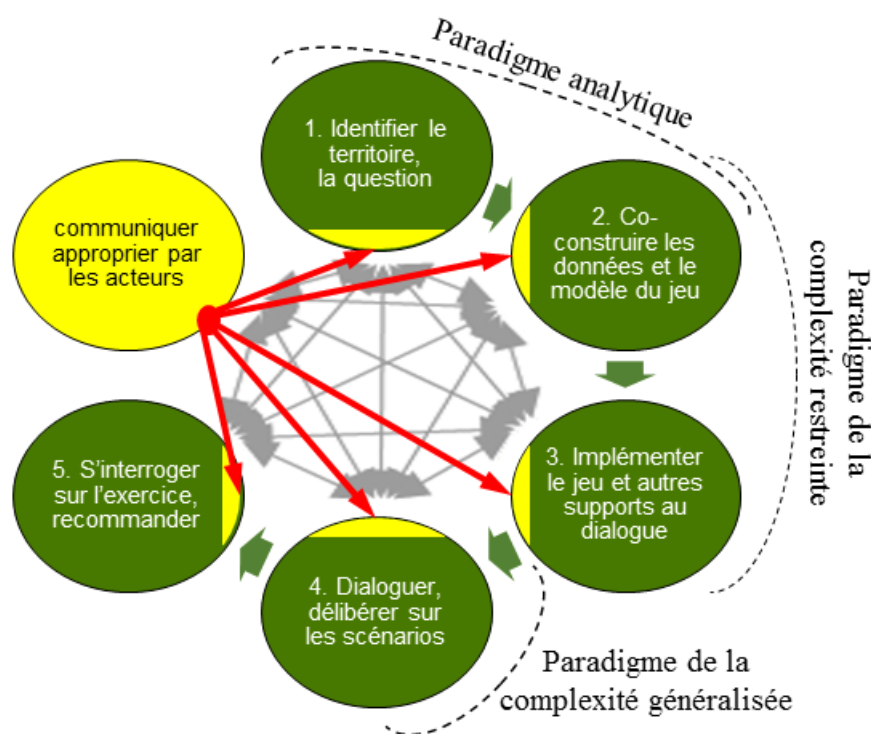
- lorsque que les valeurs retenues dans les indicateurs ne sont pas les mêmes, comme dans l'exemple du tableau 1, le jugement synthétique se remplit proportionnellement avec la couleur dominante ;
- lorsqu'on est dans une situation avec 2 indicateurs, l'un avec une valeur Verte et l'autre avec une valeur Rouge par exemple, c'est la valeur Rouge qui apparaîtra (la valeur la moins favorable est retenue dans le jugement synthétique, ce qui favorise le dialogue entre les acteurs) ;
- lorsqu'on est dans une situation avec 3 indicateurs et tous de valeur différente, c'est le Jaune qui apparaîtra comme jugement synthétique (l'incertitude).

Les outils pour la formalisation du secteur « mine artisanale » (ASM)

☞ le contexte détaillé de cette sous-section peut être trouvé dans la section [II.5.2.2 en page 68](#), du texte principal.

Il y a actuellement une réflexion en cours (théorique à ce stade) visant à mettre en place un processus scientifique clair de conduite d'une recherche-action participative basé sur des jeux sérieux, pour aide à la résolution de la problématique de formalisation de l'ASM en Afrique (cf. section [II.5.2 en page 68](#)). Le point d'entrée scientifique proposée ici est la méta-méthode INTEGRAAL (O'Connor and Da Cunha, 2011) car elle est intéressante pour communiquer les grandes étapes de la démarche aux parties prenantes du secteur. Pour cela, la version initiale d'INTEGRAAL (cf. [Figure II.5 en page 61](#)), avec 6 étapes principales, est transformée en une démarche composée de 5 étapes principales (parcourues de manière toujours non linéaire) auxquelles s'ajoute une sous-étape de communication et d'appropriation ([Figure 13 en page 142](#)). Cette sous-étape est effectuée au début et à la fin de chacune des autres étapes sachant que la communication à la fin d'une étape et celle au début de l'étape suivante peut être la même. La figure présente également l'association entre chaque étape et les 3 niveaux de paradigme introduits dans la section [Figure I.4 en page 26](#).

Annexe Figure 13 : Les grandes étapes proposées pour la recherche-action participative dans la formalisation du secteur ASM ainsi que les paradigmes associés.

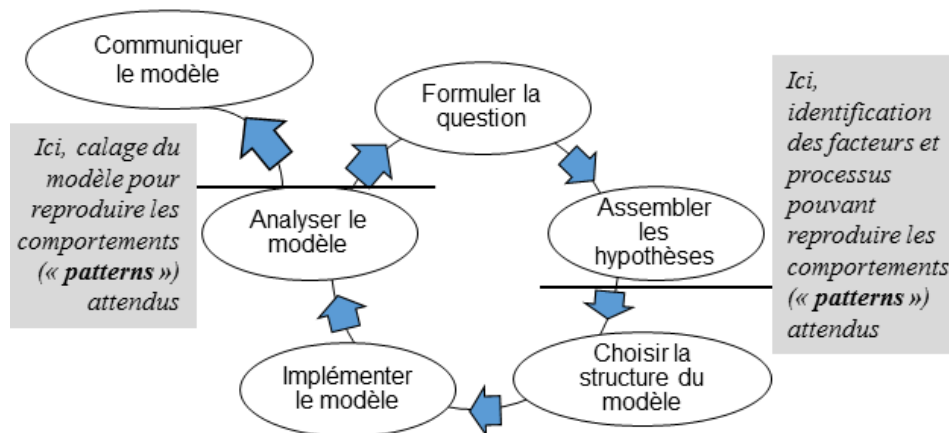


Source : la version originelle d'INTEGRAAL est tirée de (O'Connor and Da Cunha, 2011) et les paradigmes associés sont tirées de la Figure 1.4 en page 26.

Cependant, si INTEGRAAL est une méta-méthode intéressante comme communication des grandes étapes d'approche des acteurs du terrain (autorités, villageois, travailleurs sur mine), dans la version rapide et simplifiée de celle-ci, ces différentes étapes sont formulées de manière trop abstraite (manque de spécification) pour être utilisables telles quelles à un niveau opérationnel en termes de démarches de coconstruction et de communication. L'idée envisagée dans la présente conception consiste alors à effectuer un couplage d'INTEGRAAL avec d'autres approches scientifiques. Ce couplage est ordonné comme suit, du plus abstrait au moins abstrait : INTEGRAAL, COMMOD (cf. page 67), POM (cf. page 66), ODD + D (cf. page 66) et ARDI (cf. page 67).

Avant d'illustrer ce couplage, le mémoire présente dans la Figure 14 en page 143 ce qu'est POM ou « Pattern-Oriented Modelling ».

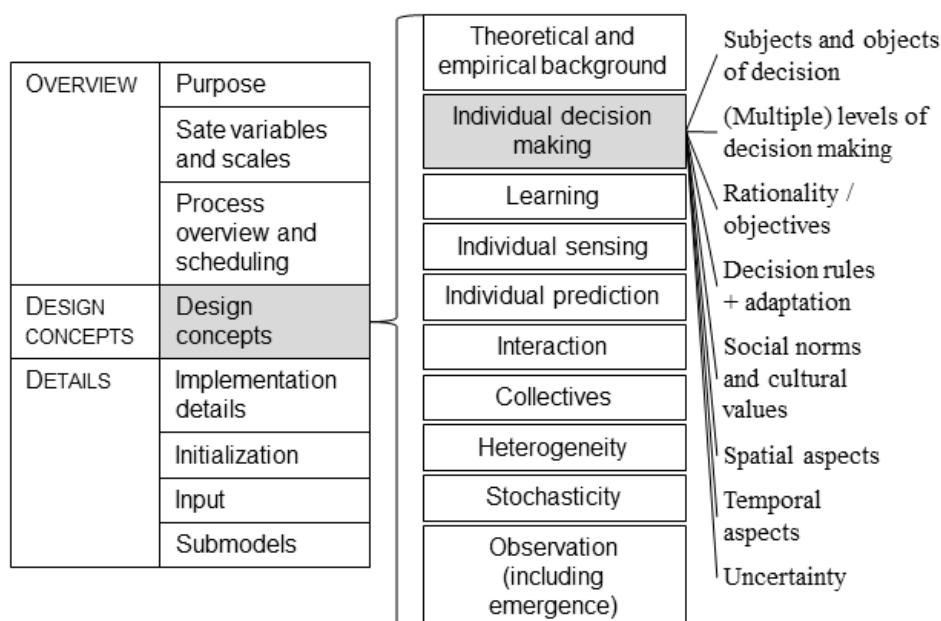
Annexe Figure 14 : Illustration du « Pattern-Oriented-Modelling » - POM - à travers le cycle de modélisation d'un « Agent-Based-Modelling ».



Source : (Grimm and Railsback, 2012).

Enfin, la Figure 15 ci-dessous décrit les composants du protocole ODD+D (sans expliciter toutefois les questions contenues à l'intérieur de ces composants).

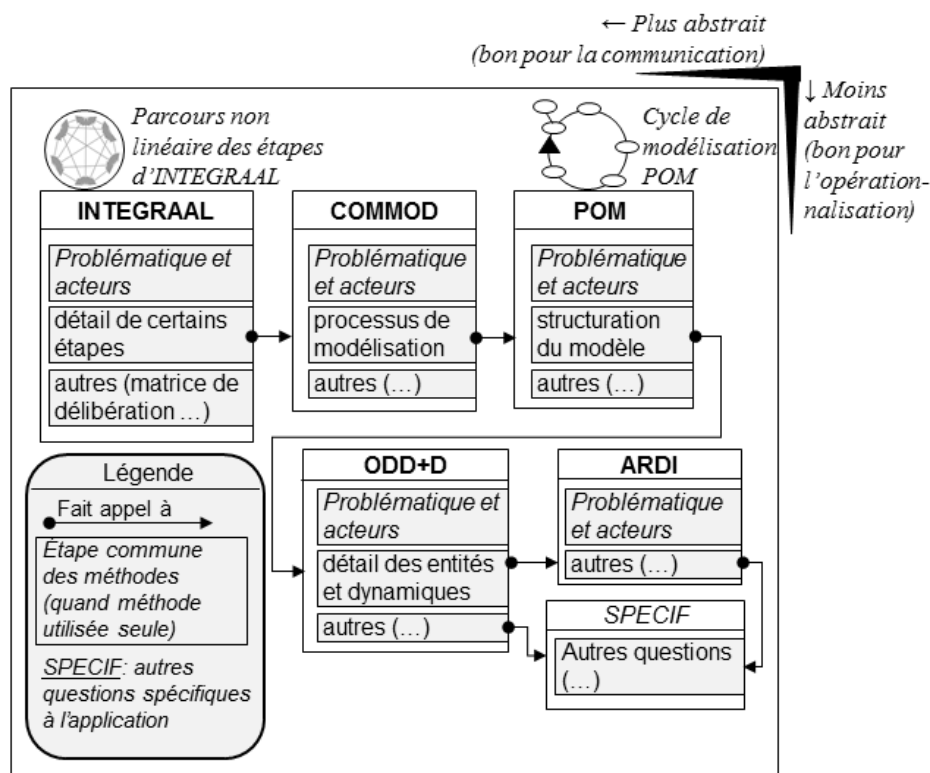
Annexe Figure 15 : Description des composants principaux du protocole ODD + D.



Source : (Müller et al., 2013).

Passons à présent au couplage : celui-ci se caractérise par le fait que de manière récursive, une approche plus abstraite fait appel à l'approche suivante, moins abstraite, lors de l'exécution d'une ou de plusieurs de ses fonctionnalités à un niveau plus opérationnel (cf. Figure 16 en page 144).

Annexe Figure 16 : Schéma de couplage (théorique à ce stade) entre différentes approches scientifiques de recherche-action pour aide à la formalisation du secteur ASM.



Le tableau 1 en page 145 fait ensuite un zoom spécifique sur le couplage des deux premiers à savoir INTEGRAAL et COMMOD.

Précisons que le schéma de la Figure 16 ci-dessus s'applique à la construction d'un ACE. Elle reste néanmoins tout aussi valable dans la construction d'un jeu de rôles. En effet, lorsque situé à l'échelle d'un territoire, il y a de forts points communs entre un modèle ABM et un jeu de rôles (perception partielle, règles de décision hétérogènes ...). ODD, initialement conçu pour communiquer des ABMs et devenu ensuite un outil pour conceptualiser des ABMs (Zwanzig, 2018), est donc aussi adapté pour conceptualiser le jeu. La formulation se construit via le questionnement des acteurs par le modélisateur, en suivant les questions guides du protocole ODD (plus précisément ici ODD+D), mais en changeant ici le terme « modèle » (le terme existant au départ dans les questions de ce protocole) par le terme « jeu ». Ensuite, pour se focaliser spécifiquement sur les entités de type « acteurs », « ressources » et « territoire », ODD+D fera appel aux questions guides de la méthode ARDI.

Annexe Tableau 1 : Couplage (théorique à ce stade) des processus INTEGRAAL (contenant les étapes principales, les sous-étapes de communication et la matrice de délibération) et COMMOD (contenant les autres sous-étapes).

Étape du processus INTEGRAAL	Détail de l'étape via le processus COMMOD
Étape 1 : Identifier le territoire, la question	Étape 1.1. - identification du territoire d'études - constitution du noyau dur (équipe projets, représentants acteurs locaux) dont la composition dépendra du territoire concerné par la formalisation - première réunion du noyau pour validation de la question posée, de la démarche scientifique et du calendrier
	Étape 1.2. - sensibilisation plus large vers les acteurs du territoire sur l'intérêt de la démarche (apport potentiel par rapport à leur prise de décision, etc.) - ajustement/validation des points de l'étape 1.1 avec ces acteurs - évaluation de l'opportunité de poursuivre le projet ou non (réussite ou non de la mise en place territoriale)
	Étape 1.3. - restitution des résultats de l'étape 1 et, si le projet continue, communication sur les prochaines étapes
Étape 2 : Co-construire les données et le modèle conceptuel du jeu	Étape 2.1. inventaire des connaissances sur l'accompagnement sociétal d'aide à la formalisation des filières ASM sur un territoire africain (état de l'art, interview)
	Étape 2.2. - coproduction de connaissances sur les scénarios de fonctionnement actuel et futur souhaité du territoire d'étude - structuration des connaissances sociétales résultantes en termes d'acteurs, d'objectifs, d'enjeux liés à la formalisation, d'indicateurs pertinents, ...
	Étape 2.3. construction de la dynamique du modèle (a) avec les acteurs du territoire et (b) avec inclusion des acquis de la littérature
	Étape 2.4. - documentation complète du modèle sous une forme accessible aux non-initiés (incluant l'explication du niveau de simplification / du lien entre le jeu et la réalité, du raisonnement derrière le choix des concepts et des données issus de la littérature, des incertitudes, etc.) - validation du modèle par les acteurs (sous une forme à définir) : validité des fonctionnalités, élimination des incompréhensions, validité partagée du contenu, etc.

Étape du processus INTEGRAAL	Détail de l'étape via le processus COMMOD
Étape 2 : Co-construire les données et le modèle conceptuel du jeu (suite)	Étape 2.5. restitution des résultats de cette étape 2 et communication sur les prochaines étapes
Étape 3 : Implémenter le jeu et autres supports au dialogue	Étape 3.1 - construction du plateau de jeu et de l'outil de simulation informatique implémentant les processus économiques et environnementaux - tests de l'ensemble par le concepteur (calibrage, vérification, sensibilité ...)
	Étape 3.2 - prise en main du jeu par le noyau dur mis en place dans l'étape 1.1 - validation préliminaire par le noyau dur : validité des fonctionnalités, test de robustesse, élimination des incompréhensions, test de facilité d'utilisation, etc.
	Étape 3.3 - prise en main de l'outil par les acteurs du territoire d'étude - validation avec les mêmes critères que ceux de l'étape 3.2 mais à l'échelle de la connaissance des acteurs locaux
	Étape 3.4 mise à jour (sous une forme accessible aux non-initiés) de la documentation issue de l'étape 2 pour y inclure les résultats des sous-étapes 3.1 à 3.3
	Étape 3.5 restitution des résultats de l'étape 3 et communication sur les prochaines étapes
Étape 4 : Dialoguer, délibérer sur les scénarios	Étape 4.1 - réalisation d'une ou de plusieurs sessions thématiques du jeu : apprentissage social sur le fonctionnement actuel du territoire et sur les scénarios futurs - jugement par chaque acteur des scénarios actuels et futurs face aux différents enjeux de la filière (émission des opinions et mise à jour éventuelle après observation collective) : utilisation de la matrice de délibération - validation partagée de la compréhension des différentes opinions - recherche de consensus, sans obligation de résultats
	Étape 4.2 - mise en boîte du jeu (clé USB ou CD pour la simulation informatique) pour facilitation de distribution et pour transfert d'appropriation par les acteurs sous une forme plus standard - rédaction (sous une forme accessible aux non-initiés) d'un rapport décrivant les résultats de cette étape 4

Étape du processus INTEGRAAL	Détail de l'étape via le processus COMMOD
Étape 4 : Dialoguer, délibérer sur les scénarios (suite)	Étape 4.3 restitution des résultats de l'étape 4 et communication sur les prochaines étapes
Étape 5 : S'interroger sur l'exercice, recommander	Étape 5.1 - réunion de bilan avec les acteurs sur les actions (scientifiques ou non) réalisées et sur les perspectives (ex : fonctionnalité additionnelle pour le territoire d'étude, application sur d'autres territoires) - réunion du noyau dur pour les mêmes raisons Étape 5.2 - suivi et évaluation des effets de la démarche sur les pratiques des participants du territoire d'études - émission des recommandations pour le futur Étape 5.3 mise à jour du rapport issu de l'étape 4 pour inclure les résultats de cette étape 5. Étape 5.4 restitution des résultats de l'étape 5 et communication sur les perspectives et les recommandations Étape 5.5 : formation d'autres acteurs potentiellement intéressés à l'utilisation des outils développés



