



HAL
open science

Appréciation de l'intérêt du secteur minier pour les SMA pour l'analyse prospective du marché des métaux stratégiques

Fenintsoa Andriamasinoro, Vincent Levorato

► To cite this version:

Fenintsoa Andriamasinoro, Vincent Levorato. Appréciation de l'intérêt du secteur minier pour les SMA pour l'analyse prospective du marché des métaux stratégiques. JFSMA'14: 22èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, Oct 2014, Loriol sur Drôme, France. pp.N/A. hal-01020898

HAL Id: hal-01020898

<https://brgm.hal.science/hal-01020898>

Submitted on 25 Sep 2014

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.

Appréciation de l'intérêt du secteur minier pour les SMA pour l'analyse prospective du marché des métaux stratégiques

F. Andriamasinoro^a
f.andriamasinoro@brgm.fr

V. Levorato^b
vlevorato@cesi.fr

^a BRGM – Direction des GéoRessources
3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans – La Source, France

^b CESI Recherche
959 rue de la Bergeresse – 45160 Olivet, France

Résumé

Cet article synthétise et discute les premiers résultats d'une réflexion méthodologique qui a été menée sur le niveau d'intérêt que porte le secteur minier sur l'adoption des SMA pour une analyse prospective du marché des métaux dits stratégiques (c'est-à-dire des métaux qui pourraient se raréfier en raison de possibles quotas d'exportations imposés par leurs producteurs). En résultats, après proposition d'un modèle SMA dit minimal, l'acceptation des SMA par le secteur, dans un cadre opérationnel, est prometteuse mais demeure un défi.

Mots-clés : SMA minimal, secteur minier, acceptation

Abstract

This paper summarises and discusses our first results regarding the methodological consideration of MAS by mining sector for a prospective analysis of strategic metals' markets (i.e. metals which may be a subject of possible restriction quotas by their producers). As results, after a demonstration of a MAS model, defined as minimal, to the sector, convincing it to integrate the approach at an operational level is promising but remains a challenge.

Keywords: minimal MAS, mining sector, acceptance

1 Introduction

Certaines ressources minérales de type métaux sont aujourd'hui devenues particulière-

ment stratégiques en raison du risque de leur raréfaction sur le marché mondial. En effet, des pays producteurs de ces ressources pourraient mettre en œuvre des quotas sur leur exportation pour des raisons purement politiques ou environnementales. Tel est le cas par exemple de la Chine avec les Terres rares (restriction déjà effective [7]) ou le Chili avec le lithium [3] (restriction encore hypothétique mais pas impossible). Ces quotas suscitent une inquiétude des pays comme la France qui est dépendante en importation de ces ressources en raison de leur faible quantité sur son territoire. On parle alors de criticité des métaux [8]. Aussi, afin de sécuriser l'accès à ces ressources stratégiques, le gouvernement français a créé un comité de veille pour les métaux stratégiques dont le travail vise, entre autres, à l'élaboration d'un modèle et outil prospectifs qui permettraient l'objectif (notons-le *OB*) suivant : (a) imaginer des scénarios de restriction d'exportation par des pays producteurs, (b) identifier ensuite l'ensemble de périodes probables de rupture qui correspondrait à ces scénarios respectifs et (c) de trouver les solutions alternatives éventuelles pour compenser les manques induits par ces restrictions, autant sur le marché mondial que sur les industries de consommation en France.

Cet article synthétise et discute les premiers résultats d'une réflexion méthodologique que nous avons menée sur le niveau d'intérêt que porte le secteur minier sur l'adoption de l'approche SMA pour appréhender cette ana-

lyse prospective du marché des métaux stratégiques et les enjeux liés à leur criticité. Le marché étudié à titre d'illustration est principalement celui du lithium (en raison de l'arrivée des voitures électriques). Toutefois, l'article peut parfois faire aussi référence à d'autres métaux.

2 Etat de l'art

Différents travaux ont déjà été menés par le secteur minier sur la modélisation économique, à vocation prospective, du marché du lithium, pour traiter la problématique de rupture d'approvisionnement. Ces travaux ont été réalisés aussi bien par le monde académique [9, 22] que par des consultants en lithium [15, 20] ou encore par des banques [12] ou par les compagnies productrices [4]. Dans toutes ces études, les côtés productions et consommations ont été estimés uniquement d'une manière indépendante, comme dans la figure 1, et les résultats comparés ensuite arithmétiquement.

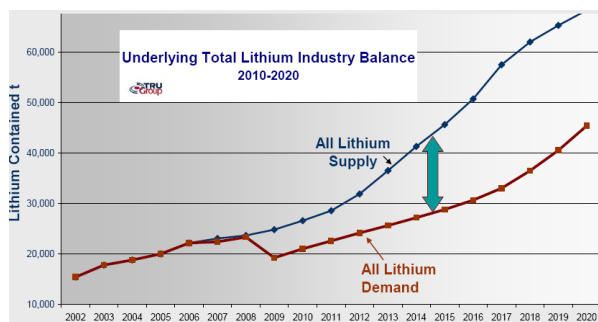


FIG. 1 - Evolution prospective du marché mondial du lithium d'ici 2020 selon [20]

Il n'y a donc pas un pilotage réciproque entre l'offre et la demande (c'est-à-dire choix d'une approche non systémique). De plus, tous les travaux ont adopté uniquement l'échelle globale comme niveau de leurs études. Cette situation est également valable pour les autres métaux stratégiques comme l'antimoine ou les Terres rares [14]. En réalité, commencer par cette approche globale est nécessaire car les ressources minérales se trouvent à un niveau global. Mais, elle n'est pas suffisante car la connaissance de la quantité disponible au niveau global n'implique pas automatique-

ment celle de la répartition par pays et le comportement en termes d'approvisionnement varie d'un pays producteur à un autre, en fonction de ses intérêts individuels et collectifs. En somme, les éléments globaux sont des indications importantes, mais ne peuvent pas répondre entièrement à l'objectif *OB*, à savoir l'impact des quotas par des pays producteurs sur des pays consommateurs.

Les SMA sont plus adéquats pour la description de ces interactions détaillées. En effet, pour l'analyse sociale et/ou économique, à vocation prospective, des filières ressources naturelles plus généralement, l'approche SMA a été jugée comme adéquate par beaucoup de travaux, de la gestion des ressources en eau [23], à celle des ressources agricoles [19], ou encore à celle des ressources halieutiques [16] (ce qui montre l'adéquation *a priori* de la méthode au type d'application). Cependant, il a été remarqué que pour la gestion des ressources naturelles minérales (en particulier les ressources de types métaux, notre enjeu thématique ici), le secteur minier n'a pas jugé adéquat d'adopter l'approche SMA. Cela se reflète par exemple au niveau des divers centres d'études géologiques dont l'analyse du marché des ressources minérales constitue un volet d'études important. Les centres allemands (BGR) et anglais (BGS) optent généralement pour une approche de modélisation plus classique (mathématique, statistique) [2] ; le centre américain (USGS) a par moment utilisé les SMA mais pour une application dans le domaine de l'écologie [13] et non des ressources minérales ; et le centre français (BRGM) a manifesté un premier intérêt pour les SMA [1] mais l'étendue de son adoption (même à des fins expérimentales) est encore bien moindre comparée à celle des autres filières de gestion des ressources naturelles, énoncées précédemment. Pourtant, même à l'échelle macroéconomique (où se situe le marché des métaux stratégiques) habituée à adopter des modèles traditionnels basés sur la recherche d'équilibre global comme le DSGE [6], des économistes ont observé que depuis la crise économique de 2008, les SMA

apparaissent plus appropriés pour anticiper une telle perturbation [18], une perturbation dont le cas étudié ici en est une occurrence (étant donné ses conséquences potentiellement dramatiques sur les industries de consommation).

La question qui se pose est donc : pourquoi cette réticence par le secteur minier vis-à-vis des SMA ? Des premières réponses peuvent être apportées selon deux sources : la littérature et la discussion avec des acteurs du secteur minier. La première source est inhérente au contexte du SMA en général (et est donc implicitement valable pour le secteur minier).

Dans la littérature, plusieurs raisons de réticence (non exhaustives) sont avancées. Entre autres :

- la valeur de la modélisation en sociologie (qui inclut les SMA) ne semble pas être généralement acceptée et les modélisateurs sont toujours sollicités pour justifier leur approche [17],
- dans l'industrie, la recherche en SMA se positionne, selon l'expérience de [21], dans une communauté isolée, créant ainsi des seuils artificiels lorsqu'il s'agit de convaincre de ses mérites
- construire un modèle d'application à base d'agents est difficile pour ceux qui ne disposent pas de compétences en programmation [11],
- du point de vue d'un utilisateur, la modélisation détaillée d'un problème réaliste peut rapidement aboutir à une simulation compliquée [5].

A propos des raisons fournies suite à nos discussions avec des acteurs du secteur minier, on peut synthétiser leur réticence à leur faible connaissance :

- de la complexité induite par la construction d'un modèle d'application dans un système pouvant contenir de nombreux agents hétérogènes,
- du niveau de facilité/difficulté à pouvoir suivre l'évolution de tout ce système détaillé durant une simulation,
- du temps nécessaire pour l'attente des

résultats de la simulation, un temps qui, du point de vue actuel de ces acteurs, peut varier d'une minute à une semaine,

- de l'appréciation de la qualité de la sortie du modèle, surtout lorsque que le concepteur a transféré un certain « pouvoir » aux agents (autonomie comportementale) et au SMA lui-même (émergence).

A partir des constats précédents, cet article essaiera de proposer un modèle SMA dit *minimal* c'est-à-dire un modèle qui (a) aurait la complexité nécessaire pour atteindre l'objectif *OB*, (b) aurait une valeur ajoutée par rapport à l'état de l'art et en même temps (c) intègre dans la mesure du possible l'approche de modélisation classique (mathématique / statistique) dont le secteur minier est habitué. Le principe est de montrer auprès du secteur minier la nécessité des SMA mais sur le principe que les SMA devraient être vus non comme une approche dissidente [18] aux méthodologies classiques, mais bien une approche complémentaire à celles-ci.

3 Modélisation et simulation

3.1 Sources de données

Le travail de modélisation utilise les données de commerce international en provenance de GTIS [10]. Les données de GTIS présentent les flux entre pays producteurs/ pays de transit puis entre pays de transits/ pays consommateurs. Pour mieux exploiter ces données, notre modèle de marché (a) introduira donc également, outre les pays producteurs et les pays consommateurs, les pays de transit, reliant producteurs et consommateurs, et (b) fonctionnera « comme si » les consommateurs adressaient leurs demandes aux transits, même si, dans la réalité, ils s'adressent directement aux producteurs, qui envoient ensuite le produit aux transitaires.

La période choisie se situe entre 2005 et 2013, et à l'échelle du trimestre (une échelle qui permettrait d'augmenter le nombre de nos observations lors des traitements statistiques).

Dans le modèle, les pays qui approvisionnent seront bien appelés des pays *producteurs*, mais nous n'utilisons ni les valeurs de la production ni celles de l'exportation. En effet, dans les données GTIS et pour un instant donné, exportations et importations ne sont pas toujours identiques pour des raisons de délai de transport, d'écriture administrative, etc. Ainsi, nous dirons globalement qu'un pays producteur approvisionne la quantité *effectivement reçue* par le pays consommateur, à cet instant (en y ayant éventuellement appliqué des restrictions préalables, lors des scénarios).

3.2 Les éléments de base du modèle

Un *pays* est modélisé comme un agent et est, soit un producteur (*pc*), soit un consommateur (*cc*), soit un transitaire (*tc*). Le système contient en tout η_{pc} producteurs, η_{cc} consommateurs et η_{tc} transitaires. Un pays peut être dans les contextes suivants : *Normal* (le cas sans restriction), *Restriction* (un producteur restreint), *Compensation* (un producteur compense les manques causés par les restrictions), et *Attente* (un producteur attend avant de pouvoir compenser). Au départ, chaque pays se trouve dans le contexte *Normal*.

Outre les *pays*, le modèle intègre également des agents dits *ambassadeurs*. Un ambassadeur $A(p1 \leftrightarrow p2)$ est un agent délégué qui gère les flux échangés entre les pays *p1* et *p2*. Les ambassadeurs ont été introduits car étant donné la complexité des comportements interne et externe d'un pays et la topologie du système en général, il nous a semblé difficile de décrire les échanges entre deux pays *p1* et *p2*, à la fois dans *p1* et dans *p2* surtout que, pour un pays donné, le mode de calcul des échanges varie en fonction du pays interlocuteur. Une décentralisation (délégation) de la description des échanges nous a donc paru plus appropriée. Enfin, la communication entre les agents se fait formellement via l'échange d'événements. Celui-ci prend la forme $evt(e, d, \langle v1, \dots, vn \rangle)$ où *e* est l'expéditeur, *d* le destinataire et $\langle v1, \dots, vn \rangle$ une liste de valeurs à acheminer de *e* vers *d*.

3.3 Formalisation des contextes

3.3.1 Le contexte normal

Dans ce contexte, aucune restriction ne se produit dans le système. L'interaction entre pays et ambassadeurs, à chaque pas de temps de la simulation, se déroule alors en suivant les 4 phases ci-dessous, les deux premières concernant la demande et les deux dernières l'offre.

Phase 1 : Au départ, chaque consommateur cc_k , $k \in \{1, \eta_{cc}\}$, va demander à ses ambassadeurs $A(tc_j \leftrightarrow cc_k)$, $j \in \{1, \eta_{tc}\}$, de calculer la quantité $d(tc_j \leftarrow cc_k)$ à demander à tous les producteurs pc_i , $i \in \{1, \eta_{pc}\}$ et dont l'approvisionnement transiterait ensuite par le pays tc_j . Pour calculer cette demande dans le temps, l'idée consiste, à ce stade, à interpoler la série temporelle $S_{d(tc_j \leftarrow cc_k)}$ des données GTIS sur les demandes de cc_k vers tc_j , entre 2005 et 2013 et en enlevant de cette interpolation le stock $A(tc_j \leftrightarrow cc_k).s$ déjà à disposition. Notons $i(tc_j \leftarrow cc_k, t)$ la droite de régression qui en résulte. Le processus est résumé dans l'équation 1 où $cc_k.\sigma_d$ est la somme des quantités à demander par un cc_k à tous les tc_j .

$$\begin{aligned} \text{a) } d(tc_j \leftarrow cc_k) &= \max(0, i(tc_j \leftarrow cc_k) - A(tc_j \leftrightarrow cc_k).s) \\ \text{b) } A(tc_j \leftrightarrow cc_k).s &= \max(0, A(tc_j \leftrightarrow cc_k).s - i(tc_j \leftarrow cc_k)) \\ \text{c) } cc_k.\sigma_d &= \sum_{j=1}^{\eta_{tc}} d(tc_j \leftarrow cc_k) \end{aligned} \quad (1)$$

Phase 2 : quand tc_j a reçu, des cc_k , les demandes $\{d(tc_j \leftarrow cc_1), \dots, d(tc_j \leftarrow cc_{\eta_{cc}})\}$, dont la somme est notée $tc_j.\sigma_d$ (équation 2.a), il les transfère à chaque ambassadeur $A(pc_i \leftrightarrow tc_j)$, $i \in \{1, \eta_{pc}\}$. L'ambassadeur calcule ensuite la partie $d(pc_i \leftarrow tc_j)$ à laquelle pc_i devrait répondre. Cette part est ici calculée en étant une combinaison linéaire des demandes $d(tc_j \leftarrow cc_k)$, $k \in \{1, \eta_{cc}\}$. Elle est formulée dans l'équation 2.b où K_{ij}^d et α_{ijk}^d sont les paramètres de l'équation linéaire, obtenus par une régression linéaire des données GTIS correspondant aux variables respectives décrites dans l'équation 2.b. Ensuite, dû au résidu de

$$\begin{aligned}
\text{a) } tc_j.\sigma_d &= \sum_{k=1}^{\eta_{cc}} d(tc_j \leftarrow cc_k) \\
\text{b) } \forall (i \in \{1, \eta_{pc}\}, j \in \{1, \eta_{tc}\}), \\
d(pc_i \leftarrow tc_j) &= K_{ij}^d + \sum_{k=1}^{\eta_{cc}} \alpha_{ijk}^d * d(tc_j \leftarrow cc_k) \\
\text{c) } tc_j.\sigma_d' &= \sum_{i=1}^{\eta_{pc}} d(pc_i \leftarrow tc_j) \\
\text{d) } \varepsilon_j &= tc_j.\sigma_d' / tc_j.\sigma_d \\
\text{e) } \forall i \in \{1, \eta_{pc}\}, d(pc_i \leftarrow tc_j) &= d(pc_i \leftarrow tc_j) * \varepsilon_j \\
\text{f) } A(tc_j \leftrightarrow cc_k).h &= d(tc_j \leftarrow cc_k) / tc_j.\sigma_d
\end{aligned} \tag{2}$$

la régression, il arrive que la somme $tc_j.\sigma_d'$ de ces parts (calculées) soit différente de la somme initiale $tc_j.\sigma_d$ des demandes qui ont servi au calcul de ces parts. Un ajustement doit donc être effectué par tc_j sur $d(pc_i \leftarrow tc_j)$. Cela est illustré dans les équations 2.d à 2.e, avec ε_j la marge d'erreur entre $tc_j.\sigma_d'$ et $tc_j.\sigma_d$. En parallèle, la part de marché de la quantité fournie à cc_k via tc_j est calculée. Notons-le $A(tc_j \leftrightarrow cc_k).h$ (équation 2.f). L'intérêt de cette variable est détaillé dans la phase 4.

Phase 3: quand la demande parvient à chaque pc_i , ce dernier, en retour, calcule l'offre totale $pc_i.\sigma_s$ qu'il fournit aux demandeurs. Dans ce contexte normal, $pc_i.\sigma_s$ est la même quantité que la somme $pc_i.\sigma_d$ des demandes $d(pc_i \leftarrow tc_j)$, $j \in \{1, \eta_{tc}\}$. Cette offre est alors envoyée à tous les tc_j via leur $A(pc_i \leftrightarrow tc_j)$ respectif (équation 3). A noter qu'un pc_i a une capacité d'offre maximale $pc_i.\mu$. Dans un contexte normal, cette capacité correspond au maximum des offres existantes dans le temps pour pc_i . L'intérêt réel de cette variable sera visible dans le contexte de compensation.

$$\begin{aligned}
\text{a) } pc_i.\sigma_d &= \sum_{i=1}^{\eta_{pc}} d(pc_i \leftarrow tc_j) \\
\text{b) } pc_i.\sigma_s &= pc_i.\sigma_d \\
\text{c) } pc_i.\mu(t) &= \max(pc_i.\mu(t-1), pc_i.\sigma_s) \text{ avec } pc_i.\mu(0) = 0
\end{aligned} \tag{3}$$

Phase 4: Enfin, quand tc_j a reçu les offres des $pc_i.\sigma_s$, $i \in \{1, \eta_{pc}\}$, dont la somme est notée $tc_j.\sigma_s$, il calcule et transfère à chaque cc_k sa part, via l'ambassadeur $A(tc_j \leftrightarrow cc_k)$, $k \in \{1, \eta_{cc}\}$. La part à transférer est déterminée par $A(tc_j \leftrightarrow cc_k).h$, obtenue dans l'équation 2.f.

L'équation 4 résume le processus, dans laquelle $cc_k.\sigma_s$ est la somme des quantités approvisionnant cc_k à partir des tc_j , $j \in \{1, \eta_{tc}\}$, et $cc_k.s$ est le stock total de cc_k .

$$\begin{aligned}
\text{a) } s(tc_j \rightarrow cc_k) &= tc_j.\sigma_s * A(tc_j \leftarrow cc_k).h \\
\text{b) } A(tc_j \leftarrow cc_k).s &= A(tc_j \leftarrow cc_k).s + s(tc_j \rightarrow cc_k) - i(tc_j \leftarrow cc_k) \\
\text{c) } cc_k.s &= \sum_{j=1}^{\eta_{tc}} A(tc_j \leftarrow cc_k).s = cc_k.\sigma_s - cc_k.\sigma_d
\end{aligned} \tag{4}$$

3.3.2 Le contexte de restriction

Supposons à présent qu'à partir d'un instant t_s , un producteur pc_r décide de restreindre son offre de $pc_r.\rho_s$ points (avec $0 < pc_r.\rho_s \leq 1$). Dans ce cas, pc_r passe du contexte *Normal* à *Restriction* et exécute une action $pc_r.restrict()$ qui vise à envoyer un événement $restrict(pc_i, cc_k, <>)$ à chaque cc_k , $k \in \{1, \eta_{cc}\}$ pour leur informer de la restriction. L'action vise également à envoyer aux autres pc_i , via leur ambassadeur $A(pc_r \leftrightarrow pc_i)$ $i \neq r$, la quantité non fournie $pc_r.q_r$ issue de cette restriction. Elle est donnée par l'équation 5.c. La quantité $pc_r.\sigma_s$ à fournir aux demandeurs durant une restriction est donnée par l'équation 5.b dans laquelle $pc_r.\sigma_d$ est la demande totale arrivant à pc_r .

A partir de cette restriction, le stock $cc_k.s$ de chaque cc_k va naturellement diminuer (dans ce contexte sans encore de compensation) et sera finalement en rupture. Notons $cc_k.\lambda$ la rupture cumulée au fil du temps. Quand $cc_k.s \leq 0$, il est ajouté à $cc_k.\lambda$ (Equation 5.d). Pour un pays cc_k , la période de rupture est celle durant laquelle sa rupture cumulée $cc_k.\lambda$ est < 0 . Cela est donné dans l'équation 5.e, où $cc_k.t_{\lambda}$ est la date de fin de rupture. Enfin, l'équation 5.f vérifie que la rupture ne peut pas être supérieure à la valeur demandée. Ap-

$$\begin{aligned}
\text{a) } pc_r.\sigma_d &= \sum_{i=1}^{\eta_{pc}} d(pc_r \leftarrow tc_j) \\
\text{b) } pc_r.\sigma_s &= \min(pc_r.\sigma_d, pc_r.\mu * pc_r.\rho_s) \\
\text{c) } pc_r.q_r &= pc_r.\sigma_d - pc_r.\sigma_s \\
\text{d) } cc_k.\lambda(t) &= \begin{cases} cc_k.\lambda(t-1) + cc_k.s(t) & \text{if } cc_k.s(t) < 0 \\ cc_k.\lambda(t-1) & \text{sinon} \end{cases} \\
\text{e) } cc_k.t_{\lambda} & \text{ is } t > t_s \text{ tel que } cc_k.\lambda(t_{\lambda}-1) < 0 \text{ et } cc_k.\lambda(t_{\lambda}) \geq 0 \\
\text{f) } cc_k.\lambda(t) &= \max(cc_k.\lambda(t), -cc_k.\sigma_d(t))
\end{aligned} \tag{5}$$

pelons cette situation la *rupture complète*.

3.3.3 Le contexte de compensation

A réception de la restriction imposée par pc_r , chaque cc_k , $k \in \{1, \eta_{cc}\}$ passe du contexte *Normal* à *Compensation* et exécute immédiatement l'action $cc_k.makeup()$. Cette action vise, à chaque pas de temps et tant que $cc_k.\lambda < 0$, à envoyer un événement *demandMakingUp*($cc_k, pc_i, <cc_k.\lambda>$) à tous les pc_i , $i \in \{1, \eta_{pc'}\}$ avec $\eta_{pc'} < \eta_{pc}$ et $i \neq r$. Chaque pc_i qui reçoit le message, soit passe immédiatement du contexte *Normal* à *Compensation* et répond en exécutant $pc_i.makeup()$ décrit ci-dessous, soit attend un délai $pc_i.\delta$. Dans le dernier cas, il change tout d'abord de *Normal* à *Attente* avant de passer de *Attente* à *Compensation*, une fois ce délai expiré. Ce délai est dû à diverses raisons propres à pc_i : incapacité à répondre immédiatement, spéculation, etc.

Durant un $pc_i.makeup()$, la quantité totale ts à offrir *a priori* est donné par l'équation 6.a. Il est calculé en tant que somme de la demande normale arrivant à pc_i , de la quantité non fournie, obtenue de pc_r (cf. section 3.3.2), de la somme des stocks à compenser, obtenue de tous les événements *demandMakingUp* (cf. ci-dessus), et le poids du pc_i par rapport aux autres producteurs compensateurs. Ce poids est noté $pc_i.\omega$ (en %).

La valeur finale $pc_i.\sigma_s$ à offrir (compensation incluse) est alors évaluée dans l'équation 6.b dans laquelle $pc.\rho_p$ est le taux de compensation. L'équation 6 stipule que si ts est en-deçà de la capacité $pc_i.\mu$ obtenue dans l'équation 3.c, ts est la capacité finale à fournir. Sinon, une augmentation de cette capacité est requise (cf. équation 6.b). Par conséquent, la capacité

Quand $t \geq t_s + pc_i.\delta$:

$$\begin{aligned}
 \text{a) } ts &= pc_i.\sigma_d + (pc_i.q_r + \sum_{k=1}^{\eta_{cc}} |cc_k.\lambda|) * pc_i.\omega \\
 \text{b) } pc_i.\sigma_s(t) &= \begin{cases} ts & \text{si } ts < pc_i.\mu(t) \\ \min(pc_i.\mu(t) * (1 + pc_i.\rho_p)) * ts & \text{sinon} \end{cases} \quad (6) \\
 \text{c) } pc_i.\mu(t) &= \begin{cases} pc_i.\mu(t) & \text{si } ts < pc_i.\mu(t) \\ pc_i.\sigma_s(t) & \text{sinon} \end{cases}
 \end{aligned}$$

maximale $pc_i.\mu$ est mise à jour (équation 6.c).

3.4 Simulation

3.4.1 Initialisation des valeurs utilisées

Les pays producteurs (pc_i) sélectionnés pour la simulation sont le Chili (cl), la Chine (cn) et les Etats-Unis (us). Ces pays sont vus par GTIS comme étant ceux qui approvisionnent régulièrement la France avec des quantités élevées (≥ 25 t/trimestre). A ces pays s'ajoute un pays (virtuel) que l'on appellera le reste du monde (rw) et qui regroupe tous les pays producteurs restants, dans le monde. Ainsi, $\eta_{pc} = 4$. La quantité approvisionnée par rw est la quantité mondiale, diminuée de la quantité fournie par cl , cn et us . Font partie de rw , les pays qui approvisionnent la France mais en quantité très faible (ex : Espagne), ou encore les pays qui produisent en quantité importante, mais qui n'approvisionnent pas la France dans le marché actuel (ex : Argentine).

Les pays consommateurs (cc_k) sont la France (fr), sujet de notre étude et, de nouveau, le reste du monde (rw), regroupant tous les consommateurs autres que la France. Ainsi, $\eta_{cc} = 2$. La quantité consommée par rw est la quantité mondiale consommée, diminuée de celle de la France.

Les pays intermédiaires (tc_j) sont la Belgique (be), l'Allemagne (de), le Royaume-Uni (uk), l'Italie (it) et les Pays-Bas (nl). Ainsi, $\eta_{tc} = 5$. L'analyse des données GTIS a montré que ce sont via ces intermédiaires que les pays producteurs sélectionnés ci-dessus font principalement transiter le lithium vers la France.

Tous les ambassadeurs sont ensuite naturellement créés pour connecter tous ces pays (rw inclus) conformément aux formalismes décrits précédemment dans cet article.

Le pas de temps de simulation est le trimestre. On notera, par exemple, 2/2019, le trimestre 2 de l'année 2019.

3.4.2 Les scénarios prospectifs

Le scénario prospectif (fictif) proposé est le suivant : on suppose qu'à partir de 2014 ($=t_s$), le Chili restreint son taux

d'approvisionnement de $cl.\rho_s$ points. Suite à cette situation, la Chine accepte de faire une compensation d'un taux de $cn.\rho_p$ points, immédiatement, i.e. $cn.\delta=0$, et les Etats-Unis également, d'un taux de $us.\rho_p$ points, mais seulement à partir de 2016, i.e. $cn.\delta=8$ (trimestres). Enfin, toute augmentation des demandes $fr.\rho_a$ et $rw.\rho_a$, le cas échéant, se déroule en début 2014 ($=fr.t_{a0} = rw.t_{a0}$). Le but de la simulation consiste alors, en variant la valeur de ces taux, à trouver la période de rupture en France et dans le reste du monde. Une simulation s'écrit formellement comme suit (exemple de la France) : $fr.t_{\bar{\lambda}} = fr(-cl.\rho_s, +cn.\rho_v, +us.\rho_v, +fr.\rho_a)$. Pour chaque simulation réalisée, la lecture du résultat se fait comme suit : pour chaque compensation $cn.\rho_p$ et $us.\rho_v$, et pour chaque augmentation $fr.\rho_a$ et $rw.\rho_a$, les temps de fin de ruptures pour la France et le reste du monde seront respectivement de $fr.t_{\bar{\lambda}}$ et de $rw.t_{\bar{\lambda}}$. Mais on peut aussi faire la lecture inverse suivante : si l'on souhaite que la période de rupture ne dépasse pas $fr.t_{\bar{\lambda}}$ pour la France et $rw.t_{\bar{\lambda}}$ pour le reste du monde, les Etats-Unis et la Chine devraient augmenter leur taux de compensation d'au moins $cn.\rho_p$ et de $us.\rho_p$ respectivement et les augmentations de la demande ne devraient pas aller au-delà de $fr.\rho_a$ et $rw.\rho_a$ respectivement.

La table 1 montre en détail la liste des différentes instances de scénarios proposées dans cet article. Une instance est composée d'un identificateur (écrit entre parenthèses), la valeur de la restriction par le Chili et la valeur de la compensation, respectivement par la Chine et par les Etats-Unis. La valeur choisie dans cette table permet aussi à un décideur politique d'analyser la sensibilité du marché du lithium après une variation importante des indicateurs (ex ici, des divers taux).

A titre d'information complémentaire, notre calage avec les données GTIS et nos expérimentations additionnelles nous ont permis d'assigner les valeurs 35% et 65% respectivement à $us.\omega$ et $cn.\omega$.

TAB. 1 - Liste de tous les scénarios, une instance étant composée d'une restriction par le Chili (cl) suivie d'une compensation par la Chine (cn) et les Etats-Unis (us)

id	-cl. ρ_s	+cn. ρ_p	+us. ρ_p
(a)	-0.15	+0.3	+0
(b)	-0.4	+0.3	+0
(c)	-0.15	+0.1	+0
(d)	-0.4	+0.1	+0.5
(e)	-0.4	+0.1	+0.1
(f)	-0.4	+0.1	+0

3.4.3 Résultats

La figure 2 montre les dates de fin de la rupture $rw.t_{\bar{\lambda}}$ pour le reste du monde. Par exemple, dans le scénario (f), cette rupture serait d'environ 40 trimestres (10 ans). A noter que la valeur de 13,000 (en t/trimestre), en valeur absolue, représente approximativement la demande moyenne en lithium de rw (selon les données GTIS). Il signifie par exemple que dans le scénario (f), au moment du pic d'une période de rupture, il y a une valeur d'environ (13,000-5,800) t/trimestre de lithium (un peu plus de 50 %) qui est fournie à ce consommateur.

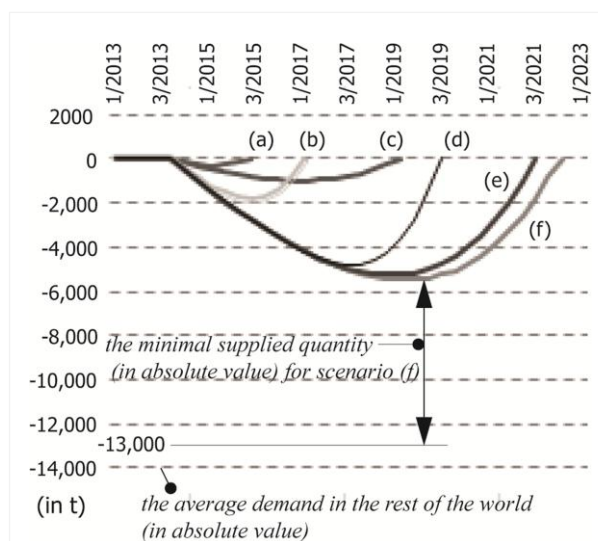


FIG. 2 - Evolution prospective du stock de lithium dans le reste du monde

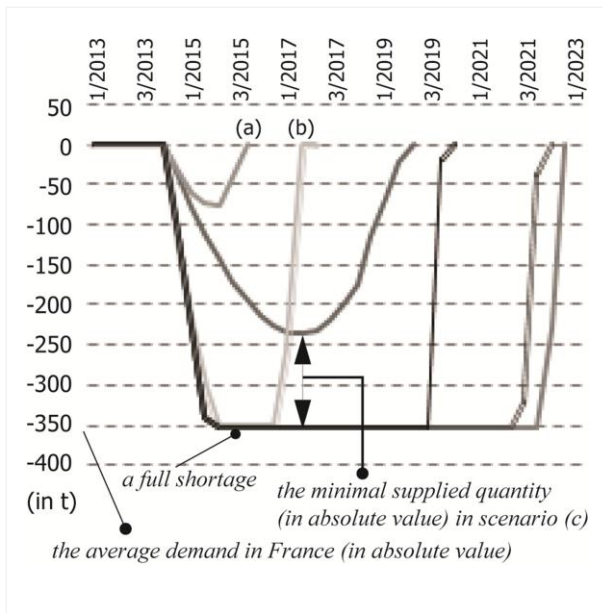


FIG. 3 - Evolution prospective du stock de lithium en France

La figure 3 est « l'équivalent France » de la figure 2 avec une demande moyenne d'environ 350 t/trimestre (selon les données de GTIS). Ici, la France atteint une rupture complète dans tous les scénarios où la restriction par le Chili est élevée (-0.4), i.e. (b), (d), (e) et (f), et avec une durée différente. Si l'on se réfère uniquement à ces résultats, la France ne devrait pas s'inquiéter d'une éventuelle rupture prolongée de son approvisionnement en lithium, si une restriction chilienne survient. En effet, même si la figure 3 indique différentes situations de rupture, le reste du monde, au même moment, reste approvisionné au moins autour de 50% de ses besoins et ajouter la France à la liste des pays approvisionnés ne devrait pas être un problème. Le travail [3] concluait déjà que le risque de rupture est faible pour la France, mais ils n'ont cependant pas analysé les effets d'un scénario d'une restriction effective. Notre résultat complète donc cette analyse.

4 Discussions

Comme indiqué dans la section 2, le modèle proposé ici, conçu dans un objectif d'une meilleure chance de l'appropriation des SMA par le secteur minier, est ce que l'on pourrait appeler un SMA *minimal* c'est-à-dire un mo-

dèle qui (a) aurait la complexité nécessaire pour atteindre l'objectif OB, mais (b) en intégrant dans la mesure du possible l'approche de modélisation classique (mathématique/statistique) dont le secteur minier est habitué. De notre point de vue, l'atteinte de ces deux niveaux est en bonne voie.

4.1 A propos de l'apport du modèle

D'un côté, ce travail a en effet permis, grâce à la complexité inhérente aux SMA, de visualiser, mieux que l'état de l'art (section 2), les impacts du comportement des pays producteurs (en particulier les restrictions et les compensations), sur les pays consommateurs. D'un autre côté, ce travail intègre dans la mesure du possible des approches statistiques, pour décrire, non plus un phénomène global, mais le comportement de certains agents, là où l'approche est appropriée. Cela concerne notamment les ambassadeurs. Nos tests de régression linéaire ont été utilisés dans cet objectif. Au final, nous avons un système où certains agents se comportent d'une manière linéaire (ambassadeurs, pays de transit) pendant que d'autres (pays producteurs et consommateurs) possèdent des comportements plus complexes et plus discrets, qui dépendent de leur contexte.

4.2 A propos de l'acceptation du modèle

L'intention de faire accepter les SMA est appréciée par le secteur mais le résultat ne serait néanmoins visible dans un cadre opérationnel que vers le moyen-terme. Dans l'immédiat, le constat observé globalement au niveau des acteurs thématiques reste la réticence. En effet, un autre problème émerge : la non confiance de ces experts quant à la fiabilité des données qui a servi à élaborer le modèle. En effet, les experts, pour valider ces résultats dans un cadre opérationnel (aide en appui aux politiques publiques ou aux industriels), souhaitent croiser différentes sources de données. Or, vu qu'une modélisation du marché des métaux industriels à une échelle inter-pays n'a auparavant quasiment pas existé, bon nombre de fournisseurs de données ont toujours jugé non-opportun la construction (et/ou

la mise en avant) de la base de données correspondante, ce qui n'est pas le cas dans des études du niveau purement global (cf. la section 2) où les sources de données sont nombreuses. De plus, lorsqu'on agit à un niveau hétérogène, des données peuvent être confidentielles, décomposées selon des critères variables d'un pays à l'autre. Une étape nécessaire mais pas forcément suffisante par rapport à l'acceptation concernera donc la recherche et le croisement d'autres sources de données avec celle de GTIS.

5 Conclusions

Certaines ressources minérales de type métaux (lithium, terres rares ...) sont aujourd'hui devenues particulièrement stratégiques pour le secteur minier en raison du risque de leur raréfaction sur le marché mondial car des pays producteurs de ces ressources pourraient mettre en œuvre des quotas sur leur exportation. Pour faire face aux conséquences possibles de ce comportement, la France qui est dépendante en importation de ces ressources a réfléchi à l'élaboration d'un modèle et outil prospectifs qui permettraient d'imaginer les impacts (manque, durée) de ces scénarios de restriction sur les pays consommateurs.

Cet article visait à synthétiser et à discuter les premiers résultats d'une réflexion méthodologique qui a été menée sur le niveau d'intérêt que porte le secteur minier sur l'adoption de l'approche SMA pour appréhender une telle problématique. L'état de l'art a montré que le niveau d'intérêt est faible. L'article a alors proposé un modèle SMA dit *minimal* qui (a) aurait la complexité nécessaire pour atteindre l'objectif voulu par l'outil (b) mais intègre dans la mesure du possible l'approche de modélisation classique (mathématique / statistique) dont le secteur minier est habitué. Après implémentation de ce modèle, le résultat observé reste toujours de la réticence en raison de la non confiance des experts thématiques quant à la fiabilité des données – de source unique, sans comparaison possible pour l'instant – utilisées par le modèle, surtout si c'est à usage opérationnel. En somme,

le chemin vers une acceptation des SMA par le secteur minier est encore long mais toutefois prometteur. En effet, la démarche est appréciée. C'est son utilisation dans un cadre opérationnel sans validation et justification complémentaire qui constitue pour l'instant un frein.

En ce qui concerne les perspectives du modèle, il sera testé l'intégration d'autres paramètres de la criticité [8] comme le prix, les réserves minières ou les risques géopolitiques. De plus, les réflexions sur les mécanismes suivants sont en cours pour faire progresser le modèle vers plus de SMA (et le processus d'acceptation associé) : (a) un mécanisme de formation des liens entre producteurs et consommateurs, décidée après échanges de connaissances (de nature géologiques, économiques, sociaux, politiques, etc.) et négociations (ex : pour établir les quantités à échanger et le prix) ; et (b) un mécanisme décrivant ensuite la perception par un producteur (respectivement par un consommateur) de l'évolution de sa relation avec les consommateurs (respectivement les producteurs). Pour un producteur, cela lui permettrait de pouvoir choisir délibérément les agents consommateurs à ensuite restreindre/compenser. Pour un consommateur, cela lui permettrait de décider, en cas de restriction, vers qui mieux se tourner pour demander quelle part de la quantité à compenser. A ces effets, le comportement d'un ambassadeur pourrait être davantage complexifié pour la mémorisation (apprentissage) et l'analyse de ces relations multicritères et dynamiques entre deux pays. Toutes ces mises en relation se feraient d'une manière endogène, et non comme dans le modèle actuel (où, par exemple, dans l'application choisie, la coordination de la compensation entre Etats-Unis et Chine est pilotée plutôt par l'utilisateur).

Références

- [1] 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.
- [2] Brown, T., McEvoy, F. & Ward, J. (2011). Aggregates in England — Economic contribution and environmental cost of indigenous supply. *Resources Policy*, 34(4), 295-303.
- [3] Daw, G. & Labbé, J.-F. (2012). Panorama 2011 du marché du lithium. Rapport final, BRGM/RP-60460-FR. 157 p., 51 fig., 30 tab.
- [4] De Solminihac, P. (2010). SQM view of the lithium industry. In *Proceedings of The 2nd Lithium Supply & Markets Conference*. Las Vegas: LSM.
- [5] Farmer, J. & Foley, D. (2009). The economy needs agent-based modelling. *Nature*, 460(7256), 685-686.
- [6] Fernández-Villaverde, J. (2010). The econometrics of DSGE models. *SERIEs*, 1, 3-49.
- [7] Giacalone, J. (2012). China, The World Trade Organization, And The Market For Rare Earth Minerals. In *Proceedings of The 2012 International Academic Conference* (pp.445-452). Las Vegas: IAC.
- [8] Graedel, T. E., Chandler, C., Barr, R., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., Friedlander, E., Henly, C., Jun, C., Nassar, N. T., et al. (2012). Methodology of Metal Criticality Determination. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 1063-1070.
- [9] Gruber, P., Medina, P., Keoleian, G., Kesler, S., Everson, M. & Wallington, T. (2011). Global Lithium Availability: A Constraint for Electric Vehicles? *Industrial Ecology*, 15(5), 760-775.
- [10] GTIS (2013). Online market database. <https://www.gtis.com/gta/>.
- [11] 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>.
- [12] McNulty, J. & Khaykin, A. (2009). Extracting the Details on the Lithium Market. <http://www.docstoc.com/docs/12415608/Lithium>.
- [13] Mooij, W., Bennetts, R., Kitchens, W. & DeAngelis, D. (2002). Exploring the effect of drought extent and interval on the Florida snail kite: interplay between spatial and temporal scales. *Ecological Modelling*, 149, 25-39.
- [14] Roskill. (2011). *Rare Earths & Yttrium: Market Outlook to 2015*.
- [15] Roskill. (2009). *The Economics of Lithium*.
- [16] Soulié, J.-C. & Thébaud, O. (2006). Modeling fleet response in regulated fisheries: an agent-based approach. *Journal of Mathematical and Computer Modelling*. Elsevier, 44(5-6), 553-564.
- [17] Squazzoni, F. (2010). The impact of agent-based models in the social sciences after 15 years of incursions. *Sociological Methodology*, 2(2), 1-23.
- [18] The Economist (2010). Agents of change: Conventional economic models failed to foresee the financial crisis. Could agent-based modelling do better? <http://www.economist.com/node/16636121>.
- [19] Torii, D., Ishida, T. & Bousquet, F. (2006). Modeling agents and interactions in agricultural economics. In *Proceedings of the 5th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems* (pp.81-88). Hakodate: AAMAS, ACM New York.
- [20] Tru (2011). Shocking Future Battering the Lithium Industry through 2020. In *Proceedings of the 3rd Lithium Supply & Markets Conference*. Toronto: LSM.
- [21] 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.
- [22] Yaksic, A. & Tilton, J. (2009). Using the cumulative availability curve to assess the threat of mineral depletion: The case of lithium. *Resources Policy*, 34(4), 185-194.
- [23] Yang, Y., Zhao, J. & Cai, X. (2010). A Multi-Agent System Based Model for Water Allocation Management in the Yellow River Basin. In *Proceedings of The World Environmental and Water Resources Congress* (pp.2656-2663). Rhode Island: EWRI.