



Policy Research Working Paper – Janvier 2019

VERS UNE GÉOPOLITIQUE DE L'ÉNERGIE PLUS COMPLEXE ?

Une analyse prospective tridimensionnelle de la transition énergétique

PAR Clément BONNET, Samuel CARCANAGUE,
Emmanuel HACHE, Gondia Sokhna SECK, Marine SIMOËN



Cette étude a reçu le soutien financier de l'Agence nationale de la recherche (ANR) dans le cadre du projet GENERATE (Géopolitique des énergies renouvelables et analyse prospective de la transition énergétique) suite à l'appel à projet générique 2017.

Etude réalisée par

- Dr Clément Bonnet, IFP Energies nouvelles, clement.bonnet@ifpen.fr
- Samuel Carcanague, IRIS, carcanague@iris-france.org
- Dr Emmanuel Hache, IFP Energies nouvelles (Porteur du Projet GENERATE), emmanuel.hache@ifpen.fr
- Dr Gondia Sokhna Seck, IFP Energies nouvelles, gondia-sokhna.seck@ifpen.fr
- Marine Simoën, IFP Energies nouvelles, marine.simoen@ifpen.fr

Les auteurs remercient Franck Castagna, Antoine Diacre, Aymen Jabberi, François Kalaydjian, Corinne Parent et Jérôme Sabathier pour les commentaires et corrections qu'ils ont pu apporter à ce travail. Toutes les erreurs restantes sont les nôtres. Les opinions exprimées ici sont strictement celles des auteurs et ne doivent pas être interprétées comme représentant celles d'IFP Énergies nouvelles et de l'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS).

RÉSUMÉ

Cette étude cherche à analyser trois enjeux au cœur de la transition vers les énergies renouvelables (ENR): (1) l'importance des matériaux nécessaires à la production des technologies des ENR; (2) les dynamiques d'innovation dans ces technologies et le rôle qu'elles confèrent aux règles de la propriété intellectuelle; (3) les interactions entre la transition énergétique et les économies exportatrices de combustibles fossiles. Ces trois sous-systèmes interagissent au sein du système plus large que constitue la géopolitique des énergies renouvelables. Les interactions entre ces différentes dimensions s'avèrent essentielles à analyser dans le cadre de la coopération internationale pour la lutte contre le changement climatique et pour comprendre les futurs jalons d'un nouvel ordre énergétique mondial. L'originalité de ce travail est de démontrer que l'analyse de la transition énergétique ne doit pas se restreindre aux liens entre les politiques climatiques, l'innovation et le déploiement des ENR. Une vision plus large est nécessaire pour prendre en compte dans un premier temps les rétroactions négatives du déploiement des ENR via les secteurs des hydrocarbures et des métaux. D'autre part, il convient d'analyser de plus près la rétroaction de l'innovation sur les politiques climatiques pour s'assurer qu'une boucle positive se forme. Trois conclusions peuvent être tirées de ce travail au niveau national ou international en matière de politiques publiques :

- *Les pouvoirs de marché des pays producteurs des matériaux de la transition énergétique risquent de s'accroître dans les années à venir et les politiques de recyclage pourraient permettre de réduire le coût de la transition énergétique ;*
- *Les politiques climatiques doivent s'assurer que les droits de propriété intellectuelle ne deviennent pas un point de blocage de la négociation climatique ;*
- *La diversification des économies productrices d'hydrocarbures est déterminante pour le déploiement des ENR et, plus largement, sur le rythme et les modalités de la transition énergétique au niveau global.*

En définitive, dans un contexte de généralisation des technologies bas-carbone, la géopolitique énergétique risque de se complexifier dans les décennies à venir

Keywords : Transition énergétique, criticité, prospective, brevets, technologies bas-carbone, développement

JEL Classification : Q42, R40, C61

SOMMAIRE

INTRODUCTION	6
I. MÉTAUX ET MATÉRIAUX : QUELLES LIMITES À LA DYNAMIQUE DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE INTERNATIONALE ?	13
1.1 La question des ressources dans l'histoire économique mondiale	13
1.2 Une analyse bibliométrique	18
1.3 Mesurer la criticité	21
1.4 Les apports de la modélisation prospective dans les études sur la criticité des ressources	35
II. LE BREVET COMME ARME DE LA GÉOPOLITIQUE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES	53
2.1 Transition bas-carbone : l'accès à la technologie l'emportera-t-il sur l'accès aux ressources ?	53
2.2 La propriété intellectuelle au cœur de la géopolitique des énergies renouvelables	57
2.3 Quelle géopolitique des énergies renouvelables ? Une scénarisation sur la base des avantages technologiques nationaux	66
2.4 Les enseignements de la prise en compte du rôle de la propriété intellectuelle dans la transition énergétique	81
III. LES ENJEUX DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE POUR LES PAYS EXPORTATEURS D'HYDROCARBURES	85
3.1 Des modèles d'États rentiers vulnérables à la transition énergétique ?	88
3.2 Les choix à venir : comment s'adapter ?	97
CONCLUSION	111
BIBLIOGRAPHIE	118

LISTE DES ACRONYMES

AIE : Agence internationale de l'énergie

ANCRE : Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie

ACV : analyse de cycle de vie

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

BNEF : Bloomberg New Energy Finance

CGG : Conseil de coopération du Golfe

CCNUCC : Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques

COP : Conférence des Parties

CE : Commission européenne

CECA : Communauté européenne du charbon et de l'acier

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

COMES : Comité des métaux stratégiques

DOE : Département américain à l'énergie

ENR : Energies renouvelables

GETT : Groupe d'experts sur le transfert de technologie

GES : gaz à effet de serre (GES)

GW : Gigawatt

HHI : Herfindahl Hirschman Index

Mtep : Million de tonnes équivalent pétrole

MW : Mégawatt

OPEP : Organisation des pays exportateurs de pétrole

R&D: Recherche et développement

TIMES : The Integrated MARKAL-EFOM System

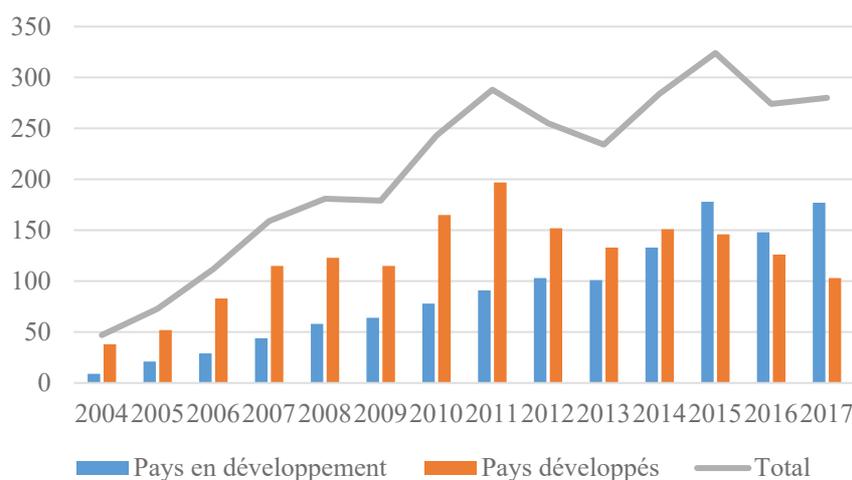
UNEP : Programme des Nations unies pour l'environnement

USGS : United States Geological Survey

INTRODUCTION

Le dernier rapport du Programme des Nations unies pour l'environnement (UNEP¹) a enregistré une augmentation des investissements dans les énergies renouvelables (ENR) de 2 %, entre 2016 et 2017 (environ 280 milliards de dollars), soit des montants cumulés depuis 2010 d'environ 2 200 milliards de dollars. Près de 157 GW de nouvelles capacités de production électrique renouvelables ont ainsi été ajoutés en 2017, soit près de 70 % des nouvelles capacités de production électriques. Les technologies du solaire, de l'éolien, de la géothermie, de la biomasse, de la valorisation énergétique des déchets, des énergies marines et de l'hydraulique (inférieur à 50 MW) représentent 12,1 % de la génération électrique mondiale, contre 11 % en 2016. Le secteur du solaire (38 % des nouvelles capacités de production électrique) et la Chine (45 % des investissements dans les ENR) figurent au premier rang des bouleversements observés dans le mix électrique mondial.

Figure 1: Investissements annuels dans les énergies renouvelables* entre 2004 et 2017 (en milliards de dollars)



Sources : UNEP, Bloomberg New Energy Finance

*Les investissements dans les installations hydroélectriques supérieures à 50 MW ne sont pas comptabilisés dans ce calcul.

Dans de nombreuses régions du monde, la décarbonation du mix énergétique et électrique mondial est devenue une priorité pour permettre de répondre aux objectifs climatiques internationaux et aux problématiques locales de pollution. Dans le secteur électrique, les ENR offrent souvent un double dividende pour les différents États, leur

¹ UNEP/BNEF, *Global Trends in Renewable Energy Investment 2018*, <http://fs-unep-centre.org/sites/default/files/publications/gtr2018v2.pdf>

diffusion permettant de réduire de facto le volume d'énergies fossiles importées (Criqui et Mima, 2012)², tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES).

Bâties sur des logiques de quête énergétique depuis la Première Guerre mondiale, devenue au fil du temps une composante majeure de la diplomatie et des relations internationales portée par les compagnies pétrolières (Accords d'Achnacarry (1928) ; Accords de la ligne rouge (1931)) ou par les États (Accords du Quincy (1945) entre les États-Unis et l'Arabie saoudite ; création de la CECA en 1952 ou d'Euratom en 1957), les politiques énergétiques ont connu un profond bouleversement à partir de 1973. Le premier choc pétrolier, en déstabilisant le principal marché mondial, constitue ainsi une véritable rupture, puisqu'il va conduire à de nombreuses interrogations sur les modes de fixation des prix et sur leurs évolutions à venir. Chalmin (1990) évoque un changement de logique sur les marchés, avec le passage d'un rapport de prix stable à une composante volatile des prix de plus en plus prégnante sur les différents marchés, en corollaire de la montée en puissance de la finance internationale.

Progressivement, d'une simple logique d'approvisionnement en volume, les politiques de sécurité énergétique révélèrent leur nature polysémique³, ces dernières devant nécessairement évoluer dans le temps, l'espace et en fonction des conditions de marché observées. Aujourd'hui, les marqueurs des politiques énergétiques sont rassemblés autour de quatre composantes⁴ caractéristiques : disponibilité⁵ (Availability), accessibilité⁶ (Accessibility), abordabilité⁷ (Affordability) et acceptabilité⁸ (Acceptability). Pourtant, la composante géopolitique des implications des nouvelles politiques énergétiques se révèle pour sa part peu explorée. En effet, de nombreux auteurs se focalisent davantage sur les aspects techniques d'une intégration des ENR dans

² Criqui P., Mima S. (2012), "European climate-energy security nexus: A model based scenario analysis", *Energy Policy*, 41, pp. 827-842.

³ Chester, L. (2010). "Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature", *Energy Policy* 38, pp.887-895.

⁴ On parle de politique des 4 A's. Voir notamment : *Asia Pacific Energy Research Centre (APEREC), A Quest for Energy Security in the 21st century*, août 2007. Pour une lecture plus académique : Jewell, J, Cherp, A, Riahi, K. (2014). *Energy security under de-carbonization scenarios: an assessment framework and evaluation under different technology and policy choices*. *Energy Policy* 65,743-760.

⁵ Au sens de la disponibilité brute, soit un excédent observable sur le marché.

⁶ Une ressource peut être disponible mais non-accessible en raison de l'absence de relations commerciales entre les États, en raison de divergences contractuelles ou de conflits entre États. L'accessibilité représente en quelque sorte une mesure du temps d'accès à la ressource.

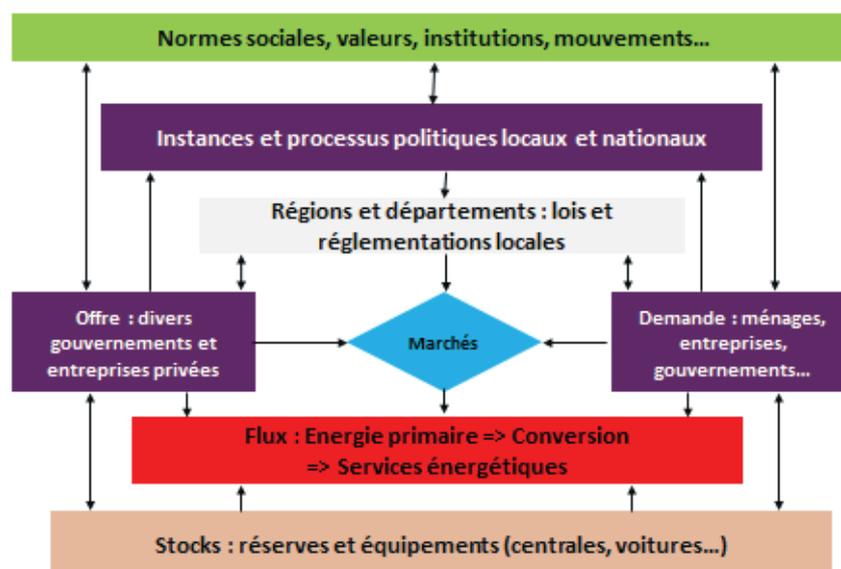
⁷ Cette notion contient une forte dimension économique, à savoir le rapport entre le coût de la ressource et les revenus du demandeur (ou sa capacité à payer la ressource à court terme).

⁸ La notion d'acceptabilité recouvre les questions environnementales et leur recevabilité par les populations locales. Elle intègre à un niveau plus global celle de soutenabilité environnementale.

les réseaux (Connolly et al., 2014 ; Hache et Palle, 2017, 2019), sur la scénarisation à l'échelle nationale (ANCRE, 2014, 2017 ; Alazard-Toux et al., 2014, 2017 ; ADEME, 2017, Négawatt, 2017) ou internationale (AIE, 2013, 2015, 2016, 2017) d'une intégration massive des ENR dans les réseaux (supérieure à 30 %), sur les instruments économiques ou le *market design* nécessaires à leur déploiement, sur les technologies complémentaires à cette dynamique (stockage, gestion de la demande) (ANCRE, 2015). Toutefois, rares sont les analyses abordant les aspects géopolitiques ou géographiques traitant des problématiques de puissance ou de rivalités sur cette thématique. Dans le contexte de la transition énergétique, le déploiement des ENR semble, au premier abord, s'émanciper des enjeux géopolitiques traditionnels liés à l'énergie. En effet, pour nombre d'entre elles (éolien, solaire, petit hydraulique), les ENR sont issues de gisements naturels cycliques et renouvelables (marée, vent, soleil), au contraire des ressources fossiles non renouvelables et plus concentrées géographiquement. Dès lors, les notions de disponibilité ou d'accessibilité, centrales dans la définition traditionnelle de la sécurité énergétique, devraient être reléguées au second plan. Toutefois, la question se pose de réinterroger ces notions dans le cadre des politiques de transition énergétique nécessitant des ressources autres qu'énergétiques et influençant de manière indirecte la sécurité énergétique, comme notamment l'ensemble des ressources en métaux non-ferreux, ferreux ou en terres rares ainsi que les brevets sur les technologies de décarbonation.

Les questions relatives aux énergies renouvelables souffrent également de l'absence de définition concrète de la notion même de transition énergétique (Scholten, 2016). Smil (2010) décrit ainsi la transition énergétique comme un changement dans la composition (structure) de l'offre d'énergie primaire. De Perthuis et Solier (2018) la définissent comme « l'ensemble des transformations requises pour significativement modifier les usages finaux, le mix des sources primaires et la chaîne de transformation/stockage/distribution d'un système énergétique ».

Figure 2: Système complexe et système énergétique

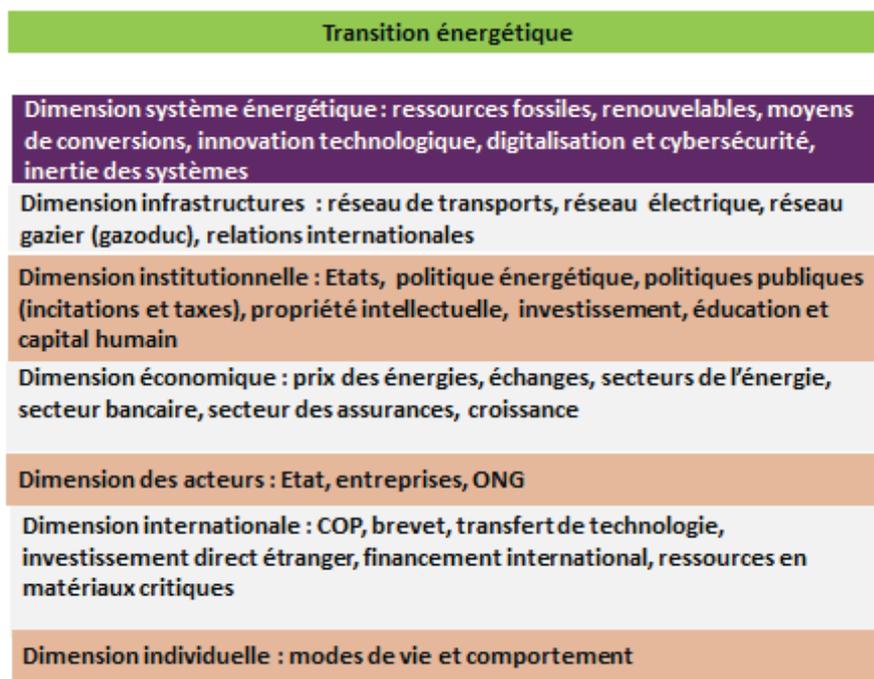


Source : adapté de Schmalensee (2012)

Dans le champ énergétique, si la définition de Smil (2010) se rapproche de celle du Département américain à l'énergie (DOE), d'autres insistent sur le passage d'un modèle basé sur des énergies de stock à un nouveau modèle basé sur des énergies dites de flux, sur la décarbonation du mix énergétique, ou sur les changements de comportements nécessaires à une transformation socio-technique des sociétés. Ainsi depuis les premiers travaux initiés par Krause et al. (1980), le champ s'est élargi pour une acceptation très large de la question en tant que modification structurelle du système socio-technico-économique (Coenen, 2012 ; Schmalensee, 2012) (Figure 2). De la définition du champ va alors dépendre l'étendue des implications géopolitiques sur le sujet. Geels et Schot (2010) caractérisent les transitions de la manière suivante : « des changements multiples dans les systèmes socio-techniques ; des interactions multi-acteurs entre les groupes sociaux, y compris les entreprises, les groupes d'utilisateurs, les communautés scientifiques, les décideurs, les mouvements sociaux et les groupes d'intérêts spéciaux, des changements » radicaux, en termes de portée (et non de vitesse) et enfin des processus de long terme sur des périodes de 40 à 50 ans. Ces caractéristiques se rapprochent des visions systémiques ou de systèmes complexes développés par Funtowicz et al. (1999) qui notamment intègrent dans leurs analyses les différents niveaux d'incertitudes et les différentes strates de compréhension des problèmes à résoudre. La seule dimension technologique n'est ainsi pas pertinente et il est nécessaire d'apporter une vision systémique de la problématique de transition énergétique au regard notamment des enjeux économiques, politiques et géopolitiques qu'elle induit. Avec une conception large de la transition

énergétique (Figure 3), les enjeux géopolitiques entre les différents acteurs sont nombreux et ont un rôle primordial à jouer dans la compréhension des enjeux systémiques et dans l'acceptation de cette dynamique.

Figure 3: Les dimensions de la transition énergétique



Source : auteurs

Le terme de géopolitique des énergies renouvelables est à l'heure actuelle peu usité, même si certains auteurs (Criekemans (2011), Hache (2016, 2018) et Scholten (2016, 2018)) ont commencé à réfléchir aux différentes transformations imposées par le mouvement de transition énergétique mondial.

Addition énergétique, mosaïque géopolitique

De Perthuis et Solier (2018) estime, en étudiant de manière historique les transitions énergétiques passées, « qu'une des caractéristiques communes de ces transitions énergétiques est d'avoir reproduit un schéma additif dans lequel de nouvelles sources primaires viennent s'ajouter à celles préexistantes, sans s'y substituer »⁹. Au regard des données de consommation énergétique mondiale (Figure 4), on observe effectivement une augmentation de la demande mondiale d'énergie, passée de 9 256 millions de tonnes

⁹ De Perthuis, C., Solier, B. (2018). La transition énergétique face au tempo de l'horloge climatique. Chaire Économie du Climat, n°56, juillet, p.6.

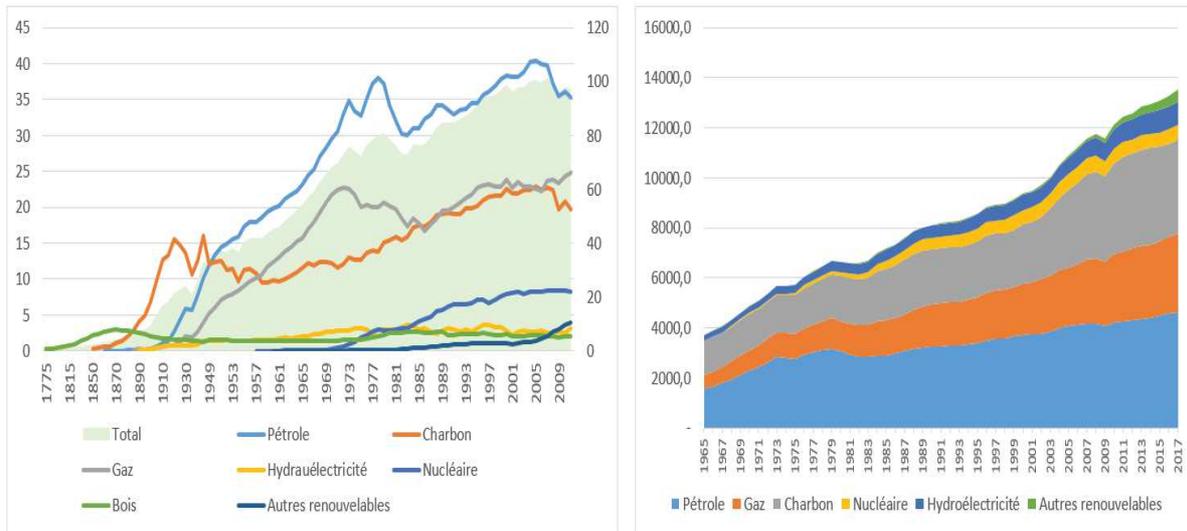
équivalent pétrole (Mtep) à 13 511 Mtep entre 2000 et 2017, et donc caractéristique d'un mouvement d'addition de sources primaires, mais également d'une substitution partielle de ces dernières au cours du temps. Ainsi, le pétrole, qui représentait près de 50 % de la consommation d'énergie primaire à la veille du premier choc pétrolier, en représentait, en 2017, environ 34 % ; un mouvement compensé en partie par l'accroissement de la part du gaz (23,36 % en 2017 contre 17,2 % en 1973), des énergies renouvelables (3,6 % en 2017 contre 0,13 % en 1973) et du nucléaire (4,4 % en 2017 contre 0,8 % en 1973). En valeur absolue (Tableau 1), l'ensemble des sources d'énergie primaire a enregistré une forte augmentation (pétrole (+ 102 %) ; gaz (+ 276 %), charbon (+ 154 %) ; nucléaire (+ 3269 %) ; hydroélectricité (+ 246 %) ; énergies renouvelables (+ 8293 %)), illustrant ainsi cette tendance d'addition énergétique.

Tableau 1 : Part relative et volume de consommation des différentes sources d'énergie primaire en 1970 et 2017

	1970 (en % du total)	1970 (en Mtep)	2017 (en % du total)	2017 (en Mtep)
Pétrole	46,89	2291,5	34,2	4621,9
Gaz	17,17	839	23,4	3156
Charbon	30,02	1467	27,6	3731,5
Nucléaire	0,36	17,7	4,4	596,4
Hydroélectricité	5,44	265,8	6,8	918,6
Renouvelables	0,12	5,8	3,6	486,8
Total	100	4886,8	100	13511,2

Source : BP Statistical Review 2018

Figure 4 : Consommation énergétique aux États-Unis (Figure de gauche, en Mtep)* et consommation énergétique mondiale (Figure de droite, en Mtep)



Sources : BP Statistical Review 2018, DOE

*Graphique de gauche : part relative des sources d'énergie primaire en % (échelle de gauche) ; total en % (échelle de droite)

Les conséquences de cette dynamique ne sont pas sans conséquence sur l'appréhension des questions géopolitiques posées par la transition énergétique. En effet, dans un monde d'empilement énergétique, les enjeux afférents s'additionnent et se répondent pour former une géopolitique de l'énergie bien plus complexe que celle liée aux seuls hydrocarbures. Si ces politiques de transition énergétique diminuent théoriquement et progressivement la dépendance aux différents producteurs d'énergies fossiles et permettent d'obtenir un mix énergétique moins carboné, elles ne sont pas exemptes de nouvelles dépendances. En effet, à une dépendance aux ressources fossiles pourrait se substituer une dépendance à d'autres ressources (métaux stratégiques, matériaux de structure, etc.) à laquelle s'adosserait une composante technologique majeure (brevets), essentielle pour comprendre les nouveaux enjeux de compétitivité autour des technologies de décarbonation, mais également pour définir des cadres conceptuels de diffusion de ces dernières dans les pays du Sud. La question de la coopération internationale sur ce point est fondamentale et s'intègre à part entière au sein des multiples enjeux de la géopolitique des énergies renouvelables. La diffusion des ENR dans le mix énergétique mondial devrait également affecter les pays producteurs d'énergies fossiles, à travers notamment une décélération du volume d'importations, plus particulièrement de pétrole et de charbon. Cette remise en cause de la sécurité de la

demande¹⁰ pourrait entraîner de larges implications macroéconomiques sur les pays exportateurs d'énergie fossile et impliquerait un changement de leur modèle de développement.

Dans ce contexte, nous proposons de nous focaliser sur trois enjeux majeurs de la transition énergétique internationale susceptibles de complexifier, à l'avenir, la géopolitique de l'énergie, à savoir (1) la criticité des matériaux intégrant les technologies de la transition énergétique, (2) la nouvelle géographie de la propriété intellectuelle des énergies renouvelables et (3) les interrogations relatives au modèle de développement des pays producteurs d'hydrocarbures, et l'évolution de leur place sur la scène internationale. Ces enjeux seront notamment étudiés dans le cadre de futures réflexions sur l'architecture des négociations climatiques. La détention d'une ressource minière (cobalt, cuivre, lithium, nickel, etc.) ou de brevets de technologies de décarbonation pourrait ainsi constituer des actifs intéressants et des clés de négociations pertinentes dans le cadre d'un accord climat post-COP21.

I. MÉTAUX ET MATÉRIAUX : QUELLES LIMITES À LA DYNAMIQUE DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE INTERNATIONALE ?

1.1 La question des ressources dans l'économie mondiale au XX^{ème} siècle

Dès le 18^e siècle, l'économie classique s'est emparée des questions relatives à la croissance de la consommation de ressources naturelles et à la problématique des limites dans un monde fini. Ainsi, Thomas Robert Malthus (1766-1834) dans son célèbre *Essai sur le principe de population* paru en 1798, pose clairement la question du facteur démographique, la population croissant à un rythme exponentiel, dans un monde d'augmentation arithmétique des ressources naturelles. Ce questionnement se retrouve au milieu du 19^e siècle chez William Stanley Jevons¹¹, dans l'un des premiers ouvrages cherchant à évaluer le possible épuisement d'une ressource énergétique, *The Coal Question*¹². Dans cet ouvrage, Jevons s'intéresse notamment à la question de la probable

¹⁰ La sécurité de la demande est un concept développé par l'OPEP et qui se veut le pendant de la sécurité de l'offre des pays consommateurs pour les pays producteurs. Elle symbolise notamment la nécessité pour ces derniers d'avoir une trajectoire de demande prévisible et stable.

¹¹ Les bases de la théorie néoclassique sont simultanément jetées entre 1870 et 1874 à Lausanne par Léon Walras, à Vienne par Karl Menger et à Londres par William Stanley Jevons.

¹² William Stanley Jevons, *The Coal Question. An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal-Mines*, Londres, Macmillan and Co., 1865.

future dépendance du pays au charbon importé et aux conséquences géopolitiques possibles, notamment un déclin du Royaume-Uni sur la scène internationale.

Ces réflexions trouvent un nouvel écho à la sortie de la Première Guerre mondiale, lorsque certains pays - États-Unis en tête - se préoccupent de savoir comment gérer des ressources stratégiques dans le nouvel environnement mondial. Dès 1917, les autorités américaines prennent conscience des difficultés d'approvisionnement et, sous l'égide de l'*Army and Navy Munitions Board*, établissent, en 1922, une liste de 14 matériaux stratégiques pour la Défense nationale, dépendants de sources d'approvisionnement extérieures et 15 matériaux critiques essentiels, produits sur le territoire. L'identification d'une problématique relative aux matériaux amène les autorités américaines à décider la constitution de stocks stratégiques dès 1939 à travers le *Naval Appropriation Act* de 1938 et le *Strategic Materials Act*¹³ de 1939. Dotée d'un budget initial de 100 millions de dollars, la commission identifie près de 42 matériaux stratégiques, en vue notamment d'un conflit en Europe et en Asie. Dès lors, les États-Unis commencent à stocker des matériaux tels que le caoutchouc, le manganèse, l'étain et la chromite. Entre 1942 et 1946, 6 matériaux stockés permettent de pallier les besoins militaires. En 1947, sous l'égide du *National Security Act*, est créé le *Natural Security Resources Board*, dont les objectifs sont d'évaluer les besoins en ressources naturelles et de gérer l'acquisition et la gestion de stocks de sécurité. En 1951, le président Truman ordonne la mise en place de la *President's Materials Policy Commission*, dirigée par William S. Paley. Son premier rapport, intitulé *Resources for Freedom*¹⁴, dresse le constat des risques engendrés par la dépendance extérieure pour les importations de matières premières. Les premières lignes s'avèrent assez emblématiques des questionnements observés à cette époque (« *Has the United States the material means to sustain its civilization?* ») et se rapproche de la problématique plus large du manque de ressource qui naîtra quelques années plus tard au regard de l'augmentation de la population mondiale, des conséquences de l'utilisation massive de pesticides sur l'environnement et du contexte de guerre froide et de fermeture partielle de relations commerciales avec certains pays. L'affrontement avec le bloc soviétique et les enjeux géopolitiques qui en découlent à différents endroits de la planète est un facteur déterminant des initiatives liées aux ressources. La Guerre de Corée permet de justifier

¹³ "Strategic and Critical Materials Stock Piling Act" <https://legcounsel.house.gov/Comps/Strategic%20And%20Critical%20Materials%20Stock%20Piling%20Act.pdf>

¹⁴ Commission Paley (1952) <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015028172412;view=1up;seq=9>

l'ensemble de ces mesures puisque des stocks d'aluminium, de cuivre et de caoutchouc naturel furent mis à la disposition des acteurs durant la période 1951-1956.

Malgré de nombreux revirements après 1962, dus notamment à l'importance des coûts de gestion¹⁵, des stocks nationaux sont constitués et seront utilisés dans les années 1960 pour le cadmium (1962), le plomb et zinc (1964), le cuivre (1966), sulfate de quinine (1966), nickel (1969). En 1974, durant la présidence Nixon (The White House, 1974), une étude sur la menace potentielle posée par l'existence de manipulations étrangères de l'offre ou du prix des produits de base non combustibles essentiels¹⁶ vient alimenter la question de l'importance stratégique des matériaux¹⁷. Si les réformes de 1973 et 1979 (redéfinition du concept de matériau stratégique et transfert des compétences vers une nouvelle entité : le *Federal Emergency Management Agency (FEMA)*) aurait dû réduire le champ des matériaux concernés, l'élection de R. Reagan en 1979 relance la dynamique avec, dès 1981, des alertes sur la vulnérabilité américaine en termes de matériaux dans son programme de défense. Au début des années 1990, la décomposition de l'URSS et la fin de la guerre froide amènent à reconsidérer des scénarios et des logiques liées aux matériaux stratégiques. L'ouverture de nombreuses zones de production aux échanges internationaux permet alors de réduire significativement le risque d'approvisionnement. Il faudra attendre les années 2000 pour que les questions d'accès aux ressources reprennent leur importance stratégique aux yeux des chercheurs et des décideurs. Le conflit ouvert sur le marché des terres rares entre la Chine et le Japon en 2011, suite aux revendications territoriales chinoises sur les îles Senkaku, confirmera le retour de ces enjeux au cœur des réflexions stratégiques.

Le Club de Rome et le rapport des limites : l'effondrement en équations

En parallèle de la vision très stratégique et nationale dont ont fait l'objet les ressources au siècle dernier, de nombreux chercheurs se sont penchés sur la question des limites à la consommation de ressources naturelles dans un monde de croissance démographique et économique. Sur les trois questions principales¹⁸ qui vont interroger chercheurs et

¹⁵ Le Président Kennedy a ainsi déclaré qu'il était "astonished to find that the stockpiling program had accumulated \$7.7 billion worth of materials, an amount nearly \$3.4 billion greater than estimate wartime needs". (Snyder, 1966)

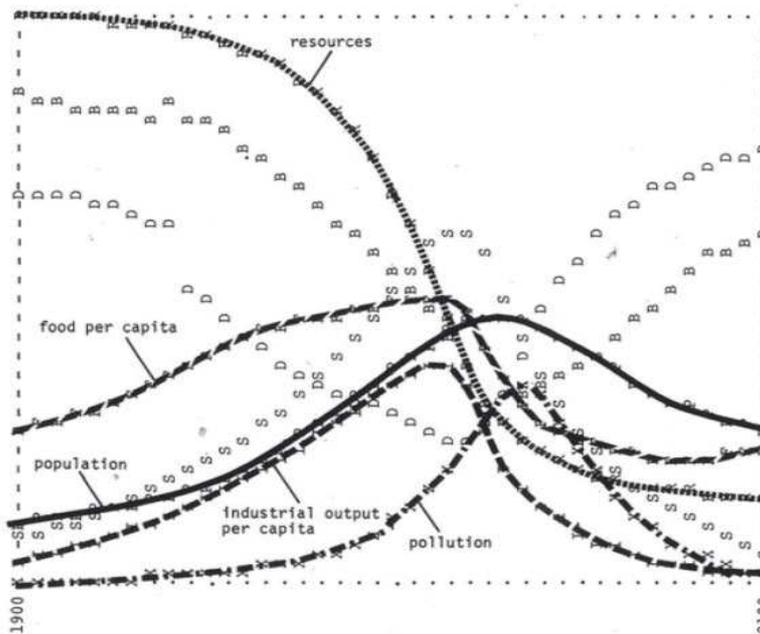
¹⁶ "The President has directed a further examination of the potential threat posed by foreign manipulation of the supply or price of critical non-fuel commodities". P 1.

¹⁷ La même réflexion a été menée sur la question des approvisionnements énergétiques (principalement pétrole et produits pétroliers) avec la création, dès 1974, de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

¹⁸ La diffusion des technologies nucléaires, l'explosion démographique et l'utilisation des pesticides.

politiques à la fin de la Deuxième Guerre mondiale, deux vont pousser les préoccupations environnementales sur le devant de la scène (l'usage massif des pesticides, et la problématique démographique¹⁹) durant les années 1960 dans le contexte de croissance économique des Trente Glorieuses. Les questionnements sur l'épuisement des ressources naturelles vont être portés par la constitution du Club de Rome en 1968. Avec le concours d'industriels et de scientifiques²⁰, ses réflexions vont permettre de rompre avec l'optimisme d'une croissance sans externalités environnementales et exposer, pour la première fois, les risques d'effondrement systémique sur la base de scénarii à long terme. Ainsi, le rapport *The Limits to Growth*²¹, publié en 1972, fruit des travaux de simulation du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), est le premier à proposer des trajectoires de dépassement et d'effondrement du système (Figure 5).

Figure 5 : Simulation de base du rapport du Club de Rome.



Source : Meadows et al. (1972a), p.233.

Les modes de production et de consommation observés depuis la reconstruction post-Deuxième Guerre mondiale ont généré des externalités environnementales et un

¹⁹ Cette question a trouvé toute sa résonance dans la couverture du magazine *Time* du 11 janvier 1960 avec le titre "That population explosion".

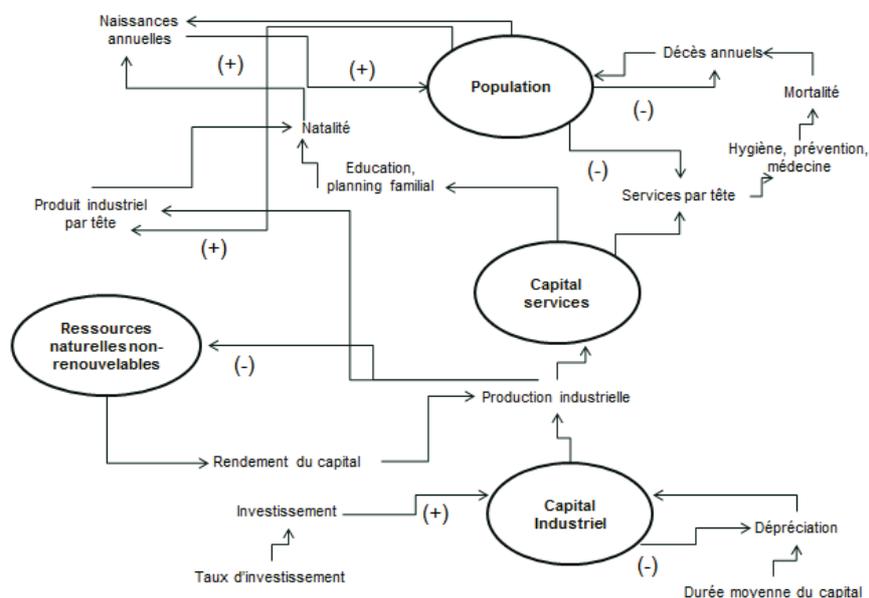
²⁰ Aurelio Peccei, membre du conseil d'administration de FIAT ; Alexander King, ancien directeur scientifique de l'Organisation de coopération et de développements économiques (OCDE) ; Jay Forrester (MIT), etc.

²¹ *Halte à la croissance ?* dans sa traduction française.

épuisement des matières premières tels que, sans changements majeurs, les modes de vie actuels pourraient s'effondrer²² avant la fin du siècle.

Si les ouvrages *Road to Survival* de William Vogt²³ et *Our Plundered planet* de Fairfield Osborn²⁴ avaient permis, dès la fin des années 1940, d'alerter sur la menace globale environnementale, l'invention politique de l'environnement global²⁵ sera largement portée par la publication de *The Limits to Growth* (Figure 6). Ce rapport acquiert une grande résonance avec une multiplication des événements liés aux ressources durant la décennie 1970.

Figure 6 : Exemple de boucle de rétroaction entre capital, services, population et ressources dans le modèle World3 (Meadows et al., 1972a)



Source : Meadows et al. (1972a), p.233.

Malgré les nombreuses critiques²⁶, le rapport du Club de Rome aura, en outre, une profonde influence sur la mise en place de structures de prospective au sein des gouvernements ou des entreprises.

²² *Ibid.*, p. 127 : "We can thus say with some confidence that, under the assumption of no major change in the present system, population and industrial growth will certainly stop within the next century, at the latest".

²³ William Vogt, *Road to Survival*, Whitefish, Literary Licensing, 2013 [W. Sloane Associates, 1948].

²⁴ Fairfield Osborn, *Our Plundered planet*, Londres, Faber & Faber, 1949.

²⁵ Termes empruntés à Yannick Mahrane, Marianna Fenzi, Céline Pessis et Christophe Bonneuil, « De la nature à la biosphère. L'invention politique de l'environnement global, 1945-1972 », *Vingtième siècle. Revue d'histoire*, n° 113, janvier-mars 2012.

²⁶ D'un point de vue méthodologique, les critiques porteront essentiellement sur l'absence d'un mécanisme de prix dans le modèle, sur une vision pessimiste du progrès technique, sur l'impossibilité de corriger les trajectoires en supposant l'application de décisions politiques et économiques, sur l'absence de validité empirique des modèles et sur un certain parti pris initial des modélisateurs. Le rapport aura un retentissement important au sein de la communauté scientifique

1.2 Une analyse bibliométrique

La littérature scientifique publiée sur le sujet de la criticité des matériaux est vaste. Depuis 2000, selon la base de données Scopus²⁷ qui a servi de base à cette analyse, 2 211 articles, textes de conférences ou autres ressources *peer-reviewed* ont été publiés sur la question de la criticité des matériaux²⁸. 80 % de cette littérature scientifique a été publiée depuis 2010, ce qui tend à démontrer l'intérêt académique actuel sur ces questions. S'y ajoutent les études globales produites par les organismes gouvernementaux, internationaux, les organisations non gouvernementales (ONG) et les acteurs industriels. La profusion d'articles académiques sur le sujet ainsi que la production de rapports d'agences internationales (Banque mondiale)²⁹ ou les réflexions du Comité pour les métaux stratégiques (COMES)³⁰ en France ou dans de nombreux pays européens reflètent l'intérêt et les préoccupations des corps économique (entreprises, États), politique et des sociétés sur ces questions. Le nombre d'articles, études ou documents de recherche sur la criticité des matériaux a ainsi fortement cru depuis le début des années 2000 (Figure 7).

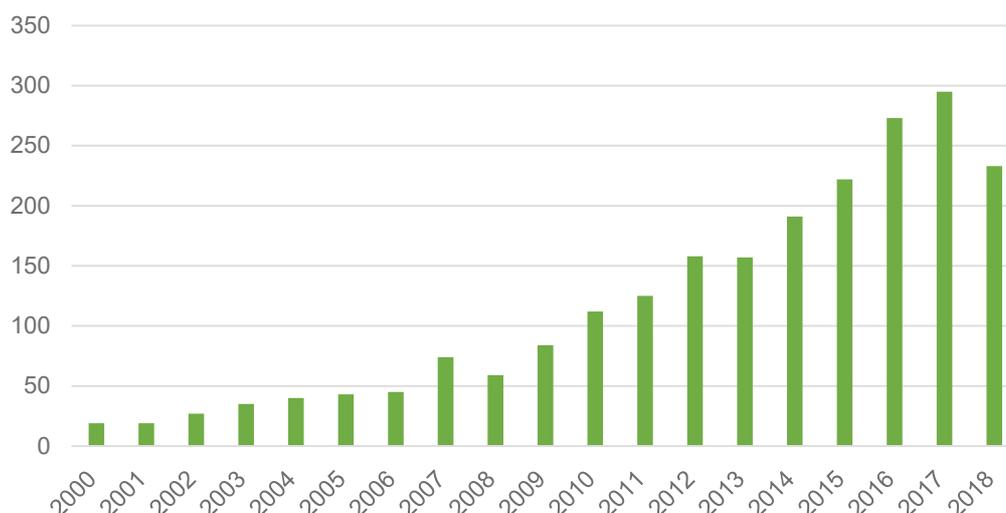
et ses conclusions toucheront le monde politique de manière hétérogène, les États-Unis les reléguant assez rapidement au second plan alors qu'en Europe, il aura des conséquences plus importantes. Le Commissaire européen de l'époque chargé des questions agricoles, exposa, ainsi, une réponse européenne à ces problèmes globaux basée sur l'abandon du Produit Intérieur Brut (PIB) comme instrument de mesure, sur la stabilisation de la population et sur une politique affichée de décroissance.

²⁷ Scopus est la base de données d'articles de journaux académiques et autres « *peer-reviewed* » publications liée à l'éditeur Elsevier. Elle couvre environ 55 millions d'entrées.

²⁸ La recherche s'est effectuée avec la requête suivante : au moins l'un des trois mots clés d'indexation Scopus « *material** » ou « *resource** » ou « *critic** » et présence dans le titre de l'un des mots suivants : « *critic** » ou « *strateg** » ou « *securit** » ou « *copper* » ou « *lithium* » ou « *nickel* » ou « *cobalt* » ou « *alum** » ou « *cement* » ou « *gravel* » ou « *concrete* ».

²⁹ Voir par exemple : <http://documents.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/The-Growing-Role-of-Minerals-and-Metals-for-a-Low-Carbon-Future>

³⁰ Voir notamment : <http://www.mineralinfo.fr/page/comite-metaux-strategiques>

Figure 7: Croissance des publications mondiales de recherche relatives à la criticité des matériaux^{31*}

Source : Intellixir

*Pour l'année 2018, la recherche a été arrêtée au 30 juin 2018.

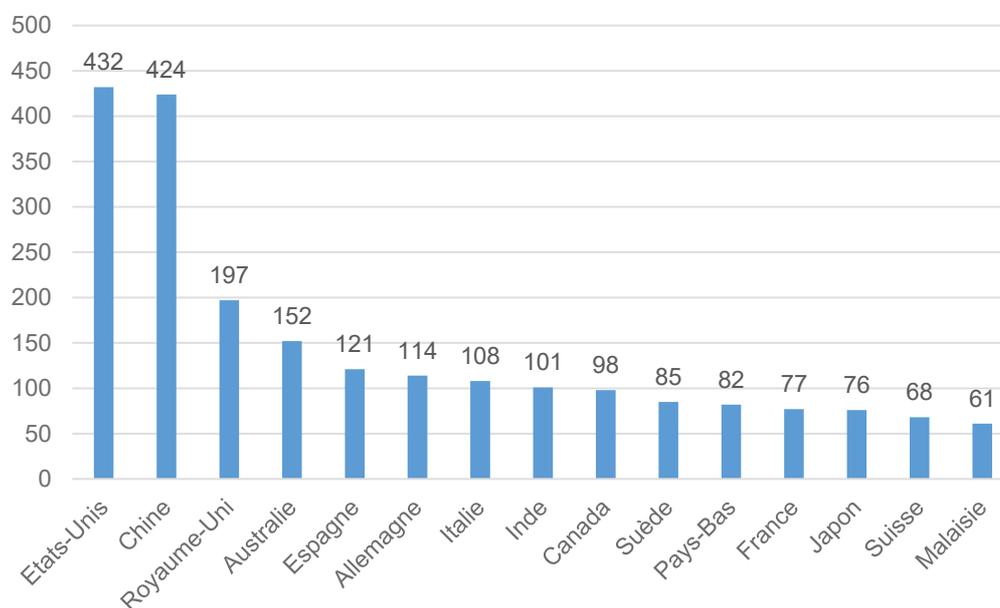
Dans ces nombreuses études, les matériaux analysés diffèrent selon les espaces, les finalités (études de risques, modélisation prospective, etc.) et les temporalités envisagées. La grande complexité du sujet et ses ramifications économiques et géopolitiques rendent souvent difficile une approche globale de synthèse des questionnements de recherche en cours.

De nombreuses équipes internationales travaillent sur la question de la criticité des matériaux. Elles ont des spécialisations, des centres d'intérêt et des hypothèses de recherche très hétérogènes. L'un des premiers objectifs de cette étude de cadrage est donc de cartographier l'état de la recherche sur ce domaine. Il s'agit notamment d'identifier les nœuds de collaboration et les centres de résultats ainsi que les principaux États et institutions impliqués. Les principaux producteurs de publications sur ces questions sont

³¹ Nous avons mené des analyses bibliométriques à l'aide du logiciel de statistique et de *text-mining* Intellixir (Intellixir est un outil de *text-mining* permettant de faire des analyses statistiques et bibliométriques sur les articles de la base de données Scopus (concepts utilisés, origine des publications, liens de collaborations entre auteurs et institutions, etc.). Ces dernières permettent de mettre en exergue le positionnement et les relations entre les différents auteurs ou institutions produisant ces recherches, leur répartition géographique et les concepts dont elles traitent, etc. Nous avons, pour cette étude, sélectionné les journaux à comité de lecture suivant : *Energy Policy*, *Energy Economics*, *Energy Resources Policy*, *Science of The Total Environment*, *European Journal of Operational Research*, *Global Environmental Change*, *Journal of Cleaner Production*, *The Extractive Industries and Society*, *Ore Geology Reviews*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *Applied Energy*, *Resources, Conservation and Recycling*, *Journal of Rare Earths*, *Sustainable Materials and Technologies*, *Ecological Economics*, *Renewable Energy*, *Environment, Science and Technology*.

les États-Unis qui dominent le classement des pays par le volume de publications parues depuis que la recherche s'est emparée du sujet.

Figure 8 : Nombre de publications par pays depuis 2000 sur la criticité des matériaux



Source : Intellixir

Ils sont, depuis les années 2010, progressivement rattrapés par la Chine qui manifeste un intérêt croissant pour ces thématiques et qui a dépassé les États-Unis, en volume de publications annuelles, depuis 2016. Un second groupe de pays se détache ensuite, composé du Royaume-Uni, de l'Australie, de l'Allemagne, de l'Italie, de l'Inde et du Canada. La France se classe en 12^e position pour le nombre de publications sur ce sujet, dans un 3^e groupe de pays assez large oscillant autour de 75 publications depuis 2000. Les années 2013 et 2014 apparaissent clairement comme des années charnières, à partir desquelles la production scientifique a cru fortement aux États-Unis, puis en Chine et dans les pays du second groupe.

La polarisation de publications en termes de centres de recherche est un peu différente. Les centres de recherche asiatiques dominent très largement le classement dont la tête est prise par l'Université de Beijing³², devant la *Chinese Academy of Science*³³, l'Université de Hong Kong³⁴ et l'Université de Shanghai³⁵. Ils sont suivis par les Universités

³² <http://english.pku.edu.cn/>

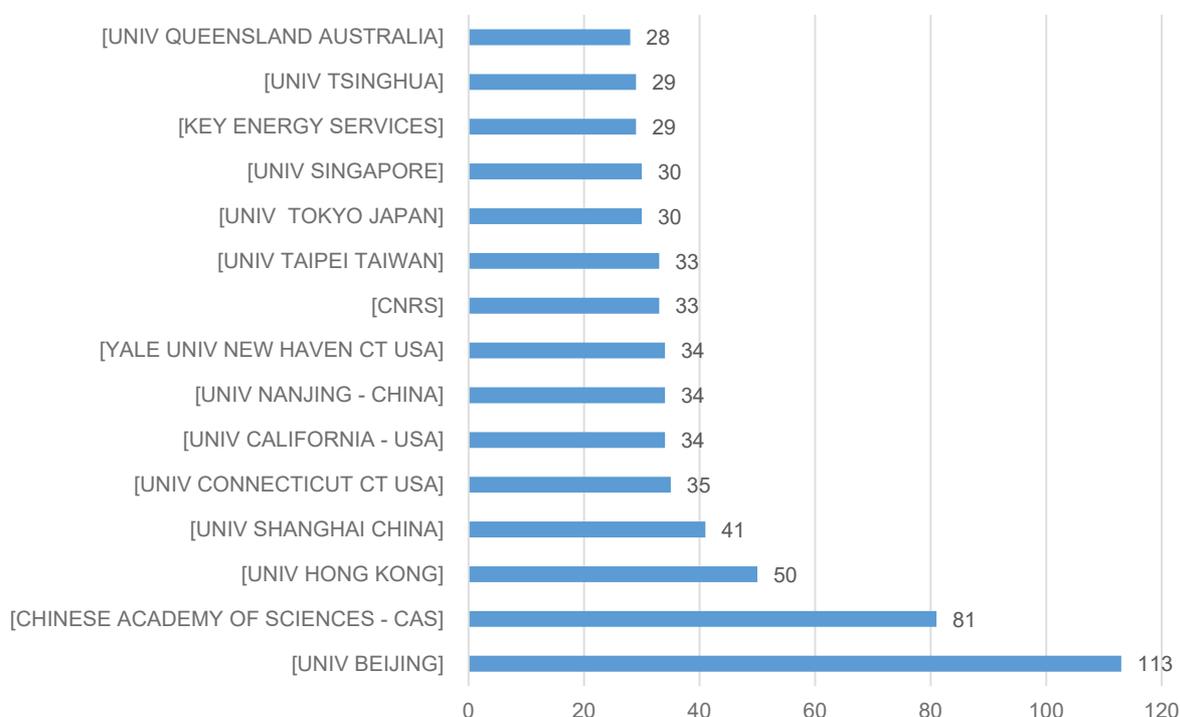
³³ <http://english.cas.cn/>

³⁴ <https://www.hku.hk/>

³⁵ <http://en.shu.edu.cn/Default.aspx>

américaines (Connecticut³⁶ et Californie³⁷). Le premier centre de recherche européen, le CNRS³⁸ occupe la 9^e place sur la période 2000-2018.

Figure 9: Distribution des publications par institution sur le thème de la criticité des ressources



Source : Intellixir

1.3 Mesurer la criticité

Controverses autour de la raréfaction des ressources minérales

La littérature économique sur la question de la criticité est importante mais le champ d'analyse reste toutefois extrêmement mal défini. En effet, si on peut conceptualiser de manière générale la criticité comme une approche basée sur une évaluation des risques liés à la production, l'utilisation ou la gestion de fin de vie d'une matière première (Graedel et Nuss, 2014), nombre d'études se focalisent sur des champs disciplinaires différenciés (économie, environnement, stratégie d'entreprises, analyse ce cycle de vie, etc.), utilisent des indicateurs variés de mesures de criticité (ratio R/P³⁹, présence de substituts, risque

³⁶ <https://uconn.edu/>

³⁷ <https://www.universityofcalifornia.edu/>

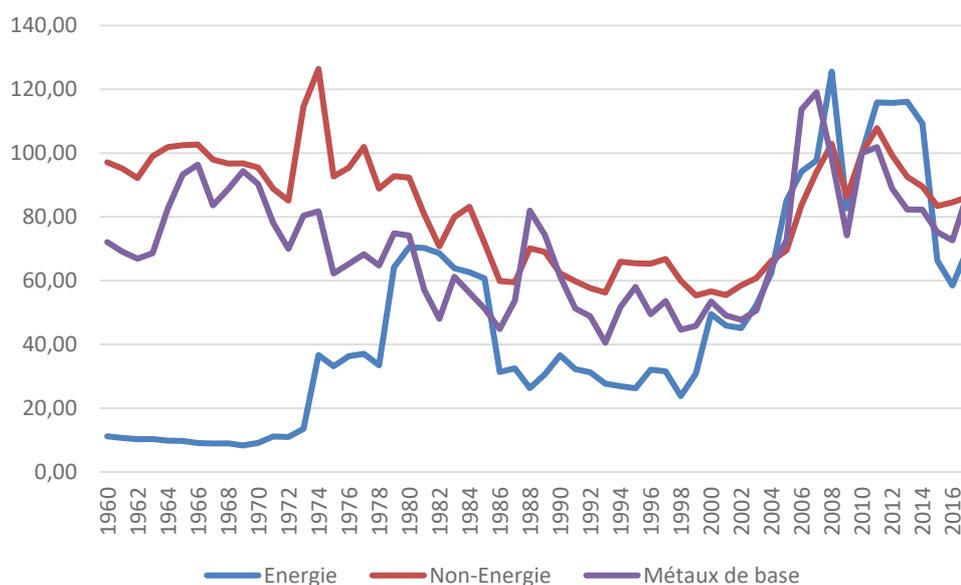
³⁸ <http://www.cnrs.fr/>

³⁹ Propre aux ressources non renouvelables ce ratio Réserve/Production est un indicateur temporel exprimant la durée pendant laquelle la réserve reste disponible et exploitable au rythme de production actuel.

de rupture d'approvisionnement, mesure des impacts économiques, indice de concentration des acteurs⁴⁰, externalités environnementales, etc.) et travaillent sur des horizons temporels multiples (du court au moyen voir très long terme), ce qui rend à première vue toute mise en comparaison hasardeuse. En 2002, l'article de J. Tilton "*On borrowed time? Assessing the threat of mineral depletion*" est le point de départ d'une controverse entre ce que Tilton appelle les optimistes (les économistes) et les pessimistes (les géologues). L'auteur divise ainsi la communauté scientifique entre partisans de deux formes de paradigmes : celui du géologue qui raisonne avec un stock fixe de ressources non-renouvelables et celui de l'économiste se basant sur la notion du coût d'opportunité. Le premier part du principe que les ressources ont un caractère fini et que le stock de ressource est ainsi limité face à une demande fluctuante et croissante dans le temps. À ce paradigme Tilton oppose les possibilités de recyclage des ressources, l'existence de substituts potentiels, l'importance du stock de ressources initiales et la notion d'élasticité-prix de la demande qui, face à une hausse marquée du coût d'extraction des ressources, devrait provoquer un effondrement de la demande. Ainsi, selon Tilton, ce n'est pas une déplétion géologique qu'il faut craindre, mais une déplétion économique. Dans ce contexte, le paradigme du coût d'opportunité est plus pertinent puisqu'il impose d'évaluer ce qu'une société est prête à abandonner pour obtenir une unité supplémentaire de ressources. Ainsi, ce paradigme impose un sentier de hausse continue du prix réel des ressources minérales dans le temps et rejette l'inévitabilité d'un épuisement ou d'un effondrement des ressources. En outre, l'innovation technologique tend à faire diminuer la pression sur les prix des matières premières comme le montrent les évolutions à long terme des cours réels (déflatés) des ressources minérales (Figure 10).

⁴⁰ L'indice HHI représente une mesure de la concentration des acteurs. Il est calculé en sommant les différentes parts de marché de chaque firme préalablement mises au carré. $HHI < 1000$ décrit un marché compétitif, $1000 < HHI < 1800$ un marché modérément concentré et un indice $HHI > 1800$ un marché très concentré (Iledare et. Al., 2004).

**Figure 10: Prix réels des matières premières
(en dollars, déflatés par l'indice des prix à la consommation des États-Unis)**



Source : Banque mondiale

Les évolutions technologiques passées ne présentent certes en rien du futur, mais la question du coût devrait empêcher que la croissance mondiale de la population et la généralisation de la consommation de minéraux provoque un épuisement des ressources minérales. Le cuivre a notamment été au centre des préoccupations des économistes et des géologues, comme en attestent les échanges entre Tilton (2002), Gordon et al. (2006), Tilton et Lagos (2007), Gordon et al. (2007). Toutefois, les analyses de Tilton n'ont pas été élaborées dans un cadre précis, comme celui de la transition énergétique.

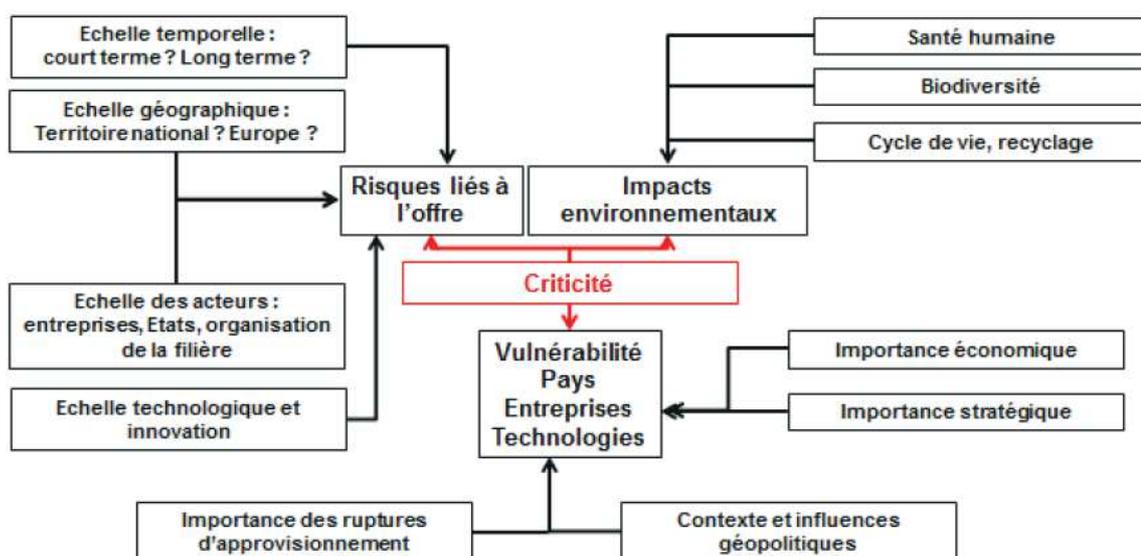
La criticité : une notion à géométrie variable

Derrière le terme de criticité se cachent de nombreuses notions utilisées à plus ou moins bon escient par la littérature scientifique ou grand public. Alain Geldron (2017) distingue les métaux rares⁴¹ ou peu abondants (leur concentration dans la croûte terrestre est comprise entre 1 et 1 000 ppm** comme le plomb le cuivre, le zinc, le nickel, le cobalt),

⁴¹Alain Geldron définit ainsi la rareté relative des métaux : « Il s'agit d'éléments chimiques dont la « rareté » est définie relativement à leur abondance dans la croûte terrestre. Les métaux dits abondants sont ceux à plus de 1000 ppm (0,1%) Silicium, calcium, sodium, magnésium, potassium, fer, aluminium, titane. Les métaux rares ou peu abondants sont ceux compris entre 1 et 1000 ppm, ce sont les plus nombreux dans lesquels se trouvent, le plomb le cuivre, le zinc, le nickel, le cobalt, le molybdène, le tungstène, etc. Les métaux très rares sont ceux dont la teneur est inférieure à 1 ppm et comprennent les métaux précieux (or, argent et les 6 platinoïdes – platine, palladium, rhodium, iridium, ruthénium, osmium) ainsi que l'antimoine, le sélénium et l'indium. »

des métaux très rares (concentration inférieure à 1 ppm comme les platinoïdes, les métaux précieux, l'antimoine, etc.)), des métaux critiques (plutôt relatif à un épisode d'embargo ou de menaces de la part d'un pays producteur), des métaux stratégiques (plutôt en lien avec la dépendance d'un État, d'un secteur ou d'une entreprise) et des petits métaux (qui se rapporte plutôt au volume produit et à la taille du marché). Il met ainsi en évidence les différentes approches nécessaires pour étudier les dynamiques enregistrées sur les marchés de matières premières. Il met également en avant la difficulté à appréhender de manière globale l'ensemble des risques afférents à la question des matières premières dans la transition énergétique. Et ceux-ci sont nombreux : risque géopolitique (cas des terres rares dont une large partie est concentrée dans les mains de quelques acteurs), risque économique (embargo, politiques de restrictions ou de préférences pour certains acteurs, rétorsions commerciales, manipulation de marché, etc.), risque lié à la production (sous-investissement, production jointe, etc.) et risque environnemental ou social (émissions de polluants liés à la production, conséquences sanitaires, destruction de paysage, etc.). Au final, la définition d'un matériau critique pourrait se résumer ainsi : il est utilisé dans de nombreux secteurs de l'industrie ; il est difficile de trouver à court terme un substitut adéquat pour une ou plusieurs applications industrielles ; le nombre d'applications industrielles l'utilisant est large et augmente au fil du temps ; il est utilisé dans des usages dispersifs induisant un potentiel de recyclage limité ; il a une grande valeur économique ; la production et les réserves sont concentrées géographiquement et sa production peut engendrer des externalités environnementales majeures. Cette définition se rapproche des méthodologies développées par Weil et al. (2009) et Helbig et al. (2016) et elle est synthétisée dans la Figure 11.

Figure 11: Évaluer la criticité des matières premières



Source : auteurs, tiré de Helbig et al., 2016.

L'absence de cadre méthodologique homogène

Le point de départ de toute étude de criticité est de savoir de quel point de vue l'on cherche à se placer pour déterminer si une matière première peut s'avérer ou non critique. La première considération à prendre en compte est d'ordre géographique. L'évaluation de la criticité dépend en effet de l'échelle que l'on adopte, si elle est mondiale, régionale ou nationale. Il n'y a donc pas d'universalité de la criticité. La deuxième considération est celle de la nature de l'entité consommatrice de la matière première. Au sens large, il peut s'agir de l'économie dans sa totalité. De manière plus restreinte, il sera question d'une industrie, d'une entreprise, voire d'une technologie. La troisième considération est temporelle. En effet, le progrès technique, les processus de production et la mise sur le marché de nouveaux produits engendrent, dans le temps, des variations d'entrées et de sorties de différents matériaux sur les marchés internationaux et nationaux. Dès lors, un matériau peut être considéré comme critique à un instant t puis considéré quelques années plus tard comme non critique (Tableau 2). D'autre part, des matériaux faisant l'objet de nombreuses interrogations à l'heure actuelle ne sont pas forcément considérés comme critique par certaines instances. À titre d'exemple, la Commission européenne ne considère pas le lithium comme un élément critique pour l'Union européenne dans ses rapports de 2011, 2014 et 2017. Sur la base de ces

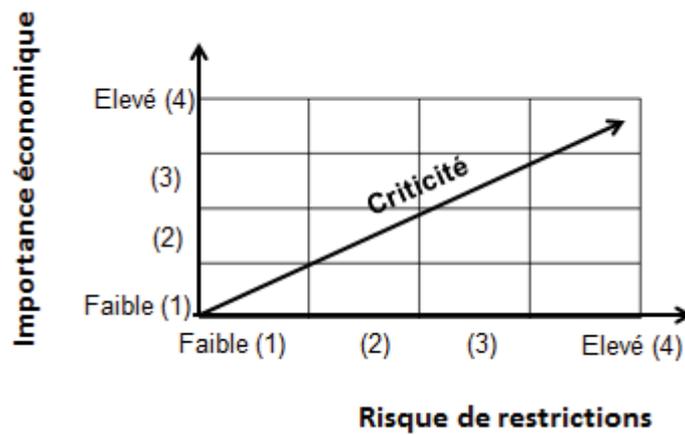
différentes modalités, quatre catégories d'études de criticité peuvent être identifiées (Achzet et Helbig, 2013) :

- Les études de criticité au niveau national qui cherchent à évaluer la disponibilité d'une matière première pour l'économie d'un pays ;
- Les études de criticité pour les technologies futures qui mettent en balance les besoins potentiels en matières premières d'une technologie spécifique et la disponibilité de la matière première analysée ;
- Les études de criticité à l'attention des entreprises qui informent les firmes du risque de criticité qui pèse sur leurs besoins en matières premières ;
- Les études qui traitent des impacts d'un épisode spécifique comme l'augmentation de la demande ou l'occurrence d'un conflit sur la criticité d'une ressource.

Une fois le cadre défini, les études cherchent à distinguer d'une part les risques sur l'offre de matière première et d'autre part l'importance économique et technique de celle-ci. Une troisième dimension a plus récemment été ajoutée dans les études de criticité : les conséquences environnementales liées à la production de la matière première (Graedel et al., 2012). Chacune de ces trois dimensions est quantifiée à l'aide de différents indices qui peuvent être agrégés suivant plusieurs méthodes. Avant de détailler ces indices et leurs modes d'agrégation, il nous faut remonter aux racines des analyses de criticité pour comprendre la séparation stricte qu'elles opèrent entre le risque d'approvisionnement et l'importance technico-économique d'une matière première.

Les analyses de criticité sont historiquement liées à l'utilisation des matrices d'évaluation des risques qui représentent l'intensité d'un risque sur un plan en deux dimensions : la probabilité de réalisation du risque et sa sévérité. La première matrice de criticité n'a été établie aux États-Unis qu'en 2008 (National Research Council, 2008) sur la base d'un double critère : l'importance économique de la ressource et le risque potentiel de restrictions d'approvisionnement. Plus le positionnement d'une matière première se rapproche du coin nord-est de la matrice représentée sur la Figure 12, plus cette dernière est jugée comme critique.

Figure 12: Matrice criticité du National Research Council aux États-Unis



Source : National Research Council, 2008

Cette méthodologie a été reprise par la Commission européenne (CE) pour évaluer la criticité des éléments chimiques dans des rapports publiés en 2011 et 2014 (CE, 2011 ; CE, 2014). Dans la dernière édition (CE, 2017), le nombre d'éléments considérés comme critique s'élève désormais à 27. L'évolution de la classification de la CE pour différents matériaux est donnée dans le Tableau 2.

Tableau 2: Matériaux critiques selon la classification de la Commission européenne*

Matériaux	2011	2014	2017
Antimoine	X	X	X
Baryte			X
Béryllium	X	X	X
Bismuth			X
Borate		X	X
Caoutchouc naturel			X
Charbon à coke		X	X
Chrome		X	
Cobalt	X	X	X
Gallium	X	X	X
Germanium	X	X	X
Graphite	X		
Graphite naturel		X	X
Hafnium			X
Hélium			X
Indium	X	X	X
Magnésite		X	
Magnésium	X	X	X
Niobium	X	X	X
Phosphate naturel			X
Phosphore			X
Platinoïdes (iridium, platine, rhodium, ruthénium)	X	X	X
Roches phosphatées		X	
Scandium			X
Silicium métal		X	X
Spath Fluor	X	X	X
Tantale	X		X
Terres rares	X		
Terres rares légères		X	X
Terres rares lourdes		X	X
Tungstène	X	X	X
Vanadium			X
TOTAL	14	20	27

Source : Commission européenne

*Les matériaux en grisé sont ceux qui apparaissent dans les trois rapports publiés en 2011 et 2017.

Une limite majeure des analyses de criticité est la pluralité des indices utilisés et de leurs modes d'agrégation pour quantifier les concepts de risque d'approvisionnement,

d'importance économique et, quand cette dimension est prise en compte, de conséquences environnementales (Helbig et al., 2016). Achzet et Helbig proposent une revue de la littérature des différentes manières d'évaluer le risque d'approvisionnement d'une matière première (Achzet et Helbig, 2013). Ils observent que 15 indicateurs différents sont mobilisés et agrégés de différentes manières pour quantifier le risque d'approvisionnement. Parmi les indicateurs les plus souvent mobilisés dans la littérature, on trouve le Herfindahl Hirschman Index (HHI) des firmes productrices et/ou des pays producteurs (mesure de la concentration de la production, voir la note de bas de page 41), le *World Governance Index* et le *Global Political Risk Index* (mesure du risque-pays), les réserves et ressources encore disponibles (mesure de la raréfaction géologique), la dépendance en tant que coproduit, les projections d'augmentation de la demande, les taux de recyclage de la matière première, le degré de substituabilité par d'autres matériaux (évalué qualitativement) et le prix de la matière première (dont la volatilité est parfois privilégiée comme mesure du risque de marché). Les indicateurs sont alors agrégés dans la plupart des cas en utilisant des moyennes pondérées (les valeurs des poids variant d'une étude à l'autre), en ne retenant que l'indicateur le plus fort, ou bien en multipliant les indicateurs. Au vu de la sensibilité des résultats aux méthodes et aux données, il est difficile de faire émerger un consensus sur le risque d'approvisionnement lié à une matière première, sauf dans le cas où tous les indicateurs s'accordent pour alerter d'un risque important. Les mêmes limites s'imposent à la mesure de la vulnérabilité d'une entité (économie, filière, entreprise, etc.) à une matière première. Dans un article ultérieur, Helbig et al. proposent cette fois-ci une revue de la littérature des méthodes utilisées pour quantifier la vulnérabilité à une matière première dans le cadre des études de criticité (Helbig et al., 2016). Les 16 études passées en revue par les auteurs ont été publiées entre 2008 et 2016. Elles diffèrent principalement par le périmètre et l'horizon temporel retenus. La vulnérabilité à une matière première revêt dans ces études trois caractéristiques : (1) l'importance économique, (2) l'importance stratégique et (3) l'impact d'une interruption temporaire et/ou partielle de l'offre. Celles-ci sont mélangées, agrégées et synthétisées suivant différentes méthodes dans le but d'obtenir une mesure unique de la vulnérabilité. Parmi les indicateurs les plus largement utilisés, nous pouvons citer la substituabilité de la matière première, la valeur des produits potentiellement affectés par une restriction sur l'offre, l'amplitude anticipée de l'augmentation de la demande, l'importance stratégique, la valeur économique de la matière première en

question et la diversité des usages de cette matière. Tout comme pour la mesure du risque d'approvisionnement, la quantification de la vulnérabilité trouve ses limites dans la diversité des méthodes d'agrégation des indicateurs, bien souvent fondées sur des pondérations arbitraires, et dans l'absence de consensus sur les indicateurs devant être inclus ou non dans l'évaluation. Les principaux indicateurs de mesure de la vulnérabilité et du risque sur l'approvisionnement utilisés dans la littérature sont listés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Indicateurs de mesure de la vulnérabilité ou de risque sur l'offre identifiés dans la littérature selon leur fréquence d'apparition

Indicateurs de vulnérabilité économique	Indicateur de risque sur l'offre
Existence d'un substitut (Qualitatif)	Concentration de la production par pays (HHI)
Valeur des produits affectés (en % du PIB)	Gouvernance (Qualitatif ou Index de gouvernance)
Ratio de demande future sur l'offre (Qualitatif)	Temps de déplétion des ressources (années)
Valeur des matériaux utilisés (en % du PIB)	Dépendance aux coproduits (en %)
Importance de l'utilisation (en % de la population, en % du PIB)	Concentration d'entreprises minières (HHI)
Dépendance aux importations (en %)	Croissance de la demande (Qualitatif ou ratio)
Importance stratégique (Qualitatif)	Dépendance aux importations (en %, en valeur)
Capacité à innover (Qualitatif)	Potentiel de recyclage (en volume)
Variation des importations (en %)	Existence d'un substitut (Qualitatif)
Concentration des entreprises productrices (HHI)	Volatilité des prix des matières premières (en \$)
Volume de consommation (en volume)	Dépenses d'exploration (en \$)
Variation de la production minière (en %)	Coûts d'extraction (en \$)
Recyclabilité du produit (Qualitatif)	Équilibre du marché (en volume)
	Taux d'utilisation de la capacité minière, capacité de raffinage (en %)
	Existence d'un marché financier
	Investissement dans le secteur minier (en \$)
	Vulnérabilité au changement climatique (Qualitatif)
	Existence de pénurie temporaire (Qualitatif)
	Risque stratégique (embargo) (Qualitatif)
	Présence dans la croûte terrestre

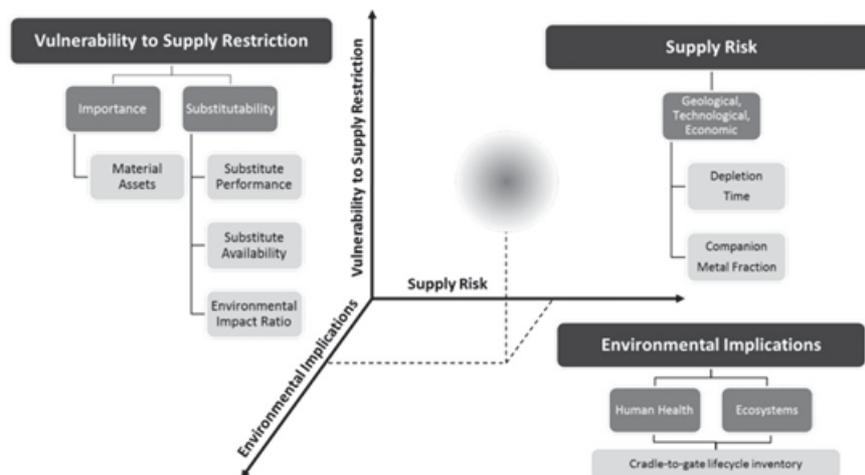
Sources : Tiré de Helbig et al. (2016) et de Frenzel et al. (2017)

La dimension la plus récemment ajoutée dans les études de criticité est la prise en compte des conséquences environnementales de la production du matériau (Graedel et al., 2012). Dans ce cadre méthodologique, les enjeux écologiques sont représentés sur un troisième axe qui vient compléter la matrice de criticité. Les conséquences écologiques de la production d'un matériau incluent, sur la base des inventaires d'analyses de cycles de vie,

les impacts sur les écosystèmes et sur la santé humaine (Graedel et al., 2012 ; Graedel et al., 2015). Une autre approche proposée par Goe et Gaustad synthétise le risque environnemental en prenant en compte l'énergie primaire incorporée dans la production, la toxicité du matériau en question et les économies d'énergie que permet le recyclage du matériau quand celui-ci est envisageable (Goe et Gaustad, 2014).

Ces enjeux sont appréhendés comme étant indépendants de la vulnérabilité à une matière première ou au risque d'approvisionnement ; cette séparation stricte est une hypothèse questionnable qui fait de l'ajout de cette troisième dimension un point de divergence majeur dans la littérature des études de criticité (Dewulf et al., 2016). Ces analyses de criticité pratiquées dans une matrice à trois dimensions (Figure 13) plutôt que dans un plan (matrice à deux dimensions) posent ainsi problème selon Frenzel et al. (2017).

Figure 13 : Matrice à 3 dimensions



Source : Graedel, 2013

En effet, l'introduction d'une troisième dimension portant sur les implications environnementales repose sur l'hypothèse implicite selon laquelle la dimension environnementale n'impacte ni la probabilité de rupture d'approvisionnement, ni la vulnérabilité économique à cette rupture. Or les enjeux environnementaux et leurs impacts sur la santé sont les justifications de l'implémentation de politiques d'internalisation des externalités, donc les conséquences se traduisent économiquement par la réduction de la production, la recherche de substituts ou le développement de

pratiques efficaces de recyclages. Autant d'ajustements susceptibles d'impacter les deux dimensions initialement prises en compte par les matrices de criticité.

Une dernière lacune dans la méthodologie existante sur la criticité réside dans l'appréhension de la dimension géopolitique, comprise comme l'étude des rapports de force internationaux. Celle-ci est généralement incluse dans l'évaluation du risque d'approvisionnement à travers divers indicateurs : les deux plus courants sont la concentration de la production (basée sur le HHI) et la stabilité politique, évaluée la plupart du temps à l'aide du *World Governance Index*.

La concentration de la production s'avère être l'indicateur le plus communément utilisé dans les études de criticité (Frenzel et al., 2017). Le sous-texte géopolitique de l'évaluation de la concentration de la production se comprend comme suit : plus la part de marché d'un pays exportateur est importante, plus le risque que ce pays soit tenté de jouer de cette position pour exercer une pression politique ou économique sur le/les pays importateur(s) augmente. La géopolitique des hydrocarbures constitue de ce point de vue un exemple significatif. Toutefois, nous suivons Gemechu et al. (2016) dans leur tentative d'affiner et de quantifier le « risque géopolitique » en mettant à l'écart le HHI et en définissant le « risque géopolitique » attribué à un pays producteur comme la somme des risques proportionnelle à sa contribution aux importations d'un pays importateur (la dépendance nette aux importations) et à sa stabilité politique. Helbig et al. (2016) pondèrent ce nouvel indice en incluant dans le calcul la production domestique du pays importateur, susceptible de pallier (ou pas) une éventuelle rupture d'approvisionnement. Autrement dit, au-delà de la concentration du marché, qui est générique, le « risque géopolitique » est plus spécifique puisqu'il s'appuie sur la dépendance nette aux importations d'un pays client vis-à-vis d'un pays fournisseur, indicateur curieusement mobilisé de manière moins fréquente (Frenzel et al., 2017). En allant plus loin, dans un contexte de tensions géopolitiques marqué par des « guerres commerciales », l'évaluation des risques d'approvisionnement s'enrichirait significativement à prendre en compte l'évolution des restrictions à l'exportation, comme le suggèrent Blengini et al. (2017). À la frontière entre les logiques de marché et les logiques politiques, les restrictions ont en effet plus que quadruplé entre 2009 et 2014 et concernent 20 des matériaux critiques de l'UE (OCDE, 2014).

L'indicateur de stabilité politique, deuxième indicateur le plus utilisé (Frenzel et al. 2017), est évalué la plupart du temps en fonction du *World Governance Index*. Outre le fait que le concept de stabilité politique demeure relativement flou et soumis à toute sorte de biais, que la relation entre bonne gouvernance et stabilité politique n'est pas tout à fait linéaire, la relation causale entre instabilité politique et risques d'approvisionnement mériterait de plus amples recherches empiriques. Le cas de la République démocratique du Congo, où les liens entre l'exploitation des minerais et l'instabilité politique chronique apparaissent pour le moins complexe, illustre ce besoin d'approfondissement. En outre, si l'on observe les causes de perturbation dans la chaîne d'approvisionnement de 22 métaux depuis 1967, seuls 3% relèvent de l'instabilité politique, comprise comme « conflit domestique et attaques par des groupes antisociaux » (Hatayama et Tahara, 2018) (Tableau 4). Le fait que la stabilité politique soit un indicateur constamment mobilisé dans les études de criticité, sans être pourtant tout à fait opérant, cache en réalité une lacune analytique en matière géopolitique.

Tableau 4 : Perturbations d'approvisionnement de métaux dues à l'instabilité politique depuis 1967

Métal	Année	Durée en jours	Pays	Effets
Cobalt	1975		Angola	Négligeable ou inconnu
Cobalt	1977	60	RDC	Déclin de la production
Cobalt	1978	60	RDC	Suspension de la production
Cobalt	1991	60	RDC	Déclin de la production
Titane	1995		Sierra Leone	
Copper	2004	19	RDC	
Gold	2009	3	Argentine	Hausse des prix
Nickel	2009	7	Papouasie-Nouvelle-Guinée	Hausse des prix, suspension de la production
Plomb/Zinc	2010		Bolivie	Délais de développement
Nickel	2011		Philippines	Négligeable ou inconnu
Nickel	2011		Indonésie	Déclin de la production
Nickel	2014	2	Brésil	
Or	2015		Mexique	Suspension de la production
Or	2015	30	Honduras	Suspension de la production

Source : Hatayama et Tahara, 2018.

En effet, une analyse qualitative de la nature complexe et évolutive des relations et du rapport de force entre le pays client (ou le pays dans lequel l'entité/entreprise considérée

possède ses intérêts) et le pays fournisseur, difficilement transposable en indice, s'avère essentielle à la mesure de la criticité d'un minéral.

Le dernier document méthodologique de l'USGS concernant l'établissement de la liste des matériaux critiques (USGS, 2018) se révèle, de ce point de vue, particulièrement évocateur. Il commence par préciser :

« Most of entries in the table are materials for which production concentration and net import reliance are high (typically HHI greater than 2,500 and [Net Import Reliance (NIR)] greater than 50 percent for either the years 2016, 2017, or both). Entries that are below the chosen threshold based on one metric or the other, but for which a case for inclusion can be made on grounds of particularly critical applications, also are included. The latter is based on the judgment of subject-matter experts of the [Critical and Strategic Mineral Supply Chain (CSMSC)] Subcommittee. »

On comprend donc que la désignation de la criticité finale dépendra d'une analyse qualitative *a posteriori*, basée sur les usages potentiellement sensibles de certains minerais. Mais le texte poursuit ainsi :

« The largest foreign suppliers of these targeted mineral commodities have been included in addition to the NIR to provide broader strategic context, which highlights that not only does the United States require foreign supplies, but that 12 out of the 26 commodities with high United States NIR are sourced primarily from China. However, high NIR should not be construed to always pose a potential supply risk. For example, three of the commodities deemed critical or near critical are primarily imported from Canada, a nation that is integrated with the United States defense industrial base. »

Malgré la formulation sibylline, on comprend que la criticité (ou du moins une forme de « criticité ressentie ») dépend en large partie de l'identité du pays fournisseur, en l'occurrence la Chine, qui domine le marché des minerais stratégiques et avec laquelle l'administration présidentielle américaine actuelle entretient des relations tendues. Par ailleurs, le fait, pour l'USGS, de dépendre du Canada pour certains minerais critiques, ne semble explicitement pas représenter un enjeu politique ni même économique. Ce constat mène à nous questionner sur une méthodologie plus robuste en termes de criticité, qui inclurait les relations politiques et stratégiques entre les différents acteurs des marchés étudiés. Les relations d'interdépendance entre pays exportateurs et importateurs

seraient également à étudier, en développant par exemple un indice de dépendance net aux exportations pour les pays producteurs, qui viendrait pondérer l'indice de concentration du marché ou de dépendance nette aux importations du pays client.

La criticité n'est ni universelle, ni intemporelle, ni binaire (Graedel and Reck, 2016). Elle varie en réalité en fonction des intérêts économiques (commerciaux, technologiques, financiers) et politiques (sécurité, défense, politique étrangère) d'un État, dont elle est nécessairement le reflet. Elle constitue également une clé de lecture pour les relations de cet État avec ses partenaires sur la scène internationale. La nécessité de prendre en compte la dimension géopolitique et d'en affiner la mesure quantitative et qualitative, dans les études sur la criticité apparaît ainsi comme un défi essentiel, à la fois pour le chercheur et le décideur.

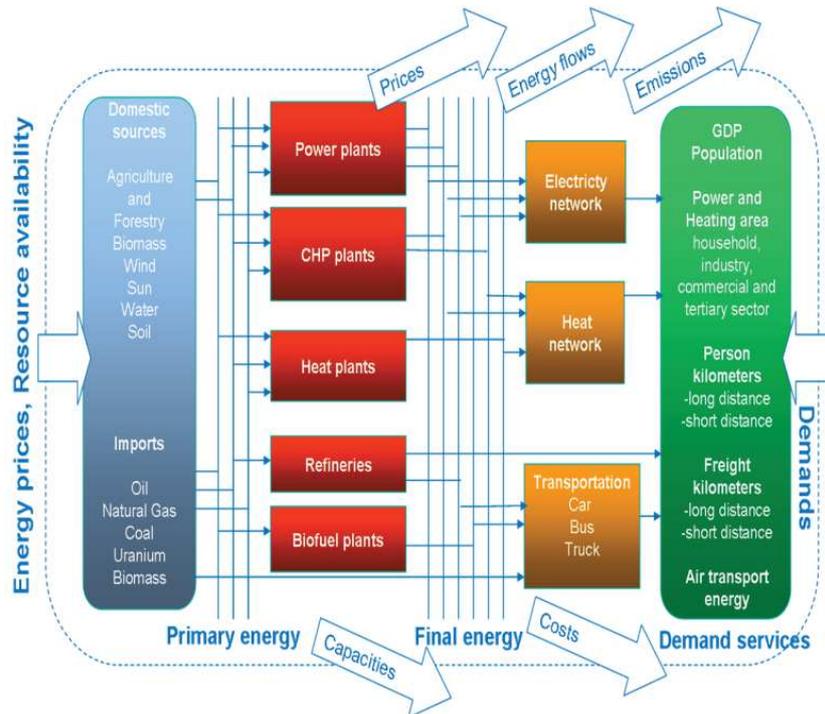
1.4 Les apports de la modélisation prospective dans les études sur la criticité des ressources

L'apport des modèles technologiques pour la compréhension des processus de transition énergétique

Les modèles technologiques pour la prospective énergétique émanent de la préoccupation centrale des économistes : l'allocation optimale des ressources rares. De façon schématique, il s'agit de trouver le « meilleur » moyen de répondre au(x) besoin(s) des agents économiques (ménages, firmes ou État), de la façon la plus rationnelle possible –, c'est-à-dire en combinant de manière optimale les différents facteurs de production tels que l'énergie et le capital. L'approche repose donc essentiellement sur une analyse de l'offre de biens et services. Dans le modèle développé à IFPEN au niveau mondial (TIAM), les demandes pour des services énergétiques sont renseignées de façon exogène, ce qui nécessite de réaliser des études de sensibilité sur ces demandes, voire de les scénariser de façon plus extensive. Les ressources naturelles disponibles, et les technologies de conversions (existantes ou futures) sont ensuite progressivement mobilisées pour satisfaire la demande. Les paramètres exogènes (ressources, demandes, coûts et certains prix) étant incertains dans le long terme, certains peuvent également faire l'objet d'études de sensibilité en fonction de la question posée. D'autres sont scénarisés de façon extensive (éventuellement à partir de modèles annexes) afin d'explorer les implications de la variété des futurs possibles des grandeurs exogènes. Grâce à une description formelle du processus, ces différentes étapes s'organisent pour maximiser le surplus total (consommateurs et producteurs) actualisé du système énergétique. On va donc solliciter

les technologies par coûts croissants de façon à répondre aux différentes contraintes programmées (contraintes d'émissions de gaz à effet de serre pour des scénarios climatiques par exemple). Ces analyses coûts – efficacité permettent *in fine* d'identifier les technologies les plus prometteuses, les marges de manœuvre et les conditions de leur mobilisation pour satisfaire les besoins de la société tout en répondant à des objectifs ou instruments de régulation environnementaux définis pour l'étude.

Figure 14 : Représentation schématique d'un modèle technologique de type TIMES



Source : Remme et Mäkelä, 2001

Les approches de ce type permettent d'identifier des bornes (inférieures, supérieures) sur le déploiement des technologies, en sachant qu'il serait *a priori* difficile de faire mieux en intégrant la multitude d'imperfections de marchés présentes en réalité. Ils fournissent également un cadre d'hypothèses simples (concurrence, anticipations parfaites) et reproductibles qui facilitent l'interprétation et la comparaison de scénarios. En cela, ils sont une alternative aux approches quantitatives pour la compréhension des phénomènes économiques propres à la transition énergétique. En effet, la complexité des systèmes énergétiques et l'incertitude radicale qu'ils contiennent sur le long terme ne peuvent en aucun cas se résumer à quelques « chiffres-clés ». Une telle approche, réductionniste, serait d'autant plus problématique qu'elle reposerait sur des méthodologies nécessairement imparfaites.

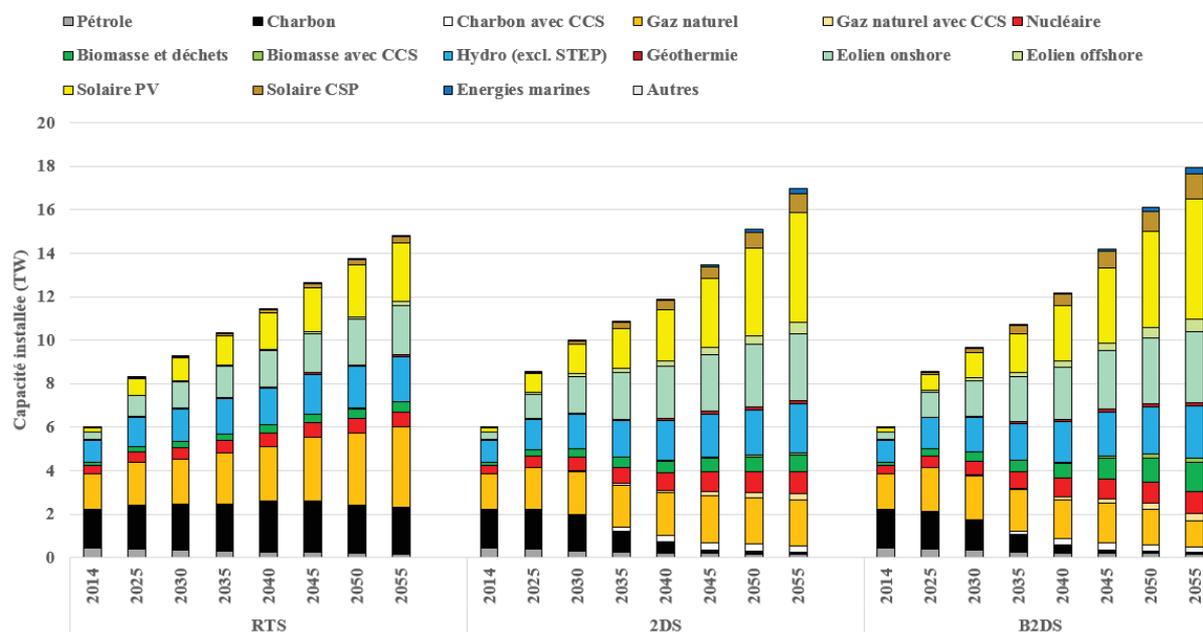
En outre, la méthodologie prospective ne peut être assimilée à de la prévision. En effet, la prévision s'attache à anticiper l'état d'une économie ou d'un facteur spécifique à un horizon donné. La vertu de ce type d'exercice reste ainsi de figer le futur, le plus souvent de manière chiffrée, sur la base d'extrapolation du passé. Les modèles prospectifs se détachent des modèles de prévision, car leur objectif premier est d'inviter les différents acteurs à :

- comprendre les relations causales entre les différents facteurs ;
- mettre à jour et observer le champ des possibles ;
- exploiter le potentiel de rupture d'une économie ;
- explorer différentes trajectoires possibles construites sur la base de scénarios.

Mesurer la criticité des matériaux de la transition énergétique en s'appuyant sur les modèles de l'Agence internationale de l'énergie (AIE)

L'Agence internationale de l'énergie (AIE) fournit dans son rapport *Energy Technology Perspectives 2017* (ETP 2017) des scénarios climatiques visant à limiter le réchauffement climatique global à respectivement 2°C (2DS) et à moins de 2°C (B2DS). Elle fournit aussi une prévision de l'évolution des capacités électriques dans le cadre des politiques énergétiques actuelles pour élaborer un scénario de référence. L'évolution des capacités électriques installées est représentée en Figure 15.

Pour estimer la demande future en matériaux, nous avons établi un modèle simple sur le seul secteur électrique dans cette première approche. Ce modèle a pour données d'entrée les différents besoins en matériaux des centrales électriques - ces données sont extraites de la base de données *EcoInvent* - ainsi que les données de capacités électriques installées selon l'ETP 2017. Le modèle a pour données de sortie les quantités cumulées de matériaux nécessaires pour atteindre les objectifs de transition énergétique des différents scénarios de l'AIE (RTS, 2DS, B2DS). Pour estimer correctement ces demandes, il est nécessaire de prendre en compte la durée de vie de chaque type de centrale pour identifier les dates de démantèlements et ne pas sous-estimer la demande globale. À l'aide des données d'EDF, du Département américain à l'énergie (DOE), du CEA et de certains articles de la littérature (Uson et al., 2013), un balayage de l'historique des technologies installées a été effectué pour estimer, à l'aide de leur durée de vie moyenne, la date de démantèlement et donc de remplacement de chaque centrale pour respecter les prévisions de l'ETP 2017.

**Figure 15 : Capacités électriques installées dans les différents scénarios de l'AIE
(en GW)**


Source : AIE

Plusieurs matériaux (métaux non-ferreux, métaux rares, terres rares, etc.) ont été étudiés à l'aide de ce modèle et les résultats sont présentés dans le Tableau 5. Les colonnes 2DS-RTS et B2DS-RTS représentent respectivement l'accroissement des besoins en matériaux par rapport au scénario de référence (RTS, *Reference Technology Scenario*). Les résultats représentent seulement les nouveaux besoins dans le secteur électrique et ne permettent pas de conclure de manière globale sur les besoins de la transition énergétique puisqu'il faudrait y ajouter les demandes des secteurs du transport et du bâtiment notamment. Toutefois, on observe que les scénarios 2DS et B2DS dans le secteur électrique n'impactent pas de la même façon les différents matériaux. Ainsi, l'ensemble granulats-ciment-eau enregistre une hausse de 17 % dans le scénario 2DS et de 23 % dans le scénario B2DS, quand les métaux non-ferreux (aluminium, cuivre, nickel, plomb, zinc) enregistrent, pour leur part des hausses respectives de 70 % (90 %), 61 % (78 %), 19 % (19 %), 79 % (98 %) et 62 % (74 %) pour le scénario 2DS (B2DS). Les matériaux les plus impactés par les deux scénarios sont l'indium, le manganèse, le tantale, le molybdène, le palladium, l'or et l'argent pour lesquels la demande ferait plus que doubler dans les scénarios B2DS.

**Tableau 5 : Demande en matériaux dans les différents scénarios de l'AIE
(en tonnes)**

Matériau	RTS	2DS	B2DS	2DS-RTS	B2DS-RTS
Granulats*	3 017 695 622	3 534 755 673	3 709 825 724	+ 17%	+ 23%
Ciment*	928 521 730	1 087 617 130	1 141 484 838	+ 17%	+ 23%
Eau*	696 391 297	815 712 847	856 113 628	+ 17%	+ 23%
Acier	681 132 990	747 782 592	754 570 956	+ 10%	+ 11%
Aluminium	74 800 605	126 930 022	142 078 140	+ 70%	+ 90%
Cuivre	34 879 198	56 194 201	62 197 526	+ 61%	+ 78%
Fer	22 299 010	32 725 170	34 635 118	+ 47%	+ 55%
Chrome	4 528 943	5 433 320	5 445 896	+ 20%	+ 20%
Nickel	4 391 970	5 236 820	5 220 897	+ 19%	+ 19%
Zinc	376 478	609 104	655 141	+ 62%	+ 74%
Argent	211 686	383 830	434 426	+ 81%	+ 105%
Étain	97 830	177 385	200 768	+ 81%	+ 105%
Plomb	76 806	137 492	151 719	+ 79%	+ 98%
Zirconium	62 739	97 939	76 060	+ 56%	+ 21%
Indium	38 678	70 132	79 376	+ 81%	+ 105%
Tantale	26 118	47 358	53 601	+ 81%	+ 105%
Manganèse	2 553	4 629	5 239	+ 81%	+ 105%
Molybdène	2 064	3 743	4 236	+ 81%	+ 105%
Palladium	2 064	3 743	4 236	+ 81%	+ 105%
Or	633	1 148	1 299	+ 81%	+ 105%
Platine	181	277	200	+ 53%	+ 11%

Source : auteurs, sur la base des scénarios AIE

Ces résultats sont en partie comparables à ceux de l'étude de la Banque mondiale (2017). Cette dernière a déterminé les demandes en matériaux pour la transition énergétique en se basant sur les données de l'ETP 2015, et prend en compte l'évolution du domaine des transports (prolifération des véhicules électriques notamment) en plus de la production d'électricité à l'aide des technologies solaires et éoliennes. Les matériaux pris en compte dans cette comparaison sont ceux dont l'utilisation dans les véhicules ou dans les batteries est marginale ou nulle. La Banque mondiale estime la demande cumulée en indium à 80 kt pour le scénario 2DS 2015 et celle de l'argent à environ 420 kt, ce qui correspond au même ordre de grandeur que les résultats de notre étude. Pour l'aluminium et le cuivre, si l'on ne prend en compte que les technologies considérées par l'étude de la Banque mondiale, les estimations de cette étude sont supérieures, avec respectivement environ 120 Mt et 47 Mt pour le scénario 2DS dans cette étude, contre 80 Mt et 20 Mt dans les résultats de la Banque mondiale. Ces écarts sont essentiellement dus à l'évolution des

* Les calculs concernant ces éléments se limitent à leur présence dans le béton. Leur demande globale peut être considérée comme supérieure à celle présentée dans ce document (notamment pour l'eau).

scénarios climatiques de l'AIE entre 2015 et 2017, favorisant de plus en plus la production d'électricité à travers les technologies solaires et éoliennes. La comparaison des résultats pour les autres matériaux n'est pas pertinente, car notre calcul ne prend pas en compte le secteur des transports, qui représente une grande part de la demande de ces matériaux. En matière de technologie, c'est le déploiement des capacités solaires⁴² qui engendre la plus forte hausse de demande de matériaux dans les scénarios de l'AIE (Tableau 6).

Tableau 6 : Croissance moyenne des besoins en métaux pour les différentes technologies de génération d'électricité par rapport au scénario RTS

	Nucleaire	Hydroélectrique	Geothermie	Eolien	Solaire
2DS	53%	19%	63%	53%	81%
B2DS	30%	29%	83%	62%	678%

Source : auteurs, sur la base des scénarios AIE

Excepté pour l'hydroélectricité, qui enregistre des taux de croissance de 19 % et 29 % pour les deux scénarios, les autres technologies de génération d'électricité s'accompagnent d'une hausse de la demande en matériaux variant de 53 % à 63 % dans le scénario 2DS et de 30 % à 83 % dans le scénario B2DS. La méthodologie employée peut également être retenue pour étudier les différences géographiques de consommation de matériaux selon les scénarios de l'AIE. Les deux exemples fournis dans le Tableau 7 nous permettent d'observer les dynamiques de consommation de la Chine et de l'Inde à l'horizon 2050. Premier et troisième consommateurs d'énergie mondiaux à l'heure actuelle, la Chine et l'Inde auront un impact significatif sur le système énergétique mondial, et donc, *de facto*, sur la consommation de matériaux dans les années à venir.

Tableau 7 : Besoins en matériaux de la Chine et de l'Inde

Matériau	Chine		Inde	
	2DS-RTS	B2DS-RTS	2DS-RTS	B2DS-RTS
Granulats*	3 %	2 %	34 %	37 %
Ciment*	3 %	2 %	34 %	37 %
Eau*	3 %	2 %	34 %	37 %

⁴² Pour le scénario B2DS, le chiffre moyen d'augmentation pour la technologie solaire n'est pas représentatif de l'accroissement des besoins en ressources, puisqu'on observe un doublement pour l'ensemble des métaux non-ferreux (excepté le zinc qui n'enregistre qu'une hausse de 13 %) et métaux rares et une croissance de près de 4 000 % pour l'ensemble granulats-ciments-eau.

* Les calculs concernant ces éléments se limitent à leur présence dans le béton. Leur demande globale peut être considérée comme supérieure à celle présentée dans ce document (notamment pour l'eau).

Acier	3 %	0,4 %	15 %	20 %
Aluminium	32 %	32 %	167 %	176 %
Cuivre	30 %	28 %	153 %	162 %
Fer	35 %	32 %	56 %	73 %
Chrome	16 %	13 %	57 %	59 %
Nickel	17 %	13 %	57 %	59 %
Zinc	38 %	37 %	116 %	131 %
Argent	39 %	40 %	188 %	199 %
Étain	39 %	40 %	188 %	199 %
Plomb	39 %	41 %	186 %	196 %
Zirconium	41 %	56 %	160 %	162 %
Indium	39 %	40 %	188 %	199 %
Tantale	39 %	40 %	188 %	199 %
Manganèse	39 %	40 %	188 %	199 %
Molybdène	39 %	40 %	188 %	199 %
Palladium	39 %	40 %	188 %	199 %
Or	39 %	40 %	188 %	199 %
Platine	41 %	57 %	155 %	155 %

Source : auteurs, sur la base des scénarios AIE

La Chine a investi près de 127 milliards de dollars dans les ENR en 2017 (BNEF, 2017), ce qui représente près de 45 % des investissements mondiaux. Le XIII^e plan quinquennal chinois (2016-2020) est particulièrement symptomatique de la volonté chinoise de prendre le leadership mondial sur les questions environnementales. En effet, les autorités sont conscientes des risques liés aux questions de pollutions, notamment les risques de déstabilisation et de contestation politique de la part des citoyens chinois ainsi que les enjeux économiques et financiers associés. Le gouvernement chinois a mis en place, à travers son plan d'action stratégique en matière d'énergie (PASE 2014-2020) et le XIII^e plan, un ensemble d'objectifs à atteindre en matières énergétique et environnementale. Ainsi, parallèlement à l'établissement d'un véritable cadre structurel favorable à l'investissement vert⁴³ et d'une commission (*Green Finance Task Force*) dès 2014, la transition énergétique chinoise repose principalement sur la limitation de la consommation énergétique, la décarbonation progressive du mix énergétique et les efforts d'efficacité énergétique. L'Inde a, pour sa part, investi des sommes bien moins importantes que son voisin (près de 10 milliards de dollars) dans les ENR (Hache et Simoën, 2018), ce qui n'empêche pas le gouvernement d'afficher des objectifs ambitieux dans ce secteur.⁴⁴ La production ENR devrait représenter 175 GW à la fin 2022, déclinée

⁴³ Pour plus de détails, voir E. Hache, D. Leboulenger : <https://theconversation.com/en-investissant-pour-sauver-leclimat-les-banquiers-sauveront-ils-les-banques-67426>

⁴⁴ Aujourd'hui, environ 62 GW sont connectés au réseau indien.

en 60 GW d'éolien, 10 GW de biomasse et 5 GW de petit hydraulique. Le secteur du solaire, à lui seul, devrait représenter 100 GW - soit environ 1,6 fois le parc nucléaire installé en France - décomposés en 40 GW de toits solaires et 60 GW de centrales. En outre, l'Inde ambitionne d'investir largement dans le secteur du nucléaire⁴⁵ et prévoit successivement 14,6 GW de capacités installées en 2020 et 63 GW en 2032. Le nucléaire pourrait représenter à terme environ 25 % de la génération d'électricité du pays en 2050, ce qui correspondrait à une fourchette comprise entre 150 GW et 200 GW de capacités nucléaires installées sur le territoire.

Mesurer la criticité du lithium et du cuivre à l'aide du modèle TIAM⁴⁶

Avec plus de 3 millions de véhicules électrifiés⁴⁷ particuliers en circulation, dont près de 40 % en Chine, et une progression de 56 % par rapport à 2016, l'année 2017 s'inscrit dans la tendance à l'électrification du parc automobile observée depuis 2010.⁴⁸ Bien que représentant toujours moins de 1 % de la flotte mondiale de véhicules, l'engagement des constructeurs⁴⁹ et des pouvoirs publics pour le véhicule électrique laisse présager un potentiel massif d'électrification dans les années à venir. Dans de nombreuses régions du monde, l'électrification du secteur des transports est devenue une priorité pour répondre aux objectifs climatiques nationaux et aux problématiques locales de pollution. Comme nous l'avons vu, cette électrification, tout comme la dynamique observée actuellement dans le secteur des énergies renouvelables, est source de nouvelles incertitudes par rapport à la disponibilité de certaines ressources minérales dans un contexte de transition énergétique, incertitudes dont le lithium, métal stratégique pour la production de batteries, est particulièrement représentatif. Le secteur du transport et la filière du lithium ont ainsi été modélisés afin d'étudier l'impact de l'électrification du parc sur les

⁴⁵ L'Inde possède également 21 réacteurs nucléaires, répartis sur six sites, d'une capacité totale de 5,7 GW, soit moins de 2 % des capacités électriques totales installées (300 GW de capacités totales). En 2017, ce sont cinq nouveaux réacteurs nucléaires qui étaient en construction avec une capacité supplémentaire de 3,8 GW. Voir notamment : Hache, E., Simoën, M. (2018). : Inde : les défis de l'industrialisation et de la dépendance énergétique dans un contexte de changement climatique

⁴⁶ Pour le détail des scénarios sur le lithium et sur le cuivre, voir notamment les articles suivants des mêmes auteurs « Critical raw materials and transportation sector electrification: A detailed bottom-up analysis in world transport » (A venir, décembre 2018) et « Copper at the crossroads: Assessing the impact of the low-carbon energy transition on a non-ferrous and structural metal » (A venir, décembre 2018).

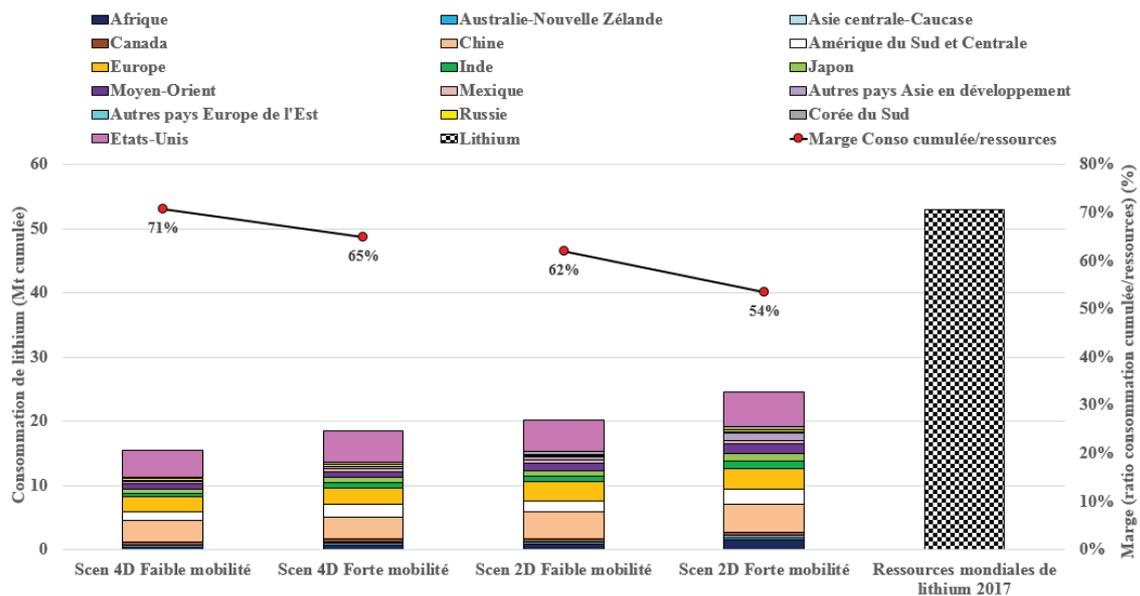
⁴⁷ Les Véhicules électrifiés incluent les Véhicules électriques à batterie, Véhicules électriques hybrides rechargeables (Plug-in) et les Véhicules à pile à combustible.

⁴⁸ International energy agency (IEA), *Global EV Outlook 2018*, https://webstore.iea.org/download/direct/1045?fileName=Global_EV_Outlook_2018.pdf

⁴⁹ 200 milliards d'investissements prévus par ces derniers à l'horizon 2020-2025, <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Tous-les-Zooms/Le-marche-automobile-le-tableau-de-bord-d-IFPEN-n-6-Avril-2018>

ressources en lithium. En outre, les demandes de lithium résultant des autres secteurs (verre et céramique, graisses, etc.) ont été projetées à l'horizon 2050 avec des estimations issues de la littérature. Les résultats exploités dérivent de 4 scénarios sur une période d'étude de 2005 à 2050 : un scénario 2°C et un scénario 4°C avec, pour chacun d'entre eux, deux hypothèses de mobilité (haute ou basse selon le recours plus ou moins marqué au transport collectif). Ces scénarios ont été définis dans l'optique d'observer l'impact du profil technologique automobile en réponse à des contraintes énergétiques, de choix futurs de mobilité des individus ou de mesures incitatives sur le marché du lithium. On observe ainsi dans la Figure 16 les différents niveaux de consommation de lithium en fonction des scénarios retenus. Dans cet exercice, on peut ainsi mesurer, à l'horizon 2050, un niveau de criticité en retenant, par exemple, un ratio de consommation rapporté au niveau des ressources données en 2017. Dans un scénario 2°C avec une forte mobilité, ce ratio tombe ainsi à 54 %.

Figure 16 : Consommation globale de lithium en fonction de différents scénarios climatiques (Tous secteurs confondus)

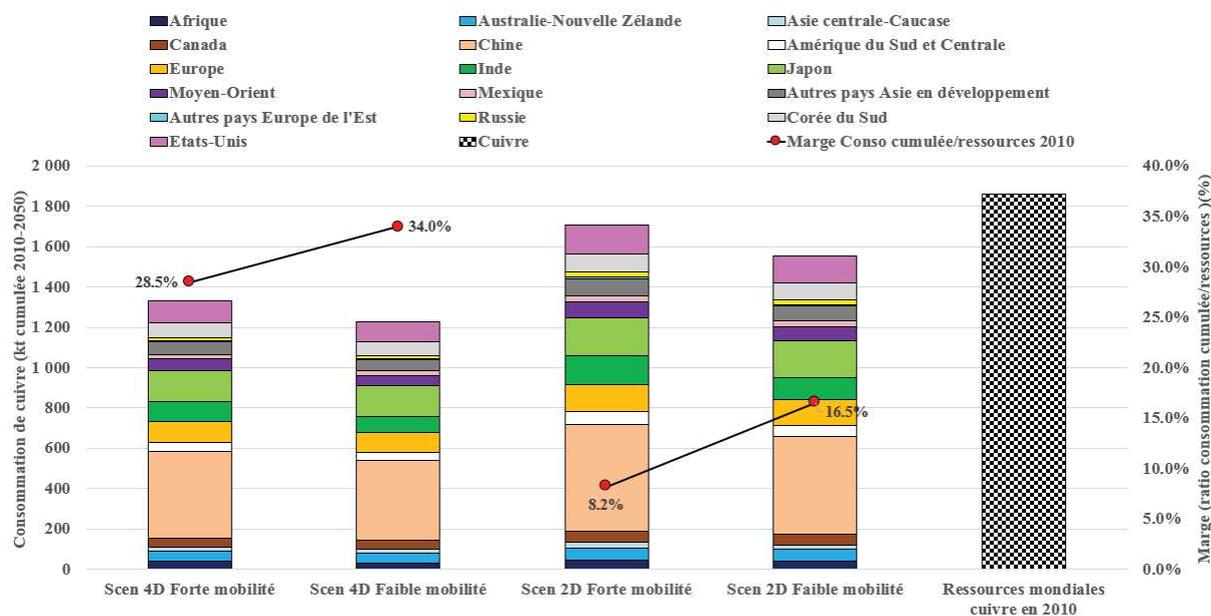


Source : auteurs

L'analyse de la criticité du lithium requiert la combinaison d'analyses aux niveaux régional et international et une approche intégrée multisectorielle. Ce choix permet d'appréhender les facteurs économiques, technologiques et géopolitiques pouvant influencer sur l'évolution du secteur transport au niveau mondial, duquel le marché du lithium est fortement dépendant.

Le second exemple de l'utilisation d'un modèle dynamique pour ce type d'exercice est donné en Figure 17 avec une modélisation réalisée sur le cuivre sur l'ensemble des secteurs (transport, électricité, infrastructure, etc.). Dans cet exercice, les résultats exploités dérivent, comme pour celui du lithium de 4 scénarios sur une période d'étude de 2005 à 2050 : un scénario 2°C et un scénario 4°C avec, pour chacun d'entre eux, deux hypothèses de mobilité (haute ou basse selon le recours plus ou moins marqué au transport collectif).

Figure 17 : Consommation de cuivre en fonction de différents scénarios climatiques (Tous secteurs confondus)



Source : auteurs

Dans cet exercice, on peut ainsi mesurer, à l'horizon 2050, un niveau de criticité en retenant, par exemple, un ratio de consommation rapporté au niveau des ressources données en 2017. Dans un scénario 2°C avec une forte mobilité, ce ratio tombe ainsi, pour le cuivre, à 8,2 %.

À l'issue de cet exercice de modélisation, il est possible de conclure sur le caractère indispensable des politiques publiques accompagnant la transition énergétique mondiale. Les politiques de mobilité douce ou d'implantation massive des transports publics permettent en effet de réduire la criticité des matériaux de la transition énergétique dans les décennies qui viennent.

En outre, ces premières modélisations mettent en exergue le rôle fondamental du recyclage dans le futur. Le recyclage est l'un des principaux leviers de réduction du risque de criticité sur les métaux. Bien que les déterminants du recyclage et son degré de développement puissent varier en intensité selon les métaux, le cuivre illustre des enjeux généralisables à l'ensemble des métaux, son recyclage étant considéré comme mature. L'efficacité du recyclage d'un métal peut se mesurer à l'aide de divers indicateurs. Glöser et al. (2013) discutent la signification de 8 indicateurs de recyclage utilisés communément dans la littérature. Deux d'entre eux sont particulièrement intéressants car ils permettent de rendre compte de deux dimensions du recyclage : l'efficacité du recyclage des produits en fin de vie d'une part et le poids du recyclage dans la production de cuivre d'autre part.

Le premier indicateur est le *End-Of-Life Recycling Rate (EoL RR)* et se calcule en exprimant la part de cuivre contenu dans des produits arrivés en fin de vie qui est collectée, prétraitee et finalement recyclée pour être introduite à nouveau dans le cycle anthropogénique. Le second indicateur est le *Recycling Input Rate (RIR)* qui mesure la part de métal provenant du recyclage dans la totalité du cuivre produit (UNEP, 2013). Ces deux indicateurs considèrent comme recyclé le métal provenant de produits en fin de vie, les chutes de métal générées durant les activités de production, ou « new scrap », étant recyclées dans leur immense majorité à un coût très faible (Bertram et al., 2002).

Au niveau global, une étude estime que le RIR est égal à 35 % sur la période 2000-2010 (Glöser et al., 2013). Ce même indicateur est régionalisé et calculé pour plusieurs zones géographiques, les résultats sont rapportés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Indicateurs de Recycling Input Rates dans différentes régions du monde

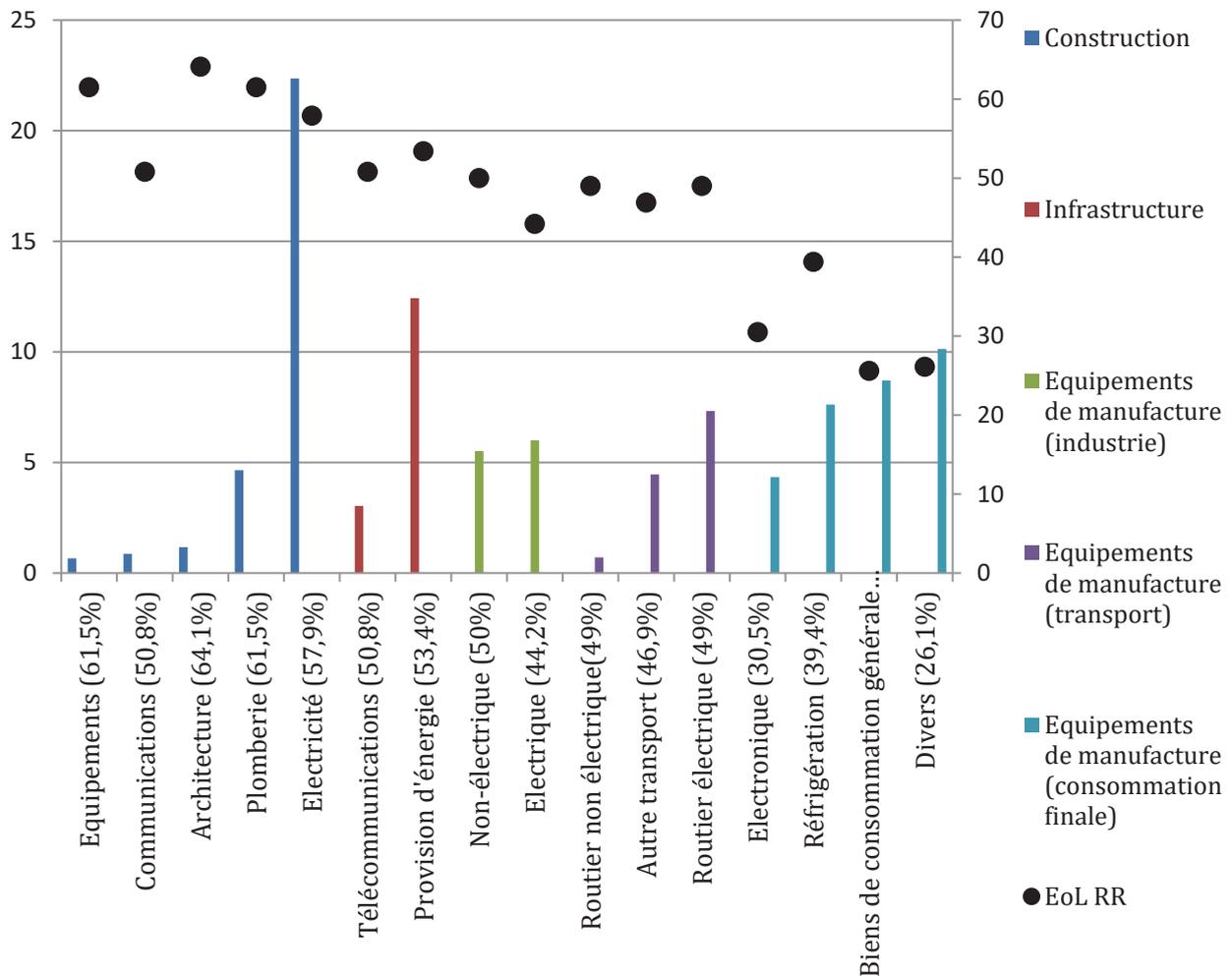
	Asie	Europe	Amérique du Nord	Reste du monde	Monde

RIR (2004)	31 %	42 %	29 %	13 %	33 %
RIR (2012)	31 %	45 %	33 %	14 %	33 %

Source: ICSG, Recyclables Survey, (Mars 2014)

Les différences de performance entre les différentes zones du monde montrent qu'une amélioration significative des pratiques de recyclage est possible au niveau mondial. Parmi les zones géographiques prises en compte, l'Europe est la plus performante et une diffusion internationale de ses pratiques de recyclage permettrait de réduire le rythme d'extraction du cuivre primaire. L'amélioration du recyclage nécessite de renforcer les capacités de la filière vis-à-vis de certains types de produits ; ceci en raison de la très forte hétérogénéité de la performance du recyclage du cuivre selon le produit en fin de vie. Ces différences sont représentées sur la Figure 18, sur laquelle la répartition de la consommation de cuivre en 2015 (selon différents usages) est exprimée sur l'axe des abscisses de gauche. L'indice de EoL RR pour chaque usage est exprimé sur l'axe des abscisses de droite.

Figure 18 : Répartition par usages de la consommation de cuivre en 2015 (axe de gauche) et indices de EoL RR (axe de droite)



Source : ICA ; Glöser et al., 2015

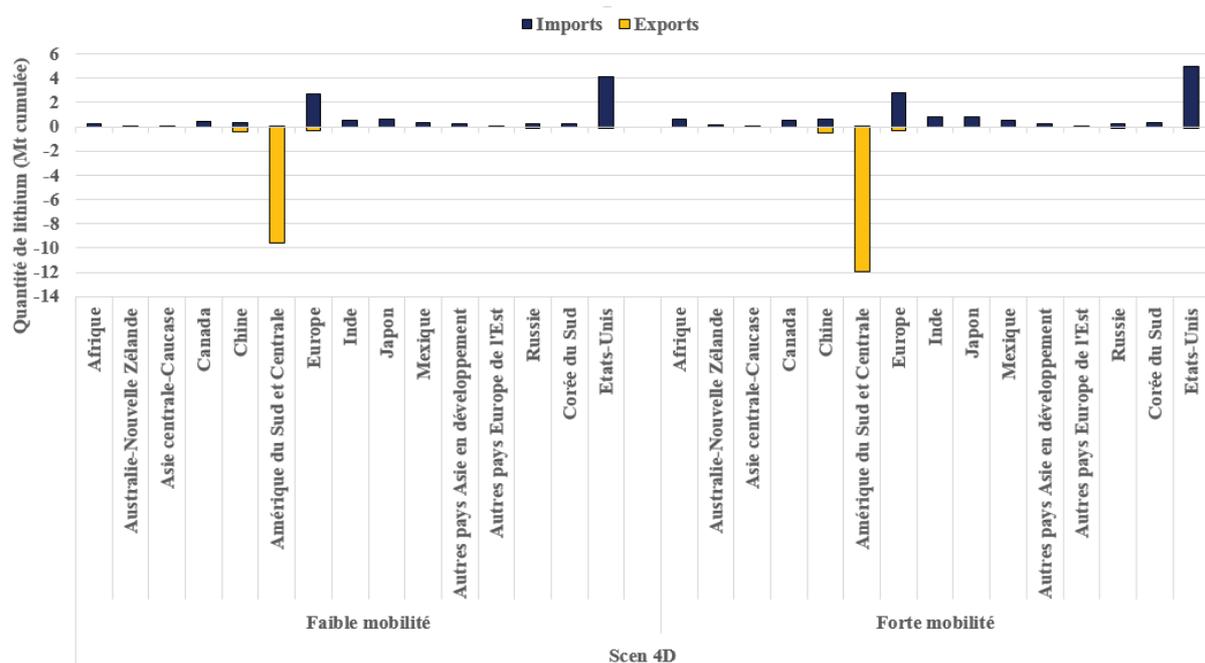
Les indices de *EoL RR* sont également rapportés entre parenthèses et associés aux différentes utilisations du cuivre. Pour illustrer les différences de performance dans le recyclage du cuivre selon les usages, nous pouvons par exemple souligner que 61,5 % du cuivre utilisé dans la plomberie est recyclé et que ce chiffre diminue à seulement 25,6 % pour les biens de consommation courantes. Ces écarts s'expliquent par la variation du coût du recyclage, qui diffère selon les produits. Ces chiffres nous enjoignent à anticiper et à préparer la transformation de la filière du recyclage du cuivre. En effet, les poids des différents usages ont évolué ces dernières années si bien que le secteur des biens de consommation est devenu le premier consommateur de cuivre en 2004, dépassant ainsi le secteur de la construction qui offrait des opportunités de recyclage à moindre coût. La

littérature empirique montre qu'une amélioration du recyclage du cuivre nécessite de se focaliser désormais sur le cuivre provenant de produits plus coûteux à recycler ; soulignant toute l'importance d'intégrer les pratiques de recyclage dès la conception des produits. L'intensité de la production de cuivre provenant du recyclage n'est pas tant sensible au stock de cuivre disponible dans les produits en fin de vie qu'aux flux de produits arrivant en fin de vie (Gomez, 2007). Cela montre que la filière du recyclage effectue un tri des produits arrivant en fin de vie, traite ceux pour lesquels le recyclage est rentable, et rejette les autres. Ainsi, le cuivre qui n'est pas recyclé rapidement après la fin de vie du produit a en fait peu de chances d'être à nouveau utilisé (Gordon et al., 2006 ; Gomez, 2007). Ainsi, bien que l'efficacité du recyclage augmente dans le temps de concert avec l'offre de produits recyclables arrivant en fin de vie, la part du cuivre recyclé permettant d'alimenter la demande croissante a diminué. Elshkaki et al. (2016) estiment ainsi qu'en 1980, 17,5 % de la demande en cuivre pouvait être couverte avec du cuivre recyclé. Cette part tombe à 12,5 % en 2005 avant de remonter à 17,5 % en 2014. Les deux principaux facteurs qui expliquent ce mouvement sont la forte augmentation de la demande et l'immobilisation du cuivre durant des périodes longues pour les produits les plus efficacement recyclés. Car c'est là la principale limite du recyclage du cuivre : il est le plus efficace dans les produits à durée de vie longue, et son utilisation est dispersive dans les produits de vie courte.

Une étude économétrique de Fu et al., (2017) démontre que deux types de déchets de cuivre doivent être distingués. Les déchets de bonne qualité sont recyclés indépendamment du niveau de prix du cuivre tant ils sont rentables à recycler. Les déchets de mauvaise qualité voient leur coût de recyclage être proche du prix de vente du cuivre, qui intervient donc directement dans les arbitrages des acteurs. Pour autant, on ne peut laisser aux mécanismes de prix la responsabilité d'informer la filière du recyclage des transformations qui l'attendent. En effet, l'étude de Slade (1980) sur le recyclage du cuivre montre que l'offre de cuivre secondaire n'est que peu sensible au prix du cuivre, et ne l'est pas plus au prix de l'énergie, pourtant déterminant dans les coûts de production de cuivre primaire. Les politiques de recyclage peuvent donc permettre de réduire les coûts du recyclage en intégrant directement cette pratique dans la conception des produits et en anticipant la croissance des usages les plus dispersifs. Un meilleur recyclage entraînerait alors la réduction des risques de criticité sur les métaux, la baisse des pollutions locales liées à l'extraction des minerais, et présenterait un avantage majeur pour la lutte contre le réchauffement climatique. Le recyclage est en effet nettement plus

économique en termes d'énergie que la production primaire et permet de réduire les émissions de GES de l'industrie minière. Prenant le cas des Etats-Unis comme illustration, Giurco et Petrie (2007) estiment par exemple que la combinaison d'un meilleur recyclage et d'une demande plus modérée pour le cuivre pourrait potentiellement réduire de 60 % l'empreinte écologique de la production de cuivre à horizon 2050.

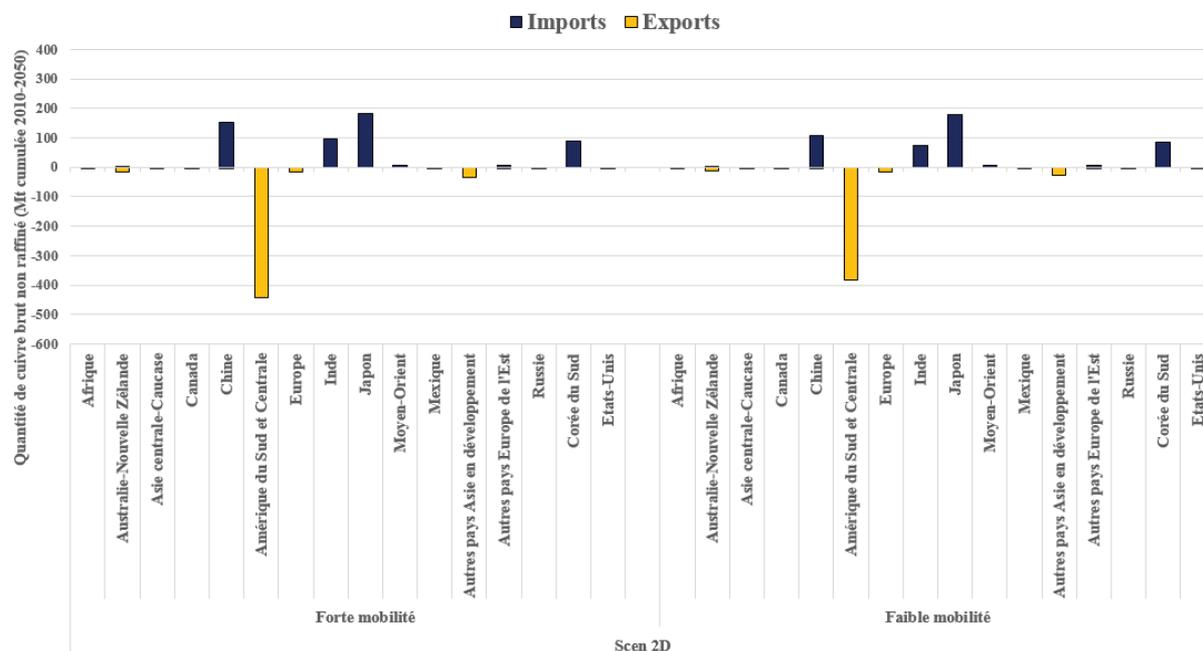
Figure 19 : Principaux pays exportateurs et importateurs de lithium dans différents scénarios climatiques



Source : auteurs

La modélisation prospective permet également d'explicitier les rapports de force géoéconomiques en fonction des scénarios de transition énergétique mondiale, puisqu'il est possible de déterminer les principaux pays exportateurs de matières premières (Figure 20, Figure 21). La modélisation réalisée sur le marché du lithium met ainsi en exergue le rôle prégnant des pays d'Amérique latine et particulièrement ceux du triangle du lithium (Argentine et Chili notamment) et la dépendance de l'Europe et des États-Unis à l'horizon 2050. Pour le marché du cuivre, si l'Amérique latine et plus particulièrement le Chili devraient pouvoir exercer un certain pouvoir de marché, la Chine, l'Inde, le Japon et la Corée du Sud devraient développer des stratégies pour limiter leurs dépendances aux importations.

Figure 20 : Principaux pays exportateurs et importateurs de cuivre dans différents scénarios climatiques



Source : auteurs

Présents dans de nombreuses technologies de décarbonation, les matières premières minérales sont ainsi essentielles à la transition énergétique de manière directe (intégration dans les technologies) ou indirecte (un composant lié mais indépendant de la technologie, comme par exemple les batteries pour les véhicules électriques). Ainsi l'ensemble des innovations de décarbonation est dépendant *in fine* de la disponibilité de minerais devenus « stratégiques » au cours de leur déploiement (Banque mondiale, 2017 ; Grandell et al., 2016 ; Hache, 2018). Si l'on s'appuie généralement sur les exemples du lithium, du cobalt et des terres rares pour illustrer les aspects systémiques de la transition énergétique, il ne faut pas oublier que cette dynamique pourrait, avant tout, engendrer des conséquences majeures sur les grands marchés de métaux non-ferreux (aluminium, cuivre, nickel, etc.), mais également sur le secteur de l'acier, des granulats ou de l'eau. Aujourd'hui le cuivre est utilisé à près de 35 % pour des usages électriques (distribution et transmission) et cette part pourrait enregistrer une accélération avec le déploiement des énergies renouvelables. Une turbine éolienne de 2 MW onshore consomme ainsi, à elle seule, près de 1,55 tonne de cuivre pour sa construction et son raccordement au réseau, et pour cette même éolienne seront nécessaires près de 800 kg d'aluminium et 530 kg de nickel (EcoInvent, 2012). La diffusion à grande échelle des technologies de la

transition énergétique pourrait donc exacerber les tensions sur les marchés de ces métaux. Et ce d'autant plus que les marchés sont de petite taille. En outre, les métaux utilisés dans les innovations de transition énergétique sont pour la plupart des coproduits d'activités minières. La plupart de ces métaux sont dès lors géologiquement et économiquement dépendants d'autres métaux pour leur extraction et leur production⁵⁰. Dans ce contexte, l'élasticité de l'offre au mouvement des prix reste faible, ce qui ne permet pas de diminuer les tensions à court terme. Enfin, la relation même entre production minière et production d'énergie est fondamentale à analyser : près de 10 % de l'énergie primaire mondiale sont consacrés à extraire et raffiner les ressources métalliques (Vidal, 2017) et l'industrie minière représente à elle seule 20 % de toute l'énergie utilisée par le secteur industriel à l'échelle mondiale. Toute hausse de la demande globale de métaux induira ainsi une augmentation de la demande énergétique (Tableau 8). Dans ce contexte, la question même de la soutenabilité des ENR⁵¹ (en matière de consommation énergétique ou de matériaux) se pose. Enfin, la localisation des ressources et les stratégies d'acteurs (structures industrielles, politique d'embargo, etc.) peuvent rendre critique l'utilisation d'une matière première. Le lithium, métal stratégique pour la production de batteries, est assez représentatif des nouveaux enjeux liés à la transition énergétique. Le potentiel d'électrification des véhicules au niveau mondial, la concentration des réserves sur un nombre restreint de pays⁵² et la structure oligopolistique du marché offriront peut-être un nouveau visage de la dépendance des pays aux matériaux de la transition énergétique.

⁵⁰ Étant présents en faible teneur et en petite quantité dans les gisements, il n'est pas économiquement viable de les extraire en tant que produits principaux, mais en tant que coproduits ou sous-produits d'un métal majeur, et parfois même en tant que sous-produits d'un sous-produit. Par exemple, le gallium et le vanadium sont des sous-produits de l'aluminium. Le rhénium est un sous-produit du Molybdène, lui-même coproduit du cuivre.

⁵¹ Des analyses de cycle de vie (ACV) intégrant les coûts directs et indirects du puit à la tombe des ENR sont nécessaires pour évaluer la soutenabilité de chacune des technologies (éoliennes, solaire, solaire PV).

⁵² L'Argentine, la Bolivie et le Chili forment ce que l'on appelle le triangle du lithium.

Tableau 9 : Quantité d'eau et d'énergie utilisée pour l'extraction de minerai ou la réutilisation de déchets de l'industrie minière

	Energie (MJ/kg)		Eau (M ³ /tonne)	
	Scrap	Minerai	Scrap	Minerai
Fer	6	20-100	12-16	50-600
Aluminium	10	238-925	2-10	11-320
Magnesium	10	165-230	2	2-15
Cuivre	14	31-2 040	15	40-200
Zinc	11	32-63	20	75-100
Plomb	9	32-45	40	50-75
Chromium	6	22-51	12	52-92
Nickel	20	130-370	20	60-320
Cobalt	20-140	140-2100	30-100	40-2 000
PGM	1 400-3 400	18 860-254 860	3 000-6 000	100 000-1 200 000
Zirconium	230	1 320-1 500	260	12 600-13 000
Or	140-230	13 300-52 300	30	120 000-420 000
Argent	80-180	480-4 280	20-40	60-200
Etain	15	480-2 180	5	75-130
Terres rares	1 000-5 000	5 500-7 200	250-1 250	1 275-1 800

Source : Sverdrup and Koca, 2016

L'importance de ces métaux pour les technologies de la transition énergétique nous oblige à analyser conjointement la transformation des secteurs de la transition et la raréfaction de ces métaux. Des métaux qui ne trouvaient jusqu'à présent des applications que dans un nombre réduit de secteurs deviendront déterminants pour respecter les engagements de réduction des émissions de GES (e.g. lithium, cobalt, etc.). Dans cette perspective, l'analyse de la criticité ne peut se fonder sur le seul usage des données économiques historiques, mais doit s'inclure dans un travail de prospective où aussi bien les usages que la disponibilité des métaux se co-détermineront mutuellement. Enfin, la question de la criticité reste intrinsèquement liée à celle de la généralisation des technologies bas-carbones et *in fine* à celles de leur conception et de leur mise sur le marché. Il faut dès lors dépasser le cadre des matériaux de la transition énergétique pour analyser la problématique des brevets et de toutes ses composantes : accès à la technologie, transfert, cadre international de négociation, etc. et ainsi déterminer dans quelle mesure le brevet bas-carbone peut constituer une arme géopolitique majeure dans le bouleversement à venir du mix-énergétique mondial.

II. LE BREVET COMME ARME DE LA GÉOPOLITIQUE DES ÉNERGIES RENOUVELABLES

2.1 Transition bas-carbone : l'accès à la technologie l'emportera-t-il sur l'accès aux ressources ?

Si la transition énergétique bas-carbone nécessite un bouleversement des habitudes de consommation et une transformation profonde de l'organisation économique de la production, de la distribution d'énergie et de son mode de consommation, elle demeure conditionnée à un changement radical de la base technologique sur laquelle est fondé le système énergétique. Alors qu'en 2015, 67 % de l'énergie finale consommée dans le monde était d'origine fossile selon l'IEA⁵³ (2018), cette part doit drastiquement diminuer pour limiter le réchauffement de la température moyenne du globe à 2 degrés avec une probabilité de 66-100 % à horizon 2100. Dans ces scénarios les plus ambitieux, les émissions globales du secteur de l'offre de l'énergie doivent être réduites de 90 % ou plus entre 2040 et 2070 par rapport à leurs niveaux de 2010 (IPCC, 2014). Ces chiffres nous rappellent que la lutte contre le réchauffement climatique passe par la diffusion massive des technologies des énergies renouvelables, le reboisement, le boisement et la bioénergie avec capture et stockage du carbone (BECC).

Une transition énergétique dépendante de la technologie

Comme le souligne Criekemans (2018), la transition énergétique des énergies fossiles vers les énergies renouvelables renforce le rôle de la technologie puisque le combustible fossile, dont le coût d'extraction est déterminant, sera amené à être remplacé par des énergies facilement accessibles telles que les énergies solaire, éolienne ou hydraulique et pour lesquelles le principal enjeu réside dans leur conversion en énergie utile (Criekemans dans Scholten et al., 2018). Cette différence entre les deux familles technologiques est illustrée par les travaux menés par l'AIE dans le rapport *Projected Cost of Generating Electricity 2015*. Le coût actualisé de l'électricité⁵⁴ produite à l'aide d'une centrale à cycle combiné utilisant du gaz naturel comme source d'énergie primaire augmente d'environ 35 % quand le coût du combustible augmente de 50 %. Les coûts actualisés de l'électricité produite avec des installations solaires ou éoliennes, eux, ne

⁵³ Données accessibles <https://www.iea.org/classicstats/>

⁵⁴ Calculs effectués en retenant un taux d'actualisation de 7 %.

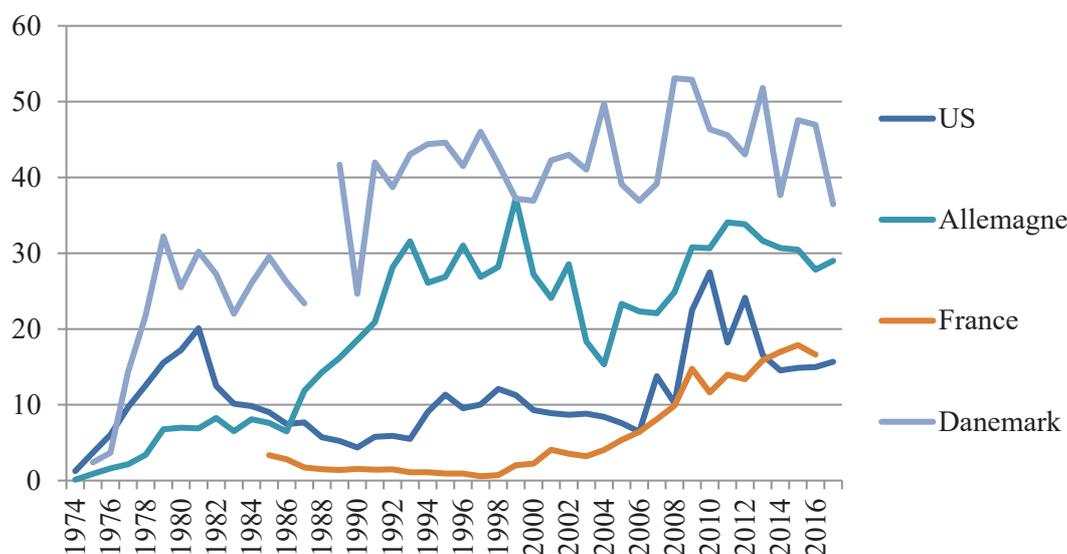
dépendent que du coût de l'installation, de sa durée de vie, de la qualité du gisement et de l'efficacité de sa conversion en électricité ; ces deux derniers déterminants étant synthétisés par le facteur de capacité.⁵⁵ L'enjeu n'est donc plus tant l'accès aux ressources énergétiques que de réussir à les convertir à un coût compétitif en énergie exploitable par l'humain, et ce grâce à la technologie. C'est cette différence qui conduit Criekemans (2018) à considérer la transition vers les énergies renouvelables comme une révolution technologique. Ce caractère technologique de la transition bas-carbone place au cœur de la lutte contre le réchauffement climatique les politiques de Recherche & Développement, qui se situent en amont du phénomène d'innovation, et les droits de propriété intellectuelle puisque ces derniers constituent le cadre institutionnel qui détermine les incitations qu'ont les acteurs à innover et la facilité d'accès aux nouvelles technologies. Nous détaillons ici les dynamiques des dépenses de R&D avant d'analyser plus en détail les enjeux propres aux droits de propriété intellectuelle dans la section suivante.

La Figure 20 représente l'évolution de la part des dépenses de R&D (Recherche & Développement) allouées aux énergies renouvelables dans la totalité des dépenses de R&D destinées au secteur de l'énergie⁵⁶ pour quatre pays choisis pour leurs performances en termes d'innovation et pour la qualité des données disponibles, que de nombreux pays ne communiquent pas en raison de leur caractère stratégique et de leur difficulté de collecte.

⁵⁵ Il convient de noter que l'utilisation du coût actualisé de l'électricité comme métrique ne permet pas de prendre en compte le coût de l'intermittence de certaines énergies renouvelables qui nécessite d'être compensée.

⁵⁶ Les données représentées sur le graphique proviennent de la base de données de l'AIE 'Detailed Country RD&D Budgets'. Le secteur de l'énergie, pris au sens large, comprend sept groupes technologiques : l'efficacité énergétique, les combustibles fossiles, les sources d'énergies renouvelables, l'énergie nucléaire, l'hydrogène et les piles à combustibles, la conversion, la transmission et le stockage d'énergie et les technologies transversales (l'analyse des systèmes énergétiques et la recherche fondamentale non allouable aux autres champs technologiques). Au sein du groupe des ENR se trouvent l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie de l'océan, les biocarburants, l'énergie géothermale et l'énergie hydraulique.

Figure 21: Évolutions de la part des dépenses de R&D dans le secteur de l'énergie pour les ENR (en %)



Source : AIE⁵⁷

Avant que le réchauffement climatique ne constitue une préoccupation sérieuse aux yeux des gouvernements, le premier choc pétrolier a été un élément déclencheur du soutien à l'innovation dans les technologies ENR dans plusieurs pays : c'est le cas notamment aux États-Unis comme en témoigne la hausse de la part des dépenses allouées aux ENR qui débute à partir de 1974 avant de diminuer après 1981. Le Canada, absent du graphique pour en préserver la lisibilité, a suivi une trajectoire très similaire en soutenant massivement l'innovation dans les ENR en réaction au premier choc pétrolier. Cette réaction n'aura été que de courte durée : la part de dépenses de R&D destinées aux ENR passera de 17,4 % en 1981 à 4 % en 1986, avant de recommencer à croître à la fin des années 1990. L'accident de Tchernobyl a également agi comme catalyseur en réorientant la stratégie de R&D en Allemagne et au Danemark comme en témoigne l'augmentation de la part des dépenses allouées aux ENR. Ce changement de stratégie de l'Allemagne en réaction à l'accident de Tchernobyl est également observé par Bointner (2014). D'autres pays, à l'image de la France, ont réorienté plus tardivement leurs dépenses de R&D vers les ENR. C'est également le cas du Royaume-Uni où cette part est passée de 9 % en 2000 à 15,9 % en 2016.

⁵⁷ Les données sont accessibles en suivant le lien: <https://www.iea.org/statistics/RDDonlinedataservice/>

L'innovation bas-carbone comme manifestation des stratégies étatiques

Considérée désormais comme une branche de l'analyse des relations internationales, la géoéconomie trouve son origine dans l'ouvrage d'Edward Luttwak *From Geopolitics to Geo-Economics. Logics of Conflict, Grammar of Commerce* (1990). Dans cet ouvrage controversé, l'auteur défendait la thèse selon laquelle, à l'issue de la guerre froide, l'arme économique remplacerait l'arme militaire et les stratégies des États pour étendre et renforcer leur pouvoir se traduiraient dans les termes du commerce international. Plus particulièrement, Luttwak considérait que l'arme de prédilection de la géoéconomie est la supériorité technologique que les États peuvent acquérir en octroyant des financements à la R&D. Comme le souligne Lorot (2008), si la géoéconomie souffre de plusieurs limites méthodologiques⁵⁸, elle permet de rendre compte du rôle pris par les forces économiques dans la géopolitique mondiale. Il s'agit toutefois d'éviter les écueils d'une réduction des dynamiques géopolitiques aux seules politiques économiques des États.

La production de l'innovation bas-carbone est un phénomène qui se situe à l'intersection du changement technique et de la production d'énergie. Pour cette raison, elle est très largement influencée par les stratégies étatiques. En effet, malgré la vague de libéralisation amorcée durant la période Thatcher-Reagan au cours des années 1980, les secteurs de l'énergie sont restés fortement liés aux pouvoirs publics (Pollitt, 2012). Sur la base des questionnaires soumis par l'OCDE aux gouvernements⁵⁹, nous pouvons observer qu'en 2013, 38 pays sur les 46 interrogés affirmaient que la plus grande firme du secteur national de la production d'électricité était en partie détenue par les pouvoirs publics. Dans 92 % des cas, les pouvoirs publics détenaient plus de 50 % de la firme en question, dans 42 % des cas la firme était détenue intégralement par les pouvoirs publics. Plus généralement, les transformations technologiques majeures sont directement liées à la recherche fondamentale et aux financements publics. Les travaux de Mazzucato ont ainsi

⁵⁸ Dans son ouvrage, Luttwak adopte une position tranchée sur la géoéconomie. Il considère par exemple que « quand l'État intervient [...] ce n'est plus de l'économie « pur sucre » mais de la géoéconomie » Luttwak, 1990, p. 34). À ceci s'ajoute l'analogie sans cesse renouvelée dans ces écrits entre la guerre et l'économie. Cela a concouru à ce que la géoéconomie soit considérée comme une version simplifiée de la doctrine du réalisme dans les relations internationales. Pour une discussion sur les critiques et les points forts de la géoéconomie, voir Vihma, 2018.

⁵⁹ Voir Koske et al., (2015). Les bases de données sur les réponses aux questionnaires de l'enquête sont librement accessibles : <http://www.oecd.org/eco/growth/indicatorsofproductmarketregulationhomepage.htm>.

montré toute l'importance de l'État dans les dynamiques d'innovation et son impact sur le long terme (Mazzucato, 2013). Finalement, l'innovation dans les technologies bas-carbone est, en comparaison des autres secteurs, davantage liée à l'intervention publique dans la mesure où il n'existe pas de signal prix suffisamment puissant dans l'économie pour que les projets d'innovation privés soient guidés par les logiques de marché. En Europe, la mise en place du marché d'échanges des quotas d'émissions avait visé à faire émerger un signal prix suffisamment fort pour stimuler l'innovation bas-carbone. Son impact sur l'innovation aura pourtant été relativement faible (Calel et Dechezleprêtre, 2015). Le soutien public à l'innovation dans les technologies bas-carbone est donc déterminant et se fait en combinant des approches de soutien par la demande (e.g. les tarifs de rachat de l'électricité d'origine renouvelable) et par l'offre (e.g. les pôles de compétitivité ou les subventions à la R&D). L'aide apportée par ces instruments économiques varie fortement en intensité selon le type de technologie soutenue. Ainsi, l'histoire du soutien à l'innovation dans les ENR démontre que les États ne sont pas neutres technologiquement.

Pour ces trois raisons : (1) le poids de l'État dans les secteurs de l'énergie, (2) le rôle déterminant des pouvoirs publics dans le financement de l'innovation et (3) l'absence de neutralité technologique dans les aides apportées aux technologies bas-carbone, l'innovation bas-carbone constitue une manifestation des stratégies géoéconomiques mises en place par les États. Dans la section 3 de cet article, nous mènerons une analyse empirique de ces stratégies en utilisant les données de brevets déposés dans les technologies des énergies renouvelables.

2.2 La propriété intellectuelle au cœur de la géopolitique des énergies renouvelables

La dimension géopolitique du brevet

La notion de propriété intellectuelle renvoie d'une part à la propriété littéraire ou artistique et d'autre part à la propriété industrielle. C'est cette dernière qui encadre les découvertes réalisées dans les secteurs des ENR. La propriété industrielle est un cadre juridique qui confère un monopole temporaire d'exploitation d'une invention, un modèle ou une marque. Son principe suit la logique d'arbitrage suivant : le droit de monopole temporaire permet à l'inventeur de bénéficier d'une position dominante et ainsi de

dégager une rente économique en pouvant fixer des prix plus hauts qu'en situation de concurrence. En contrepartie, le droit de propriété n'est concédé qu'à condition que l'invention soit décrite avec suffisamment de détails pour que la connaissance nouvelle qu'elle contient soit accessible à l'ensemble de la société.

Parce que les règles de la propriété industrielle sont mises en pratique par des offices de propriété intellectuelle aussi bien nationaux que régionaux et mondiaux, et que ces règles ont initialement été définies par des gouvernements locaux avant qu'une convergence des systèmes ne s'amorce durant la seconde moitié du XIX^e siècle, les enjeux de propriété intellectuelle ont depuis toujours une dimension géopolitique. La première forme de brevet voit le jour dans la république maritime de Venise et la première loi concernant les brevets est votée en 1474 (Lapointe, 2000). Le brevet est alors vu comme un moyen d'encourager l'innovation, certes, mais également comme un instrument protectionniste visant à inciter les inventeurs à développer leurs activités dans les frontières de la république. Dans le reste de l'Europe, des systèmes similaires voient le jour avec pour objectif d'attirer les inventeurs et de localiser dans le pays la production des nouvelles technologies. Plusieurs exemples historiques illustrent cette dimension géopolitique de la propriété industrielle. Les États-Unis ont par exemple refusé, au XIX^e siècle, de reconnaître les brevets européens avant qu'ils ne puissent rivaliser sur le plan technologique (Dulong de Rosnay et Le Crosnier, 2013). Le Japon a instauré en 1885 sa première loi sur les brevets qui, dans sa forme initiale, excluait les inventeurs étrangers (Galvez-Behar, 2016).

C'est en 1883 qu'une régulation internationale émerge avec la convention dite d'Union de Paris sur les brevets. Elle coïncide avec une forte accélération de l'implémentation de législation sur les brevets. Comme le souligne Galvez-Behar (2016), la moitié des pays ayant une loi sur les brevets en 1901 l'ont mise en place entre 1880 et 1900. Cette tendance s'explique notamment par la diffusion de ces législations par les puissances coloniales au sein de leurs empires. Le traité de l'Union de Paris est initialement signé par onze pays⁶⁰ qui s'engagent d'une part à renforcer leurs systèmes de propriété industrielle et d'autre part à harmoniser leurs normes nationales. Le second aspect est décisif

⁶⁰ Ces pays sont la Belgique, le Brésil, l'Espagne, la France, le Guatemala, l'Italie, les Pays-Bas, le Portugal, le Salvador, la Serbie et la Suisse.

puisqu'il institue le droit de priorité qui garantit à tout inventeur déposant un brevet dans l'un des pays signataires de disposer d'un délai de douze mois pour entreprendre les démarches nécessaires à l'obtention d'une protection dans n'importe lequel des autres pays de l'Union de Paris. Ainsi les inventeurs n'ont pas besoin de déposer simultanément leurs demandes dans tous les pays puisqu'ils sont assurés qu'aucun autre individu ne pourra déposer une demande dans ces pays pour la même invention durant le délai concédé. En septembre 2014, les pays signataires de la convention étaient au nombre de 174. Durant le XX^e siècle, l'internationalisation et l'harmonisation des règles de propriété intellectuelle ira croissante avec la mise en place d'une classification internationale des brevets (1954), la création de l'Organisation européenne des Brevets (1973), la signature du traité de l'Union internationale de coopération en matière des brevets (1970) ou encore l'entrée en vigueur de l'Accord sur les aspects des droits de propriété intellectuelle touchant au commerce (1995).

L'évolution des systèmes de propriété intellectuelle correspond donc à un renversement de la logique des stratégies des gouvernements. Initialement, la dimension géopolitique de la propriété intellectuelle se manifestait dans l'hétérogénéité des systèmes en vigueur dans les pays ; ces systèmes pouvaient ainsi être conçus comme des instruments protectionnistes. L'internationalisation et l'homogénéisation des règles de propriété intellectuelle ont concouru à ce que les pays acceptent de jouer selon des règles plus semblables, et que l'accumulation de brevets à forte valeur économique et/ou technologique devienne le nouveau vecteur de puissance politique et économique (sur ce point, voir l'exemple du système chinois détaillé dans l'encadré 1).

Encadré 1 : Le système chinois de propriété intellectuelle et l'envolée des brevets chinois

La première loi sur la propriété intellectuelle voit le jour en République populaire de Chine en 1984 dans le cadre de la deuxième vague de réformes économiques amorcée par Deng Xiaoping en 1978. Dès son entrée en vigueur, le système chinois s'inscrit dans la dynamique internationale en rejoignant les pays de la convention de Paris sur la propriété industrielle. La protection que confèrent les brevets chinois est renforcée en 1992 avec l'extension de 15 à 20 ans de la période de validité du brevet. La Chine rejoint en 1994 le traité de l'Union internationale de coopération en matière de brevets. Le système chinois

est ensuite réformé en 2000 en prévision de l'entrée de la Chine dans l'Organisation mondiale du commerce (OMC). Celle-ci sera d'ailleurs conditionnée à l'adoption en 2001 par la Chine de l'Accord sur les aspects des droits de propriété intellectuelle qui touchent au commerce (Yueh, 2009). La dernière réforme du système a eu lieu en 2008, année durant laquelle le gouvernement chinois lancera la « stratégie nationale sur la propriété intellectuelle » visant à réduire les coûts bureaucratiques, à accroître la transparence du système de brevet et à accroître les incitations à la R&D en Chine (Thoma, 2013). Au fil de ces réformes, le degré de protection du système de brevet chinois a fortement augmenté. Park propose un indice synthétisant 5 dimensions du système de brevet pour mesurer le degré de protection qu'il confère. Il conclut que cet indice a presque doublé en Chine durant la période 1995-2005 (Park, 2008). En 2005, l'indice de protection est égal à 4,08 en Chine et le rapproche ainsi des systèmes de brevets les plus protecteurs (en 2005 l'indice est de 4,67 au Japon, 4,88 aux US, 4,54 au Royaume-Uni, 4,5 en Allemagne et 4,67 en France).

Parallèlement au renforcement de son système de propriété intellectuelle, le nombre de brevets chinois a considérablement augmenté ces dernières décennies. Le taux annuel de croissance des demandes de brevets en Chine par des inventeurs résidents entre 1985 et 2012 a été de 20 %, contre 5,5 % aux États-Unis (Hu et al., 2017). En 2011, la Chine est devenue le pays au monde qui enregistre le plus fort nombre de demandes de brevets de la part de ses résidents. Cette augmentation est en partie due aux programmes régionaux de subventions aux brevets, qui voient le jour en Chine à la fin des années 1990 en vue de préparer les entreprises nationales à l'entrée de la Chine dans l'OMC. La pratique se diffusera dans l'ensemble du pays si bien qu'en 2007, 29 des 30 régions chinoises avaient mis en place un programme de subvention aux brevets⁶¹. La hausse des demandes de brevets chinois a été analysée par Hu et al. (2017), qui observent qu'environ deux tiers de l'augmentation observée entre 2007 et 2011 est imputable aux demandes formulées par des entreprises qui ne brevetaient que très peu auparavant. Cette hausse reflète ainsi un affaiblissement de la relation entre les demandes de brevets et les dépenses de R&D. De fait, elle a été fortement impactée par les programmes de subventions régionaux qui réduisent le coût des activités de R&D et rendent donc plus profitables l'acquisition de brevets (Hu et al., 2017). Ces programmes dédiés à accroître l'innovation dite « indigène »

⁶¹ Les programmes régionaux se distinguent par leurs spécificités en termes de niveau de subventions, du timing de versement des subventions, des conditions de remboursement, etc.

de la part des firmes domestiques ont créé des effets d'aubaines, ce qui peut expliquer que les brevets délivrés par l'office de brevet chinois, le SIPO, aux inventeurs chinois ont une valeur en moyenne plus faible que ceux délivrés à des inventeurs étrangers (Gupeng et Xiangdong, 2012). Il en résulte que le compte du nombre de brevets chinois est considérablement biaisé par l'existence des programmes de subventions (Dang et Motohashi, 2015).

Ces tensions sont particulièrement fortes quand la question de l'accès des pays en développement aux technologies clés, portant par exemple sur la santé, se pose. L'évaluation de l'impact de la propriété intellectuelle sur le développement a été l'objet d'une commission dirigée par le Professeur John Barton et mise en place à la demande de la Grande-Bretagne en 2001 sous l'égide du secrétaire d'Etat au Développement International. La commission a conclu à propos des droits de propriété industrielle que « le fait de les considérer comme des « droits » ne devrait pas occulter les réels dilemmes de leur application dans les pays en développement, là où les coûts supplémentaires qu'ils engendrent mobilisent certains fonds au détriment du financement des éléments essentiels à la vie des populations pauvres » (rapporté dans Dulong de Rosnay et Le Crosnier, 2013). Un épisode révélateur des enjeux géopolitiques liés aux règles de propriété industrielle est celui de la réunion des membres de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) qui a suivi en 2012 la parution d'un rapport de l'organisation proposant des pistes de réflexion sur la définition d'un programme commun de R&D portant sur les maladies dites négligées. Le constat de l'organisation était le suivant : les projets de recherche menés par les grands groupes pharmaceutiques, guidés par la recherche de profit, cherchent à répondre à des besoins identifiés dans les pays occidentaux où la propension à payer sera plus forte. D'autres maladies, qui concernent une partie importante de la population située dans des pays plus pauvres, ne font pas l'objet de recherches poussées et sont donc négligées⁶². Pour répondre à ce besoin, le rapport de l'OMS préconisait la création d'une convention globale de R&D sur les maladies négligées. De nombreux contentieux ont émergé durant les négociations et le projet de convention globale a été abandonné, malgré l'enthousiasme des pays touchés par les maladies négligées. Les délégations de l'Union européenne et des États-Unis ont été les plus

⁶² D'après l'OMS, plus de 70 % des pays et territoires dans lesquels sévissent des maladies tropicales négligées ont des revenus faibles ou intermédiaires (<http://www.who.int/features/qa/58/fr/>).

récalcitrantes à l'idée d'une convention globale⁶³. Si la délégation états-unienne a refusé de s'exprimer officiellement sur son refus, différentes sources ont confirmé que leur principale crainte était que la convention ne favorise le transfert de technologie et l'accès aux médicaments. Il existe en l'occurrence un parallèle entre les enjeux sanitaires et climatiques puisque les questions de propriété intellectuelle et de transferts de technologies ont également constitué des barrières dans la négociation climatique.

Négociations climatiques et propriété intellectuelle

La propriété intellectuelle sur les inventions bas-carbone est un enjeu pour les négociations climatiques puisque celles-ci portent, entre autres, sur les questions de transfert de technologies⁶⁴. Depuis l'adoption en 1992 de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et son entrée en vigueur en 1994, « les pays développés Parties et autres Parties développées figurant à l'annexe II prennent toutes les mesures possibles en vue d'encourager, de faciliter et de financer, selon les besoins, le transfert ou l'accès de technologies et de savoir-faire écologiquement rationnels aux autres Parties, et plus particulièrement à celles d'entre elles qui sont des pays en développement » (Article 4, paragraphe 5 de la CCNUCC, 1992). La technologie est donc perçue dans un premier temps comme un facteur d'inégalité entre les pays développés et les pays en développement qui nécessite d'être corrigée par le transfert et le financement des technologies bas-carbone dans les pays en développement. À partir de la première Conférence des Parties (COP) en 1995 à Berlin, le développement et le transfert des technologies bas-carbone ont fait l'objet de négociations poussées à chaque session. Ces négociations ont traversé plusieurs phases successives.

De la première COP tenue à Berlin en 1995 à la COP 4, les parties s'en tenaient à évaluer annuellement les engagements pris dans l'article 4 de la CCNUCC (inventaire des projets, construction de réseaux, définition des technologies). Lors de la COP 4 à Buenos Aires, la décision est prise d'amorcer un processus de consultation préparant à l'adoption un accord-cadre sur le transfert de technologies. Ces consultations menées notamment avec

⁶³<http://www.ip-watch.org/2012/11/29/who-members-agree-on-strategic-work-plan-on-health-rd-but-no-convention/>

⁶⁴ Les Nations unies retiennent une définition large de la technologie en la considérant comme une partie d'un équipement, une technique, une connaissance pratique ou une compétence pour réaliser une activité particulière.

les pays en développement dureront jusqu'en 2001. La troisième phase débute avec l'adoption et l'implémentation lors de la COP 7 de Marrakech en 2001 du cadre relatif au transfert de technologie (*Technology Transfer Framework*). Ce dernier entérine cinq pratiques : (1) la publication de rapports visant à identifier et à évaluer les besoins technologiques permettant la réduction des émissions de GES ; (2) la création et la maintenance d'une plateforme facilitant la circulation de l'information sur la mise en place du *Technology Transfer Framework* ; (3) la facilitation du transfert de technologies *via* la coordination des politiques publiques, la suppression des barrières techniques, légales et administratives, ou encore la création d'un environnement propice à la coopération des secteurs privés et publics ; (4) le renforcement des compétences liées au transfert de technologie ; et (5) la création de mécanismes de transfert technologique qui confie au Groupe d'experts sur le transfert de technologie (GETT) la responsabilité de faciliter la mise en place de l'accord. Durant la COP 13 qui a lieu à Bali en 2007, les parties s'entendent pour renforcer le cadre sur le transfert de technologies et ajoutent aux thèmes d'étude du GETT le financement de l'innovation, le renforcement de la coopération internationale, les développements de l'innovation endogène et de projets collaboratifs de R&D. Une étape supplémentaire est franchie avec la création en 2010 à la COP 16 de Cancún du *Technology mechanism* qui met fin au mandat du GETT et confie à deux entités, le Comité exécutif sur la technologie (CET) et le Centre et réseau des technologies climatiques (CRTC), les missions d'évaluation des besoins technologiques des pays, de formulation de recommandations de politiques publiques et la création et l'élargissement d'un réseau d'acteurs des technologies bas-carbone. Ces deux entités sont toutefois dotées d'un pouvoir limité. Le CET est composé d'une vingtaine d'experts et sa principale activité est de formuler des propositions aux États lors de chaque nouvelle COP visant à accélérer le transfert de technologies. Le CRTC quant à lui dispose d'une capacité limitée avec un budget de 14 millions de dollars en 2015 (Glachant et Dechezleprêtre, 2017). Après avoir été implémenté, le « Technology mechanism » sera renforcé lors de la COP 21 à Paris. Bien que l'Accord de Paris soit souvent présenté comme un succès et une avancée majeure dans les négociations internationales sur le climat, la position reste la même vis-à-vis du transfert de technologies. Les parties s'en tiennent à réaffirmer leur partage d'une « vision à long terme de l'importance qu'il y a à donner pleinement effet à la mise au point et au transfert de technologies » (Article 10 de l'Accord de Paris).

Le transfert d'une technologie peut avoir lieu de différentes manières et potentiellement s'effectuer hors du cadre des négociations internationales sur le climat. Le premier mode de transfert est de fournir des biens incorporant la technologie en question. Le second est d'accorder une licence d'exploitation d'un ou plusieurs brevets pour permettre à une firme étrangère d'exploiter la technologie protégée. Finalement, le transfert de technologie dans sa version la plus volontariste consiste à renforcer les capacités de recherche et de production des firmes du pays demandeur qui souhaitent produire ou utiliser la technologie (Barton, 2007).

Quel que soit le mode de transfert, celui-ci est lié à la propriété intellectuelle ; et si les États réaffirment à chaque COP leur volonté de promouvoir le transfert de technologies bas-carbone, la propriété intellectuelle reste un point majeur de désaccord. Ockwell et al. (2010) expliquent l'opposition entre pays développés et pays en voie de développement dans les négociations climatiques par un désaccord à propos de l'impact de la propriété intellectuelle sur le transfert de technologie (Ockwell et al., 2010). Pour les pays développés, les règles de propriété intellectuelle permettent aux firmes de sécuriser leurs investissements et donc de déployer leurs activités dans les pays en développement. Dans cette logique, l'absence de règles de propriété intellectuelle ou leur laxisme deviennent le principal frein au transfert de technologie. Les firmes innovantes, craignant de n'être que trop peu protégées par les règles de propriété intellectuelle, préféreront maintenir le secret industriel sur leurs innovations voire refuser de vendre leurs produits à certains pays pour s'assurer que leur technologie ne sera pas copiée. Le pouvoir de marché que confère un brevet permet à une firme de fixer des prix trop élevés pour que des acteurs issus de pays en voie de développement puissent l'acquérir, les empêchant ainsi également de l'améliorer. L'existence de brevets rend également l'imitation, même partielle, plus difficile. Or, l'imitation constitue également un vecteur puissant d'apprentissage, d'amélioration et donc de progrès technique.

Cette grille de lecture pointe l'ambiguïté des effets de la propriété intellectuelle sur le transfert de technologies. Elle interroge également sur les réelles motivations des Etats qui se font les défenseurs d'une propriété intellectuelle forte. En effet, ces derniers disposent généralement d'importants actifs technologiques dont la valeur de marché

dépend des règles de la propriété intellectuelle. Plus elles sont fortes, plus la rente d'innovation résultant de la détention d'un brevet sera grande.

L'opposition entre ces deux discours sur la propriété intellectuelle s'inscrit dans la continuité des négociations internationales qui, en raison de l'inertie du processus, continuent d'opérer une distinction stricte entre pays développés et pays en développement. Pourtant, alors que de nombreux pays développés ont tardé à investir dans le renforcement de leur capacité d'innovation dans les technologies bas-carbone, plusieurs pays en développement se positionnent désormais parmi les leaders de certaines de ces technologies. Il semble donc que l'absence de mécanisme international ambitieux de transfert de technologie n'ait pas empêché que s'amorce une course à l'innovation bas-carbone. Celle-ci est déterminante car la réussite de la négociation climatique est intrinsèquement liée à l'accumulation de brevets bas-carbone par les parties prenantes, comme nous le montrons dans la sous-section suivante.

Une géopolitique propre aux brevets bas-carbone

Les technologies ENR se distinguent des technologies conventionnelles par le fait que leur valeur économique est déterminée par les politiques climatiques. L'innovation dans les technologies de la communication mobile, par exemple, a été stimulée par l'existence d'une demande en forte hausse. Les technologies ENR, au contraire, font face à une demande déterminée par l'intensité des politiques climatiques mises en place par la communauté internationale. Ainsi la valorisation économique d'un brevet déposé dans une technologie ENR dépendra aussi bien de la politique implémentée à l'échelle nationale que de celles mises en place par les autres pays. Ce caractère « politique » de la valeur économique d'une innovation bas-carbone crée une forme d'endogénéité entre l'innovation bas-carbone et les accords climatiques adoptés à l'échelle internationale. La propension d'un pays à ratifier un accord international ambitieux portant sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre est d'autant plus forte que celui-ci dispose d'actifs technologiques importants dans les secteurs de la transition bas-carbone. De même, l'incitation à investir dans des projets de R&D en vue d'acquérir de tels actifs est directement liée aux bénéfices qu'en attendent les acteurs économiques, et donc à l'existence de politiques climatiques ambitieuses et les plus largement adoptées par les

pays émetteurs. Pour cette raison, l'innovation bas-carbone et l'adoption d'accords climatiques internationaux sont intrinsèquement liées.

Les technologies bas-carbone sont également l'objet d'une intense compétition géoéconomique entre États. L'innovation et sa protection se révèlent être des éléments essentiels de la sécurité et plus généralement de la souveraineté nationale. Cette dimension prend une ampleur particulière dans un contexte énergétique où l'accès à la technologie remplace l'accès aux ressources. Les dispositifs de protection contre les investissements étrangers se multiplient ainsi ces dernières années, en particulier dans les économies les plus développées, où la crainte de perdre un avantage technologique, face à la Chine notamment, mobilise les autorités. Les domaines des technologies bas-carbone sont désormais quasi systématiquement inclus dans les domaines soumis au contrôle des investissements étrangers, quelle que soit la nature du dispositif mis en place (interdiction totale, contrôle *a priori*, contrôle *a posteriori*...).

Nous avons démontré que la propriété intellectuelle, à la fois dans le champ des négociations climatiques et dans la compétition internationale autour des technologies bas-carbone, forme un élément essentiel de compréhension de la géopolitique des ENR. La prochaine sous-section vise à conduire une analyse empirique des données de brevets en vue d'évaluer les avantages technologiques accumulés par les pays dans le champ des technologies bas-carbone.

2.3 Quelle géopolitique des énergies renouvelables ? Une scénarisation sur la base des avantages technologiques nationaux

L'accélération de l'innovation dans les technologies des ENR : une dynamique globale

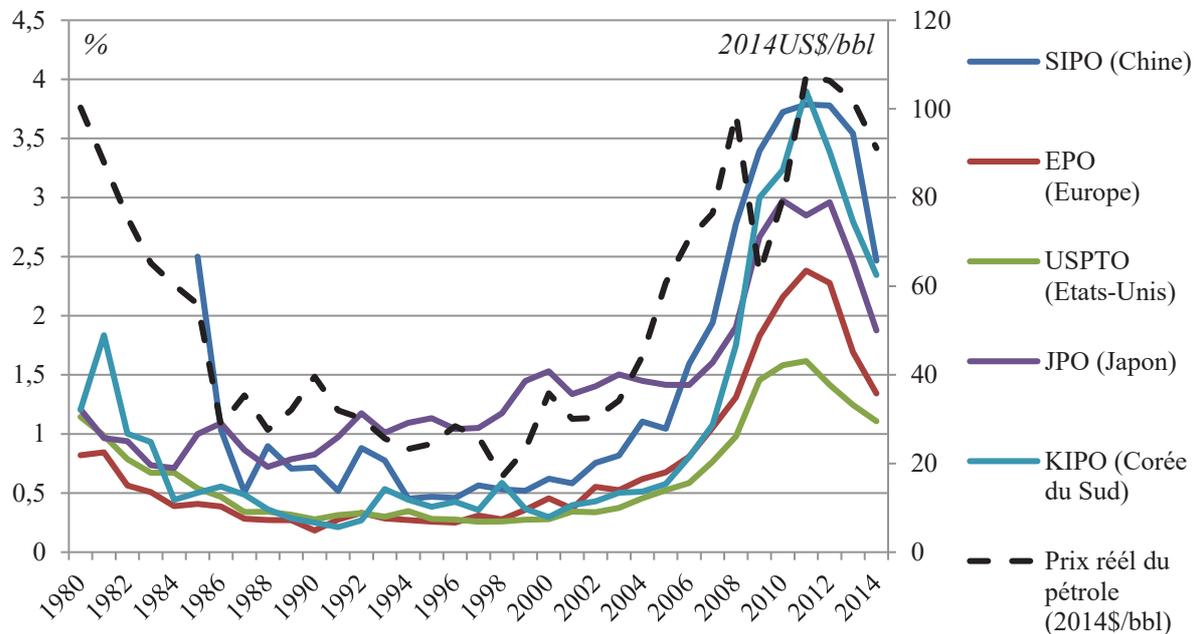
L'innovation dans les technologies ENR est devenue un enjeu global durant ces dernières décennies. Aucune zone géographique ne semble avoir échappé à l'accélération de l'acquisition de droits de propriété intellectuelle sur des nouvelles technologies dans les secteurs des ENR, ce qui traduit l'anticipation par les différents acteurs du fait que ces technologies sont ou deviendront des actifs clés. L'analyse des données d'acquisitions de brevets auprès des cinq plus grands offices de propriété intellectuelle dans le monde - notamment l'United States Patent and Trademark Office (Etats-Unis), l'European Patent Office (Europe), le State Intellectual Property Office (Chine), le Japan Patent Office (Japon)

et le Korean Intellectual Property Office (Corée du Sud) - permet de rendre compte des tendances mondiales. La Figure 21 représente l'évolution de la part des brevets ENR dans la totalité des brevets délivrés par les cinq offices. Les brevets ne sont pas classés par leur année de délivrance, mais selon l'année pendant laquelle la demande de brevet a été adressée à l'office⁶⁵. Les brevets que nous considérons protéger des inventions dans les technologies ENR sont plus spécifiquement ceux classés selon le système Cooperative Patent Classification (CPC) comme appartenant aux technologies suivantes : éolien (onshore et offshore), solaire photovoltaïque, biocarburants, combustion des déchets, géothermie, solaire thermique et hydro-énergie. Nous excluons de cette dernière catégorie les technologies des grands barrages hydroélectriques pour ne considérer que l'utilisation des énergies des mers et des petites centrales hydroélectriques utilisant les cours d'eau. La dernière année de notre échantillon est 2014, car en raison des différents délais de publications des demandes de brevets et des modalités de demandes, c'est la dernière année pleine dans l'édition *Spring 2018* de la base Patstat dont sont extraites nos données⁶⁶.

⁶⁵ Classer les inventions selon l'année de dépôt de la demande permet de mieux rendre compte de la temporalité des décisions des innovateurs. En effet, les durées d'examen des demandes sont susceptibles de varier d'un office à l'autre et une classification par année d'obtention du brevet peut biaiser les résultats.

⁶⁶ <https://forums.epo.org/latest-full-year-in-patstat-7117>

Figure 22: Évolution de la part des brevets ENR dans le total des brevets délivrés par les cinq principaux offices de propriété intellectuelle.



Source : PATSTAT

Les parts des brevets ENR délivrés par les cinq offices sont représentées sur l'axe de gauche de la Figure 21. Pour illustrer l'importance des signaux de prix, l'évolution du prix du baril de pétrole Brent en dollars US de 2010 est rapportée sur l'axe de droite et représentée en pointillés.

La part des brevets ENR dans le total des brevets délivrés par un office de propriété intellectuelle n'est pas une mesure des performances d'un pays en termes d'innovation. Elle constitue un indicateur des efforts d'innovation dirigés vers les ENR relativement aux autres secteurs et donc de la rentabilité, réalisée ou anticipée, de ces secteurs. Il faut souligner dans un premier temps le dynamisme des offices de brevets chinois, coréen et japonais par rapport aux offices européen et américain. Durant la période représentée, les brevets ENR ont généralement des poids plus forts au sein du JPO, SIPO et KIPO, en comparaison de l'EPO et de l'USPTO. Cet écart est d'autant plus marqué à partir des années 2000. Le JPO se distingue d'ailleurs de ses voisins asiatiques puisque la part des brevets ENR a longtemps été plus élevée que dans les autres offices, mais ne connaît une croissance moindre à partir des années 2000. Pour les cinq offices, l'accélération de

l'innovation dans les technologies ENR s'amorce au tournant des années 2000 et est fortement corrélée au prix du baril de pétrole. Cette corrélation illustre donc l'hypothèse de changement technique induit initiée par John Hicks, selon laquelle la direction prise par le progrès technique dépend des investissements réalisés par les acteurs économiques en réponse aux conditions de marché (Hicks, 1932, pp. 124-125). Cette corrélation souligne la nécessité d'un signal prix pour stimuler l'innovation bas-carbone et ainsi la pertinence des instruments de taxation des émissions de gaz à effet de serre. La réactivité de l'innovation bas-carbone aux signaux de prix est confirmée par de nombreuses études (Newell et al., 2009 ; Popp, 2002 ; Crabb et Johnson, 2010 ; Verdolini et Galeotti, 2011). Une tarification des émissions n'est toutefois pas le seul instrument à même d'entraîner une réaction de la part des acteurs de l'innovation. Lanjouw et Mody (1996) ont montré que l'implémentation des normes sur la qualité de l'air avait positivement impacté les innovations environnementales brevetées aux États-Unis, au Japon et en Allemagne. Une étude plus récente de Johnstone et al. (2010) évalue et compare les effets de différents instruments de politique environnementale mis en place dans 25 pays sur les dépôts de brevets dans les ENR auprès de l'EPO entre 1978-2003. Ils concluent à la complémentarité des instruments : les instruments les plus flexibles tels que les marchés de certificats d'énergie bas-carbone⁶⁷ permettent aux technologies les plus compétitives d'entrer sur le marché, tandis que des subventions ciblées comme les tarifs de rachat à l'électricité verte stimulent l'innovation dans les technologies les plus coûteuses. Le système d'échange de quotas d'émission de l'Union européenne a été évalué par Calel et Dechezleprêtre (2016) et son impact causal sur l'innovation bas-carbone est estimé sur un échantillon de 5 500 firmes de 18 pays de l'Union européenne. Les auteurs concluent qu'environ 1 % de l'augmentation de l'innovation dans les technologies environnementales est imputable au système d'échange de quotas. Plus généralement, les principales leçons de la littérature empirique étudiant l'innovation bas-carbone sont résumées par Popp (2005) ; nous en résumons ici deux. La première de ces leçons est que l'innovation bas-carbone non seulement réagit aux incitations économiques, mais le fait de manière rapide. En effet, Popp estime que plus de la moitié de l'impact d'une hausse de prix sur les dépenses de R&D se produit dans les cinq années qui suivent cette hausse. La

⁶⁷ Les marchés de certificats d'énergie bas-carbone sont un instrument de promotion des énergies renouvelables. Les générateurs d'électricité sont sommés de respecter un certain quota d'électricité bas-carbone auquel correspond un nombre de certificats à présenter au régulateur. Dans certains systèmes, la flexibilité est plus forte du fait que les certificats sont échangeables par les générateurs.

seconde leçon de la littérature est que la R&D présente des signes de rendements décroissants au sein de la même technologie. Cette analyse se fonde sur les données de citations entre brevets : il en ressort que dans une même technologie, la propension d'un brevet à être cité diminue avec l'accumulation de brevets dans cette technologie. Cela suggère que l'apport marginal des nouvelles inventions à l'amélioration d'une technologie est de plus en plus faible.

D'un point de vue géopolitique, la réactivité de l'innovation bas-carbone au prix du pétrole souligne l'importance des pays producteurs de ressources fossiles, qui en pouvant s'accorder sur une baisse des prix peuvent impacter à la baisse l'innovation bas-carbone, d'où la nécessité d'inclure ces pays dans la négociation climatique pour veiller à ce qu'un prix du pétrole excessivement bas ne vienne fragiliser les décisions prises dans le cadre des accords internationaux. Ces enjeux seront traités plus en détails dans la section 2.4 et la partie III.

Les leaders des technologies ENR

Les dynamiques d'acquisition de brevets au sein des cinq principaux offices ne permettent pas de distinguer les pays possesseurs des inventions protégées puisque les brevets peuvent être déposés par des inventeurs étrangers. Une analyse plus fine est nécessaire pour en tracer la nationalité. Nous nous intéresserons ici exclusivement aux brevets dit prioritaires, qui correspondent au premier dépôt d'une demande visant à obtenir un droit de propriété intellectuelle sur une invention. Les autres brevets protégeant la même invention dans d'autres offices ne sont pas pris en compte. Nous pouvons ainsi parler d'invention et non de brevet, puisque restreindre notre analyse aux brevets prioritaires permet d'éviter de compter plusieurs brevets protégeant la même invention dans plusieurs offices de brevets. Nous considérons que la nationalité d'un brevet prioritaire est celle de l'adresse de résidence de l'inventeur enregistrée lors du dépôt de brevet, utilisée pour les correspondances avec l'office de brevet. Quand l'information n'est pas connue, nous considérons que l'invention est de la nationalité de l'office dans lequel elle est protégée pour la première fois. En effet, il y a chez les inventeurs un biais domestique fort dans le sens où ils préféreront généralement déposer le premier brevet sur leur

invention directement au sein de leur pays de résidence, avant d'envisager une extension de la protection à d'autres pays.⁶⁸

Nous suivons ce protocole pour analyser la spécialisation des principaux pays innovateurs⁶⁹ pour quatre technologies : (1) l'éolien onshore et offshore, (2) le solaire photovoltaïque, (3) les biocarburants et (4) l'énergie hydro en la restreignant aux technologies utilisant l'énergie des courants naturels et des mers ; nous excluons ainsi l'énergie hydroélectrique produite à l'aide des barrages. Un indicateur largement utilisé dans la littérature pour mesurer le degré de spécialisation relative d'un pays dans un champ technologique est le *Revealed Technical Advantage* (RTA), proposé initialement dans un article de Soete (1987). Il est défini comme le rapport entre la part des inventions détenue par un pays dans une technologie spécifique et la part des inventions détenue par un pays, toutes technologies confondues. Cet indicateur est particulièrement utile pour les comparaisons internationales, car la propension à breveter varie d'un pays à l'autre, indépendamment des performances en termes d'innovation. Finalement, nous normalisons les indices de RTA pour que le même poids soit attribué aux variations négatives et positives (Thoma, 2017). Bien que les indices de RTA soient très efficaces pour quantifier la spécialisation relative d'un pays dans un secteur technologique, ils présentent deux limites identifiées par Cantwell et Jeanne (1999). Premièrement, la construction de ces indices pour des pays produisant peu d'inventions crée potentiellement de fortes variations de l'indice d'une période à l'autre et complique la comparaison avec d'autres pays (au sein de notre échantillon, cette limite s'applique principalement à l'Inde). Deuxièmement, le calcul des RTA pour des petits pays mène facilement à les considérer comme hautement spécialisés dans la mesure où leurs faibles ressources les contraignent à mettre l'accent sur un nombre restreint de secteurs technologiques (cette critique s'applique principalement au Danemark parmi notre

⁶⁸ Pour nous assurer de cela, nous avons extrait la totalité des brevets prioritaires déposés entre 1980 et 2014 pour lesquels le pays de résidence de l'inventeur est connu. Dans 91% des cas, il correspond au pays de l'office ayant délivré le brevet prioritaire.

⁶⁹ Nous nous focalisons sur les principaux innovateurs, définis comme les pays ayant obtenu le plus de brevets entre 1992 et 2014, soit les États-Unis d'Amérique, le Japon, la Corée du Sud, la Chine, l'Allemagne, la France, Taïwan, la Grande-Bretagne, le Canada et les Pays-Bas. Nous ajoutons à ce groupe un second groupe composé de pays que nous sélectionnons sur la base de leurs poids dans les émissions mondiales (l'Australie, qui détient le plus fort niveau d'émissions par tête et l'Inde, qui est le premier émetteur de GES dans le monde) ou bien sur celle de leurs compétences dans les technologies des ENR (le Danemark et l'Espagne).

panel). L'analyse d'indicateurs complémentaires nous permettra par la suite de pallier ces deux limites.

Les indices de RTA sont calculés pour deux périodes : 1992-2003 et 2004-2014. La première période débute à l'année du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro qui aboutit à plusieurs résultats dont la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, étape clé de la négociation climatique. La seconde période débute en 2004, année qui marque l'accélération de l'acquisition de droits de propriété intellectuelle sur les inventions ENR (voir Figure 21). Les valeurs des indices de RTA sont représentées dans la Figure 22. Un indice strictement positif indique une spécialisation relative du pays dans le sens où il produit une part d'inventions dans ce secteur technologique plus grande que son poids dans l'ensemble des secteurs pris ensemble ; un indice strictement négatif témoigne d'une absence de spécialisation relative dans le secteur.

Figure 23: Évolution des indices de RTA.

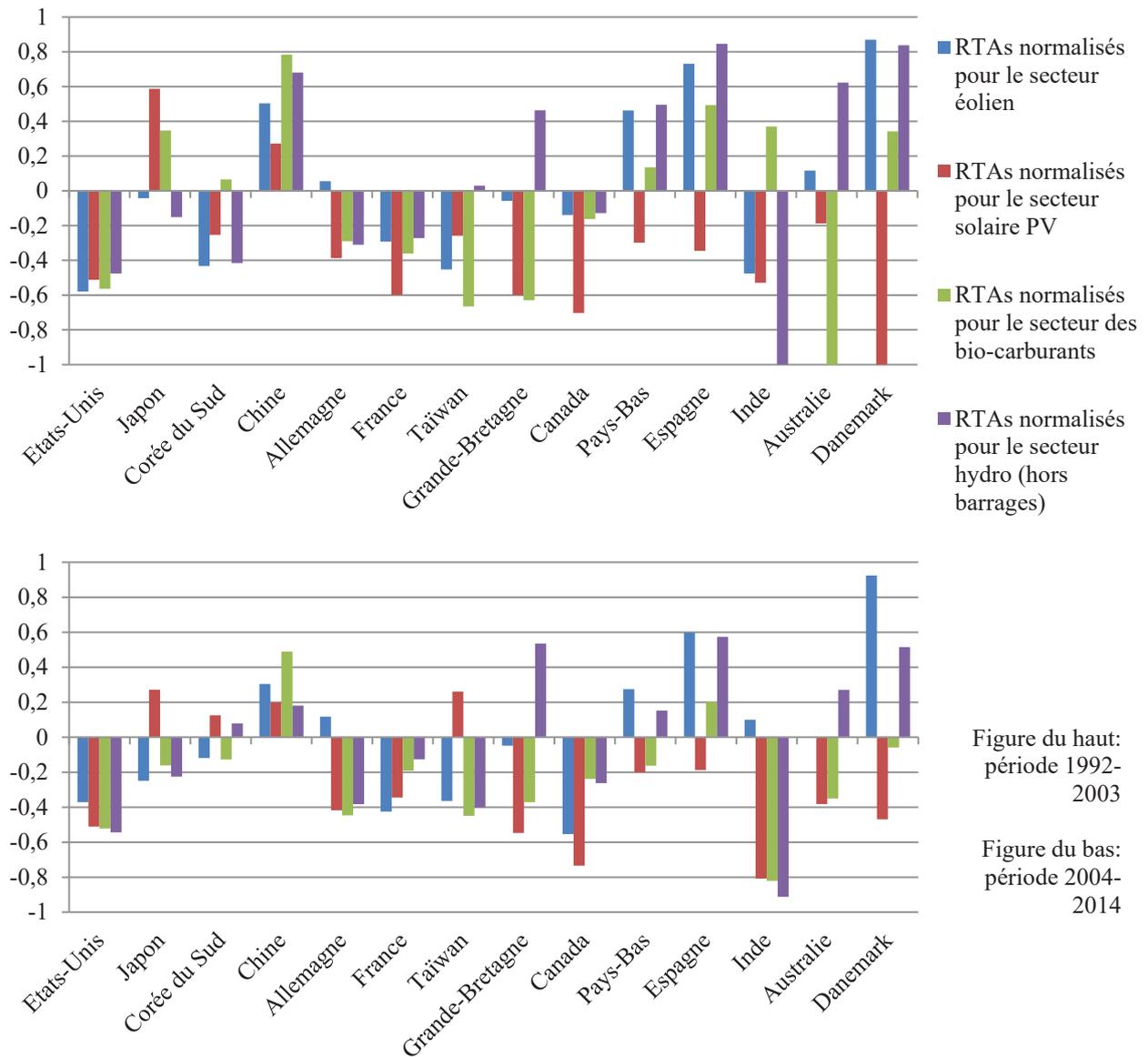


Figure du haut:
période 1992-
2003

Figure du bas:
période 2004-
2014

Source : PATSTAT

En comparaison, les pays européens font preuve d'une plus forte stabilité de leurs spécialisations technologiques dans la mesure où leurs indices de RTA n'ont pas fortement varié d'une période à l'autre. Entre 1992 et 2003, l'Espagne était par exemple spécialisée principalement dans les secteurs éolien et hydroélectrique. Le pays était également spécialisé dans les biocarburants, quoique moins fortement. Finalement, il accusait une sous-spécialisation dans le secteur du solaire PV comme en témoigne la valeur négative de l'indice. Durant la période 2004-2014, les indices de spécialisation ont faiblement varié : les écarts se sont réduits entre les technologies mais l'Espagne demeure

spécialisée dans l'hydroélectrique et l'éolien, suivis des biocarburants, et accuse un désavantage technologique relatif dans le secteur du PV.

La technologie éolienne demeure le meilleur avantage technologique européen puisque l'Allemagne, les Pays-Bas, l'Espagne et le Danemark apparaissent tous comme spécialisés dans cette technologie durant les deux périodes de temps, relativement aux autres pays du panel. Il est à noter que l'indice de RTA est un indice relatif qui juge de la performance d'un pays par rapport aux autres ainsi que par rapport à sa propre performance dans d'autres secteurs technologiques. L'Allemagne peut donc apparaître comme faiblement spécialisée dans la technologie éolienne en comparaison des trois autres pays mentionnés. Cela s'explique par le fait qu'elle produit beaucoup d'inventions dans d'autres champs technologiques, ce qui vient minorer le poids de la technologie éolienne. Un secteur technologique prometteur en Europe est celui des énergies marines et des courants dans lequel sont spécialisés la Grande-Bretagne, l'Espagne, les Pays-Bas et le Danemark. De tous les pays européens, la France semble accuser un retard dans l'ensemble des quatre secteurs technologiques analysés même si de plus forts RTA sont observés durant la dernière période dans le solaire PV, les biocarburants et le secteur hydro hors-barrages.

Les États-Unis, le Canada et l'Australie ont en commun d'avoir un taux d'émissions de GES par tête important et ainsi de dépendre fortement des énergies fossiles. La comparaison entre les deux périodes indique que ces pays ne se sont pas fortement spécialisés dans un ou plusieurs secteurs des ENR. Les États-Unis ont préservé une situation similaire d'une période à l'autre, sans chercher à privilégier une technologie : les valeurs négatives des indices de RTA démontrent que les technologies ENR sont encore loin d'avoir rejoint les secteurs de l'innovation les plus dynamiques aux États-Unis. D'une période à l'autre, les indices de RTA du Canada ont diminué pour l'ensemble des quatre technologies. Pour ce qui est de l'Australie, le pays maintient un fort degré de spécialisation dans le seul secteur des énergies des mers et des courants durant les deux périodes.

Les bouleversements les plus importants dans les spécialisations technologiques relatives des pays ont eu lieu en Asie, bien que les pays présentent des profils très différents et que le Japon fait figure d'exception. La Corée du Sud et Taïwan présentent la caractéristique

commune d'être parvenus à développer une forte spécialisation dans le domaine du solaire PV. Cela s'explique par la spécialisation que ces pays avaient développée en amont dans le secteur des semi-conducteurs, - ce dernier étant intrinsèquement lié à la technologie du solaire PV (Wu, 2014). Toutefois, alors que Taïwan s'est spécialisé exclusivement dans le solaire PV, la Corée du Sud a également renforcé ses compétences dans l'éolien et l'énergie des mers et des courants. Il faut également noter que Taïwan a privilégié le développement des cellules au silicium cristallin tandis que les innovateurs coréens se sont orientés vers l'amélioration des nouvelles générations de technologies solaires photovoltaïques (Wu, 2014). Le Japon se distingue des autres pays asiatiques en enregistrant une réduction de ses indices de RTA sur l'ensemble des quatre technologies, bien qu'une forte spécialisation dans le solaire PV soit maintenue durant la seconde période.

Enfin, la comparaison des degrés de spécialisation dans les technologies ENR d'une période à l'autre pointe la particularité de la Chine. C'est principalement à partir du début des années 2010 que les interrogations se sont manifestées quant à la hausse du nombre de brevets chinois⁷⁰. Nos résultats apportent deux dimensions supplémentaires.

Premièrement, la Chine était déjà fortement spécialisée, relativement aux autres pays, dans les technologies ENR entre 1992 et 2004, tandis que l'élément déclencheur de l'amorce de la transition énergétique en Chine est généralement associé à la loi sur les énergies renouvelables de 2005 (LER 2005). Il semble donc qu'en amont d'une politique de soutien au déploiement des ENR, formalisée par la LER 2005, l'économie chinoise avait déjà amorcé durant les années 1990 un processus de spécialisation dans ces secteurs. Cela n'est pas étonnant dans la mesure où la Chine entretient depuis longtemps une volonté de déploiement des ENR, même si cette dernière reste discrète en comparaison de l'augmentation de ses émissions de GES. D'après la Banque mondiale, la Chine était déjà en 1996 le premier producteur de turbines éoliennes dans le monde (World Bank, 1996). En raison de ses bons gisements éoliens, notamment en Mongolie intérieure, la Chine a débuté dès les années 1970 un programme d'électrification des zones rurales fondé sur l'utilisation de l'énergie éolienne, mais également d'autres sources d'énergie renouvelable

⁷⁰ "Patents, yes ; ideas, maybe. Chinese firms are filing a lots of patents. How many represent good ideas?" *The Economist*, October 14th 2010.

(Lew, 2000). En parallèle, les gouvernements centraux et locaux avaient mis en place à la fin des années 1950 un ensemble de mécanismes visant à soutenir le développement d'une filière éolienne domestique. Plus généralement, l'électrification des zones rurales en Chine a été un puissant vecteur de développement des petites installations génératrices d'électricité renouvelable. Par exemple, la Chine à elle seule possédait 15 GW de puissance installée de petit hydro (<10MW) sur les 40 GW installés dans le monde en 2001 (Paish, 2002).

Deuxièmement, la spécialisation relative de la Chine dans les secteurs des ENR analysés ici s'est maintenue durant la période 2004-2014, malgré l'entrée de nouveaux acteurs. La Chine apparaît donc spécialisée dans les technologies de l'éolien, des biocarburants, des énergies des mers et des courants, et dans une moindre mesure dans la technologie du solaire PV. Concernant cette dernière technologie en effet, les entreprises chinoises se sont principalement focalisées sur le renforcement des capacités de production ; les principales forces de l'économie chinoise dans ce secteur étant la réalisation d'économies d'échelle, les faibles coûts de production et l'exportation de systèmes prêts à l'installation (Wu, 2014).

Les indices de RTA permettent de quantifier la spécialisation relative des pays dans le secteur des ENR et permettent d'appréhender la direction technologique empruntée par les économies nationales. En revanche, ils n'intègrent pas la notion de valeur économique du brevet, qui nécessite l'analyse d'indicateurs complémentaires. Pour appréhender cette dimension, nous pouvons nous appuyer sur les indicateurs de familles de brevets.

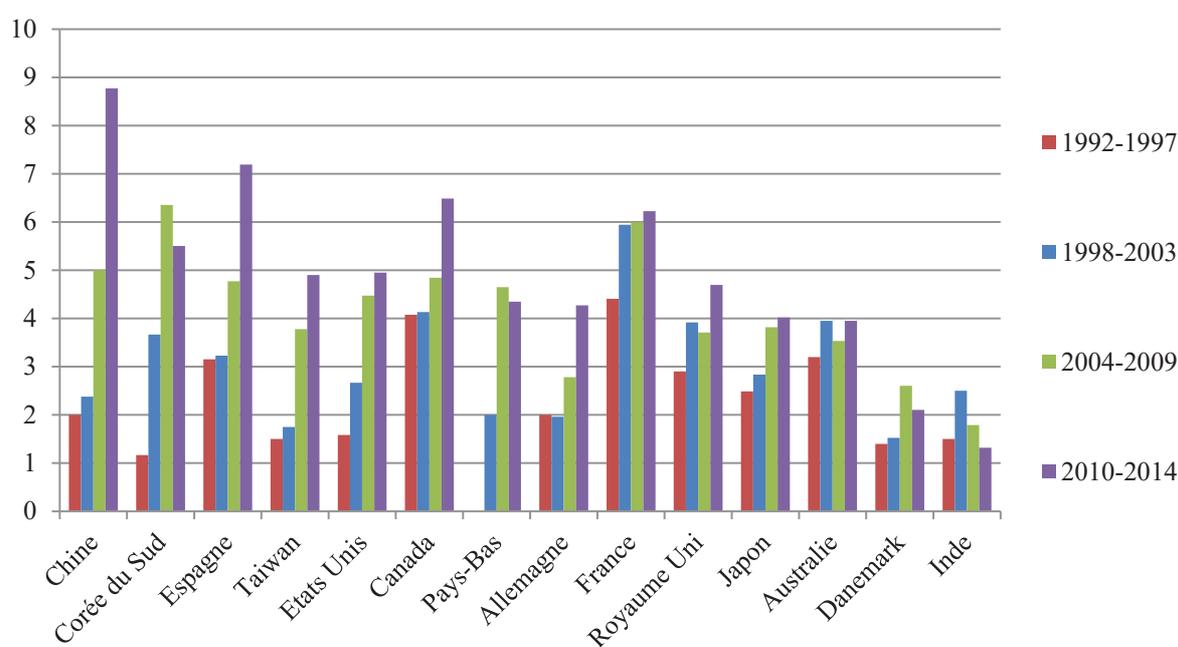
Les familles de brevets : une mesure de l'ampleur géographique des inventions

Comme nous l'expliquions au début de la sous-section précédente, une même invention est protégée dans un premier temps par un brevet dit prioritaire, puis dans un second temps elle peut l'être par une famille de brevets délivrés par différents offices de propriété. Parce que chaque nouvelle demande de brevet représente un coût pour le demandeur, il est considéré que la taille de la famille de brevets, soit le nombre d'offices de brevets dans lesquels l'invention est protégée, est une approximation pertinente de la valeur économique d'un brevet (Fischer et Leidinger, 2014). Cette hypothèse est validée

empiriquement par un ensemble d'articles qui mettent en exergue la corrélation positive qui lie la taille de la famille de brevet d'une invention et sa valorisation économique (e.g. Putnam, 1997 ; Harhoff et Wagner, 2002). Dans une approche plus stratégique, la taille de la famille, en indiquant l'ampleur de la couverture géographique du droit de monopole sur une invention que confère une famille de brevets, permet de saisir l'influence d'un pays sur l'accès des autres États aux technologies ENR.

Nous représentons l'évolution de la taille moyenne des familles de brevets protégeant des inventions dans les secteurs de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire PV sur les Figures 23 et 24, respectivement. La période analysée est divisée en quatre sous-périodes afin d'évaluer l'évolution dans le temps de la taille moyenne des familles.

Figure 24: Taille moyenne de la famille de brevets protégeant la même invention dans la technologie éolienne



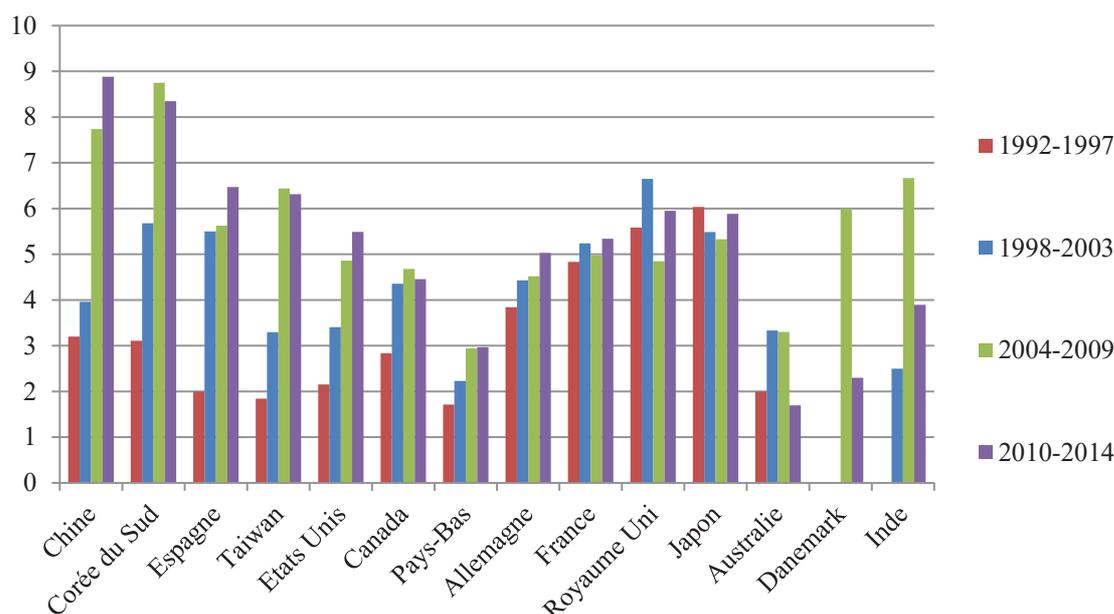
Source : PATSTAT

Les indicateurs présentés sur les Figures 23 et 24 sont complémentaires aux indices des RTA. Le premier résultat qui ressort de la Figure 23 est que plusieurs pays ont connu une augmentation rapide de la taille moyenne des familles de brevets protégeant leurs inventions dans la technologie éolienne. Cette augmentation n'est bien sûr pas exclusivement liée à des déterminants purement technologiques et renvoie également à une augmentation de la valeur économique moyenne des inventions, résultant par exemple de la mise en œuvre d'une politique de soutien au secteur dans un pays qui

poussera les innovateurs étrangers à protéger leurs inventions auprès de l'office national de brevets. Néanmoins, les pays où cette tendance à la hausse n'est pas observée sont ceux qui accusent un retard technologique par rapport aux autres, dans la mesure où ils ne se risquent pas à conquérir de nouveaux marchés. C'est le cas du Japon, de la France, de l'Australie et, dans une moindre mesure, des Pays-Bas. En ce qui concerne les autres pays, on peut distinguer deux groupes : les leaders historiques du secteur et les nouveaux venus sur le marché. Le premier groupe comprend le Danemark, l'Allemagne, l'Espagne, le Royaume-Uni et les États-Unis. Il réunit les leaders du marché européen et les États-Unis qui ont tous bénéficié d'un marché domestique dynamique, ainsi que d'une demande importante des pays voisins.⁷¹ Le deuxième groupe comprend la Chine, Taïwan et la Corée du Sud. Concernant cette dernière, la taille moyenne des familles de brevets protégeant les inventions éoliennes n'a cessé d'augmenter au cours des trois premières périodes que nous examinons avant de diminuer au cours de la période 2010-2014. En Chine et à Taïwan, des efforts importants ont été faits pour accroître le scope géographique moyen de la propriété intellectuelle sur les inventions éoliennes, démontrant ainsi l'amélioration de la capacité d'innovation dans ces deux pays. Cela résulte également de la forte croissance de la demande asiatique pour des éoliennes fonctionnant à faible vitesse du vent. Ces éoliennes utilisent généralement des aimants permanents et la plupart ont été fabriquées par la firme chinoise Goldwind (Serrano-González et Lacal-Arántegui, 2016).

⁷¹ Par exemple, en 2008, sept entreprises danoises, allemandes et espagnoles ont fourni les turbines pour 94 et 93 % des capacités installées cumulées en Italie et au Portugal, respectivement (Baudry et Bonnet, 2018).

Figure 25 : Taille moyenne de la famille de brevets protégeant la même invention dans la technologie solaire PV



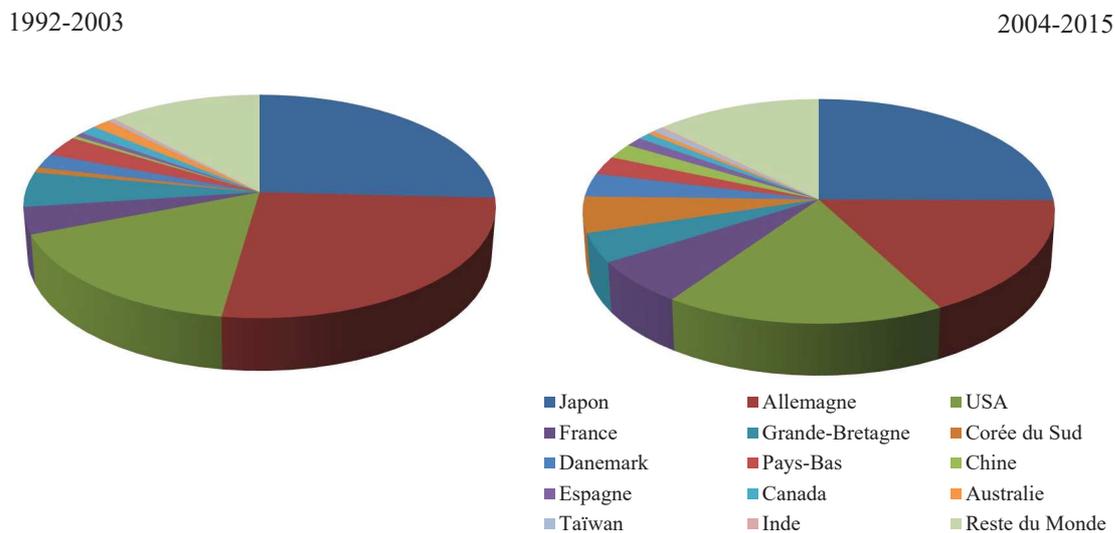
Source : PATSTAT

Le contraste entre les pays asiatiques et européens est encore plus frappant dans le secteur du solaire PV. L'évolution sur les quatre périodes traitées de la taille moyenne des familles de brevets protégeant les inventions solaires PV est représentée sur la Figure 24. On y observe que la portée géographique de la propriété intellectuelle des inventions asiatiques dans ce domaine a considérablement augmenté. Cette augmentation s'est surtout produite au cours des deux dernières périodes et est corrélée à la multiplication des politiques de soutien à la demande d'énergie solaire dans les pays asiatiques et à la pénétration des entreprises asiatiques sur les marchés européens et américains. Il convient de noter que les États-Unis ont également suivi cette dynamique en augmentant la taille moyenne de leurs familles de brevets sur le solaire PV. Au contraire, on observe un ralentissement de la croissance de la taille moyenne des familles de brevets en Europe. Le cas du Japon nécessite d'être souligné. Bien que ce pays soit un innovateur majeur dans la technologie du solaire PV, aucun signe d'amélioration de la valeur moyenne de ses inventions dans ce domaine n'est observé.

Ces résultats sur les familles de brevets peuvent être affinés en discriminant les inventions selon leur valeur, et en ne retenant que celles supposées de plus forte valeur. Pour ce faire, il s'agira de ne compter que les inventions ayant été brevetées dans les

offices de brevets les plus innovants de manière à rehausser le seuil de valeur minimale des inventions prises en compte. C'est ce que permet le compte des familles triadiques qui concernent les inventions protégées à la fois dans les trois principaux offices de brevets dans le monde : l'office américain (USPTO), l'office japonais (JPO) et l'office européen (EPO). L'avantage du compte des familles triadiques est de réduire l'influence de la localisation géographique et de faciliter ainsi les comparaisons internationales (OCDE, 2009). Nous représentons sur la Figure 25 les distributions par nationalité des inventions triadiques produites pendant deux périodes. Durant la première période, allant de 1992 à 2003 le nombre de familles triadiques dans le secteur des ENR était de 771. Entre 2004 et 2014, ce nombre a considérablement augmenté pour atteindre 1849.

Figure 26: Distributions des familles triadiques des inventions ENR selon leur nationalité



Source : PATSTAT

Durant la première période, la production d'inventions de très forte valeur dans les secteurs des ENR est fortement concentrée entre l'Allemagne, le Japon et les États-Unis qui représentent respectivement 26,4 %, 25,8 % et 16,7 % des familles triadiques. Durant la période 2004-2014, le Japon et les États-Unis maintiennent leurs parts tandis que celle de l'Allemagne diminue à 17 %. Parallèlement, de nouveaux pays prennent une place plus importante dans la production des inventions de forte valeur comme c'est le cas de France qui parvient à accroître sa part de 3,9 % à 6,4 %. Les poids du Royaume-Uni et des Pays-Bas restent relativement stables tandis que ceux du Danemark et de l'Espagne augmentent respectivement de 1,3 et 0,6 point. Le fait le plus marquant est très certainement l'entrée de la Corée du Sud dans la production des inventions triadiques

puisqu'elle n'en détenait que 0,8 % entre 1992 et 2004 et atteint 5,2 % durant la période 2004-2014.

2.4 Les enseignements de la prise en compte du rôle de la propriété intellectuelle dans la transition énergétique

Les analyses développées dans cette partie font ressortir plusieurs résultats qui permettent de saisir les interactions entre les relations internationales et l'innovation bas-carbone. Nous en résumons ici les principaux enseignements.

Les politiques climatiques et les politiques de soutien à l'innovation mises en place par les États sont les deux principaux déterminants de l'innovation bas-carbone.

L'innovation bas-carbone a pour spécificité de répondre à une défaillance de marché sur les émissions de GES. Au sens large, l'innovation est le succès commercial d'une invention. Elle se rémunère ainsi *via* le système de prix tel qu'il existe ; les *smartphones* ont par exemple été largement adoptés en l'espace de quelques années car ils offraient des services nouveaux que les consommateurs valorisent et pour lesquels ils sont donc prêts à payer. L'innovation bas-carbone, au contraire, permet de réduire un dommage écologique qui ne coûte pas aux agents économiques polluants en l'absence de politiques environnementales de correction de ces externalités. La rentabilité économique d'une innovation bas-carbone est donc conditionnée aux politiques mises en place par les États. C'est le premier facteur qui lie l'innovation bas-carbone aux États. Le second facteur est la place que tient le financement d'État dans les secteurs de l'innovation. En l'absence d'applications commerciales à court terme et en raison des fortes incertitudes intrinsèques à la recherche fondamentale, celle-ci est en grande partie financée par le secteur public. Plus généralement, l'intervention publique influence considérablement les orientations prises par les firmes innovantes. En effet, les travaux empiriques menés sur les pays de l'OCDE démontrent que le financement public de la recherche menée par le secteur privé a un effet démultiplicateur sur les activités de R&D et que les incitations fiscales ont un effet positif sur les activités de R&D des entreprises (Guellec et van Pottelsberghe de la Potterie, 2000). Finalement, le secteur des ENR est plus spécifiquement lié aux pouvoirs publics, car ces derniers sont généralement les acteurs principaux des secteurs de l'énergie en raison du modèle de monopole public en vigueur avant la vague de libéralisation des années 1980 (voir Section 2.1. notre discussion des travaux de Pollitt, 2012).

Pour ces trois raisons, l'innovation bas-carbone et son financement constituent des manifestations des stratégies des gouvernements pour acquérir des actifs technologiques ainsi que des rentes d'innovation dans les champs des ENR. Il est donc pertinent d'appréhender les dynamiques d'innovation bas-carbone par le prisme des relations internationales.

Il existe une boucle de rétroaction entre innovation bas-carbone et négociations climatiques, et la nature de celle-ci est conditionnée par la distribution et l'accumulation des droits de propriété intellectuelle sur les technologies des ENR.

Les actifs technologiques dont disposent les pays dans les technologies des ENR affectent leurs prises de position durant les négociations internationales. Elles-mêmes en retour déterminent en partie la taille et la stabilité du marché en construction de ces technologies qui, comme nous l'avons rappelé, dépendent de l'ampleur et de la stabilité des politiques climatiques. Le cercle qui se forme peut être vicieux ou vertueux pour l'avancée des négociations. En effet, si les droits de propriété intellectuelle sur les technologies ENR sont concentrés entre les mains d'un nombre restreint d'acteurs en mesure de profiter largement de leur pouvoir de marché, les pays qui n'ont pas accès à ces technologies anticiperont qu'ils devront payer au prix fort leur transition énergétique sans que celle-ci soit source de création de valeur sur leur territoire. Cela continuera alors d'être un point de blocage dans la négociation climatique. Si, au contraire, les droits de propriété intellectuelle sur les technologies ENR sont plus équitablement répartis entre les pays et que des accords de transfert de technologies se mettent en place, les négociations internationales pourront faire adopter des objectifs ambitieux de réduction des GES à un nombre plus large d'acteurs.

L'innovation bas-carbone dépend du prix des énergies fossiles, et ce lien confère une place centrale aux pays producteurs d'hydrocarbures dans la géopolitique de des énergies renouvelables.

Comme nous l'avons vu, l'innovation dans les technologies des ENR est directement impactée par le prix des énergies fossiles. De nombreuses études confirment que la corrélation représentée sur la Figure 21 est plus précisément un lien de causalité entre le prix de l'énergie et la production d'innovation bas-carbone (Newell et al., 2009 ; Popp, 2002 ; Crabb et Johnson, 2010 ; Verdolini et Galeotti, 2011). Cette causalité implique que

les pays producteurs d'hydrocarbures disposent d'une influence majeure sur la transition énergétique. Si l'on se focalise par exemple sur le pétrole, dont le prix se situe - à la date d'écriture de ce travail - autour de 75 US\$ le baril de Brent, nous savons que des pays comme l'Irak, les Émirats arabes unis, le Koweït, l'Iran ou encore le Qatar peuvent se permettre de vendre à un prix significativement plus faible leurs réserves tout en conservant un budget équilibré (voir Tableau 9 présenté en partie III). Une augmentation de la production, en réduisant le prix de vente, permettra de dégrader la compétitivité des énergies renouvelables par rapport aux énergies fossiles et d'éloigner ainsi la date d'abandon des combustibles fossiles par les pays consommateurs. C'est donc une stratégie qui peut être payante de la part des pays exportateurs d'énergies fossiles et qui fragilise la transition énergétique.

Parallèlement, les marges d'action des pays producteurs d'énergies fossiles seront d'autant plus fortes que les politiques climatiques des pays consommateurs ne parviendront pas à réduire leurs consommations d'énergie fossile. Dans ce contexte, deux éléments doivent être pris en compte. Premièrement, il est nécessaire de mettre en place des instruments de tarification des émissions de GES aptes à produire un signal fort et stable dans le temps pour maintenir l'attrait des projets de R&D dans les ENR. Deuxièmement, il convient d'analyser les stratégies de diversification des pays producteurs de pétrole pour pouvoir anticiper leurs réactions à la transition énergétique. C'est l'analyse qui sera développée dans la troisième partie de ce travail.

L'analyse empirique des données de brevets démontre que si l'Europe et les États-Unis semblent continuer de dominer la production d'innovation dans les secteurs des ENR, des efforts significatifs ont été engagés par plusieurs pays asiatiques pour se spécialiser dans ces technologies.

La part des brevets ENR dans la totalité des brevets accordés par les cinq principaux offices de propriété intellectuelle montre qu'après une période de stagnation⁷², l'innovation dans les technologies ENR a considérablement augmenté durant les années 2000. Nous pouvons noter que, durant cette décennie, les poids des brevets ENR dans les brevets délivrés par le SIPO (Chine), le KIPO (Corée du Sud) et le JPO (Japon) étaient plus importants que dans les offices européen (EPO) et américain (USPTO).

⁷² En réponse aux chocs pétroliers, de nombreux pays avaient développé des stratégies d'innovation dans les énergies EnRs, notamment motivés par la volonté de renforcer leur sécurité énergétique.

L'étude des indices de Revealed Technological Advantages (RTA) permet une analyse plus fine des efforts d'innovation des pays dans les ENR. Il en ressort que, depuis le début des années 1990, la Chine produit plus de brevets dans ces technologies relativement à sa production dans l'ensemble des technologies brevetables. C'est également le cas pour la Corée du Sud et Taïwan, où des efforts considérables ont été réalisés pour développer la filière du solaire PV. En Europe, plusieurs pays disposent également d'avantages technologiques dans l'éolien (Allemagne, les Pays-Bas, l'Espagne et le Danemark), les biocarburants (l'Espagne) et l'hydro hors-barrages (la Grande-Bretagne, l'Espagne et le Danemark). Il semble au contraire qu'en France, aux États-Unis et au Canada, les technologies ENR ne sont pas celles dans lesquelles ces pays sont les plus performants. Pour autant, ces résultats sur les efforts d'innovation doivent être nuancés en analysant la valeur économique des innovations brevetées. Il en ressort en effet que les pays occidentaux restent détenteurs des brevets de plus forte valeur dans les technologies ENR comme en témoigne l'étude de la distribution des familles de brevets triadiques. Ces résultats n'infirment pas pour autant le constat selon lequel l'innovation dans les ENR de la part de certains pays asiatiques a connu une accélération plus forte que dans les pays occidentaux, pourtant leaders historiques dans ces technologies. Ainsi, les poids de la Chine, de Taïwan et de la Corée du Sud dans la production d'innovations triadiques dans les ENR ont été multipliés par approximativement et respectivement 5, 2 et 7, entre les périodes 1992-2003 et 2004-2014. Au contraire, ces poids ont stagné ou diminué pour les États-Unis, l'Allemagne et le Japon. Ces changements dans la structure de la production de l'innovation ENR annoncent des répercussions fortes sur les politiques climatiques, tant à l'échelle nationale qu'internationale.

III. LES ENJEUX DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE POUR LES PAYS EXPORTATEURS D'HYDROCARBURES

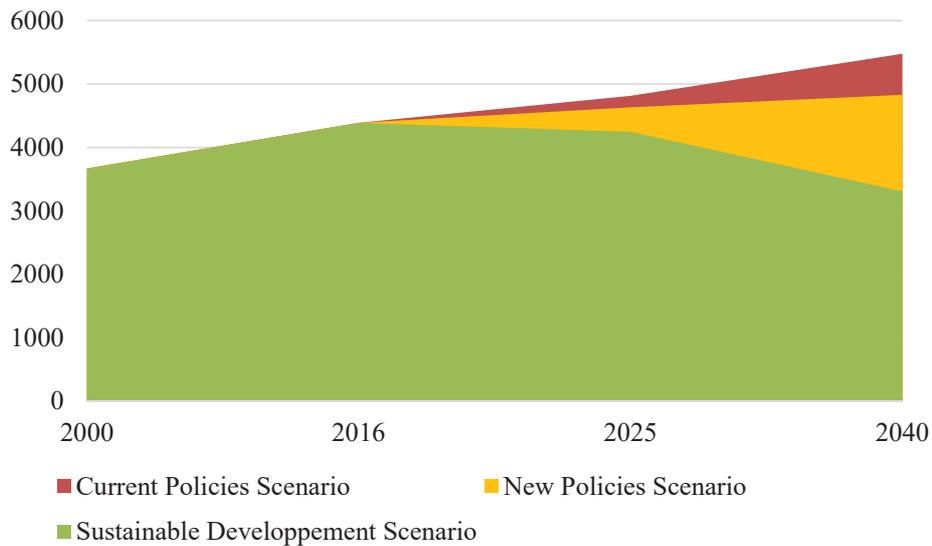
Nous l'avons vu, les pays producteurs d'hydrocarbures ont un rôle essentiel à jouer dans la transition énergétique, en lien notamment avec l'innovation technologique qui réagit au prix du pétrole. Plus généralement, si l'on souhaite définir les contours d'une géopolitique des énergies renouvelables, il est nécessaire de penser les conséquences de leur diffusion sur ces acteurs « traditionnels » de la géopolitique de l'énergie, dont les modèles politiques et économiques vont être amenés à se transformer. Nous nous concentrerons en particulier sur les pays exportateurs de pétrole et de gaz étant donné que les problématiques liées à la dépendance aux ressources s'y posent avec davantage d'acuité que pour les pays exportateurs de charbon (principalement l'Indonésie et l'Australie). Les cas de l'Arabie saoudite et de la Russie feront l'objet d'une attention particulière : le royaume saoudien en tant que premier exportateur de pétrole au monde et archétype d'État rentier ; la Russie en tant qu'exportateur de pétrole mais également de gaz, dont elle est le premier fournisseur de l'Union européenne (UE) ; les deux pays évoluant dans des contextes géopolitiques différents.

Ces pays sont confrontés à une somme d'incertitudes liées aux changements en cours dans le secteur énergétique mais également sur la scène internationale. Au premier rang de ces interrogations figure le futur de la demande en hydrocarbures, sur lequel de nombreuses études se sont penchées ces dernières années pour tenter de prévoir la période à laquelle un retournement pourrait s'opérer en matière de consommation. Les estimations réalisées varient de 2025 à bien après 2040⁷³ (Figure 26 et Figure 27), traduisant une incertitude fondamentale autour du rythme de la transition énergétique.⁷⁴

⁷³ Spencer Dale et Bassam Fattouh, « Peak Oil Demand and Long-Run Oil Prices », *Oxford Institute of Energy Studies, Energy Insight*, janvier 2018, <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/01/Peak-Oil-Demand-and-Long-Run-Oil-Prices-Insight-25.pdf>.

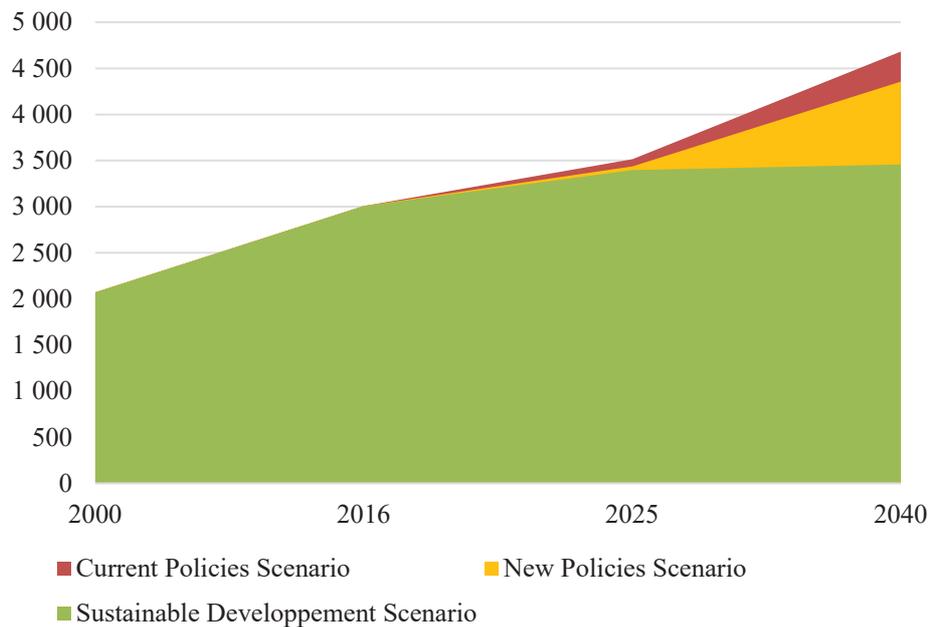
⁷⁴ Sovacool, B. K. (2016). 'How Long Will It Take? Conceptualizing the Temporal Dynamics of Energy Transitions'. *Energy Research & Social Science*, 13: 202–15.

Figure 27 : Demande en pétrole selon les scénarios de l'AIE (Mtep)



Source : AIE, World Energy Outlook 2017

Figure 28 : Demande en gaz selon les scénarios de l'AIE (Mtep)



Source : AIE, World Energy Outlook 2017

Ce rythme dépend en grande partie des évolutions technologiques (rendement des ENR, autonomie des batteries, croissance de l'efficacité énergétique, etc.), géopolitiques (guerre commerciale entre la Chine et les États-Unis, tensions russo-occidentales, tensions irano-saoudiennes, etc.), économiques (ralentissement de la croissance chinoise,

concurrence énergétique relative⁷⁵ États-Unis-Arabie saoudite, développement des émergents, adoption du véhicule électrique, etc.), des stratégies des acteurs (OPEP, producteurs non conventionnels, etc.) et des conditions de marché (notamment le prix volatil des hydrocarbures, criticité potentielle de certains matériaux nécessaires à la transition (voir Partie I), rythme, nature et origine des innovations bas-carbone (voir Partie II)), susceptibles d'infléchir voire de bouleverser les tendances à l'œuvre dans le secteur de l'énergie. Précisons que la problématique autour du futur de la demande se pose différemment entre le pétrole et le gaz naturel, ce qui rajoute un degré de complexité dans l'évaluation des conséquences de la transition énergétique pour les pays exportateurs d'hydrocarbures. Le gaz pourrait en effet connaître une croissance plus soutenue que le pétrole, notamment dans le cadre de la transition énergétique, dont il est l'un des éléments essentiels au sein d'un certain nombre de politiques énergétiques nationales (notamment aux États-Unis où le faible prix du gaz favorise la production d'électricité à partir du gaz aux dépens du charbon.).

Plus généralement, bien que la COP 21 ait indéniablement obligé les acteurs à se positionner dans la lutte globale contre le changement climatique, la mise en œuvre de politique concrète au niveau national et l'évolution du cadre réglementaire apparaissent également comme des facteurs d'incertitude. L'annonce du retrait des États-Unis de l'Accord de Paris par le président Donald Trump, l'absence de consensus clair au sein de l'Union européenne autour d'une politique énergétique commune, la difficile jonction entre les objectifs de développement durable et l'accès universel à l'énergie, entre autres, démontrent que le cours de la transition énergétique est encore loin d'être écrit.

Ces incertitudes quant à la rapidité de la transition, liées en partie à sa nature politique, et le futur de la demande en pétrole et de son prix rendent fragile la position des États exportateurs d'hydrocarbures, qui se voient contraints de prendre un certain nombre de décisions stratégiques dans un contexte où l'horizon est mouvant. Plus ou moins vulnérables à ces changements, ils devront s'adapter et feront face à une nécessaire redéfinition de leur modèle économique, voire de société, et de leur place sur la scène internationale.

⁷⁵ Les coûts de production aux États-Unis sont supérieurs à ceux observés en Arabie saoudite.

3.1 Des modèles d'États rentiers vulnérables à la transition énergétique ?

Si le prix du pétrole ne constitue pas l'unique facteur de stabilité ou d'instabilité dans les différents pays exportateurs, il pèse incontestablement sur l'évolution politique et géopolitique de ces pays. La chute brutale et massive du cours des hydrocarbures en 2014 (près de 80 % de baisse entre juin 2014 et janvier 2016), après plus d'une décennie de cycle haut, est ainsi venue rappeler aux différents pays exportateurs les effets pervers du modèle d'État rentier. La caractéristique principale de l'État rentier est de tirer une grande part de ses revenus de l'exploitation d'une ou de plusieurs ressources naturelles, ce qui lui permet de ne pas dépendre de l'impôt prélevé auprès de ses citoyens mais le rend vulnérable aux variations de prix de la ou les ressources en question (Mahdavy, 1970 ; Beblawy, 1987 ; Karl, 1997). Les conséquences négatives de cette rente en termes économiques (manque de diversification, faible productivité, désindustrialisation) et politiques (autoritarisme, clientélisme, corruption) ont amené certains chercheurs à s'interroger sur une possible « malédiction des ressources » (*resource curse*) : le fait, pour un État, de posséder et d'exploiter une ressource naturelle mènerait mécaniquement à un développement économique inadapté et des pratiques politiques autoritaires (Auty, 1993 ; Ross, 2012), voire à des guerres civiles (Collier et Hoeffler, 2004). Des travaux récents (Alexeev, Conrad, 2005 ; Haber et Menaldo, 2011 ; Luciani, Hertog, Woertz, Youngs, 2012 ; Wiens et al., 2014) tendent toutefois à démontrer que cette vision déterministe d'une « malédiction des ressources » liée aux effets négatifs de la rente ne permettrait pas de saisir la complexité des modèles de développement des différents pays producteurs. La littérature académique sur l'État rentier est abondante et il ne s'agit pas ici d'y revenir en détail.⁷⁶ En revanche, nous nous attarderons sur trois défis, liés au modèle d'État rentier, auxquels font face les pays exportateurs dans un environnement incertain autour du futur de la demande et du prix du pétrole : le manque de diversification de leur économie ; la remise en cause du contrat social et l'évolution de leur place sur la scène internationale.

Des États dépendants économiquement et socialement

Le manque de diversification économique est l'une des principales vulnérabilités des États rentiers. Il représente l'un des symptômes du « syndrome hollandais » (*Dutch*

⁷⁶ À noter que peu de travaux portent sur l'« État post-rentier », ou l'évolution du modèle politico-économique après l'épuisement de la rente (Kirkpatrick, 2017).

disease), qui veut que l'exploitation d'une ressource naturelle mène, malgré une augmentation globale de la richesse, à une spécialisation excessive, une atrophie des secteurs économiques non reliés à l'exploitation de la ressource (industrie manufacturière, agriculture) et un taux de change réel surévalué.⁷⁷ L'État demeure le principal acteur économique et finance une large partie de l'activité grâce aux revenus générés par le secteur pétro-gazier. Bien que la rente puisse bénéficier au développement (éducation, santé, infrastructures), cette situation expose le pays à la volatilité des prix de la ressource, en particulier si l'État ne profite pas des cycles hauts pour anticiper les éventuelles baisses de revenus. Malgré des efforts entrepris dès les années 1970, et plus particulièrement depuis une quinzaine d'années, le manque de diversification demeure encore patent dans la plupart des pays exportateurs, maintenant l'État et l'économie dans la dépendance au pétrole. Cette dépendance s'illustre principalement par deux indicateurs : la part des hydrocarbures dans les exportations et la part des revenus tirés des hydrocarbures dans les revenus de l'État.

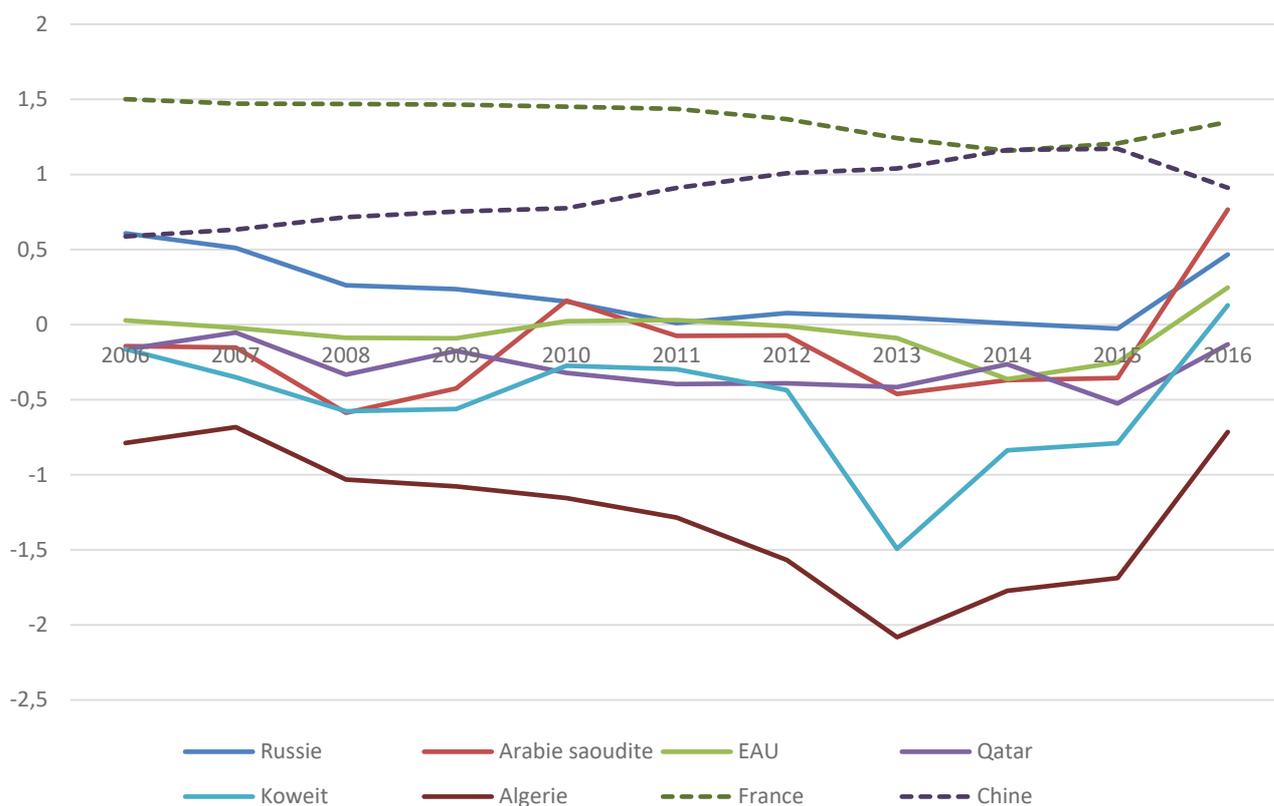
Les hydrocarbures représentent ainsi plus des trois quarts des exportations⁷⁸ pour 9 des 15 premiers pays exportateurs (Arabie saoudite, Irak, Nigeria, Koweït, Qatar et Algérie – pour le Venezuela et l'Angola, les estimations dépassent les 80 % ; pour l'Iran, la part s'est réduite suite à l'instauration des sanctions onusiennes fin 2006 mais dépassait les 80 % dans les années 2000) et ainsi le principal moyen pour ces pays de s'intégrer dans l'économie mondiale (Tableau 9). Si la diversité des exportations progresse depuis 2000, la sophistication de ces exportations demeure relativement faible.⁷⁹ L'indice de complexité économique développé par le MIT, qui s'appuie sur les mesures de diversité et de sophistication des exportations, illustre cette relative stagnation, voire dégradation, pour les pays exportateurs d'hydrocarbures (Figure 28 – la France et la Chine sont indiqués à titre de comparaison).

⁷⁷ W. Max Corden et J. Peter Neary, « Booming Sector and De-Industrialisation in a Small Open Economy », *The Economic Journal* 92, n° 368 (décembre 1982): 825, <https://doi.org/10.2307/2232670>.

⁷⁸ Un autre indicateur pertinent est celui de la part du secteur pétrolier dans le PIB. Pour certains pays, comme l'Iran, il permet d'observer une part plus faible, étant donnée la diversification de l'économie. Ce point est analysé dans le prochain paragraphe à l'aide de l'indicateur de complexité économique.

⁷⁹ Tim Callen et al., « Economic Diversification in the GCC: Past, Present, and Future », *Staff Discussion Notes* 14, n° 12 (2014): 1, <https://doi.org/10.5089/9781498303231.006>.

Figure 29 : Indicateur de complexité économique



Source : Observatory of Economic complexity, MIT

Cette concentration de l'économie entraîne une dépendance financière de l'État aux revenus issus du secteur pétro-gazier, qui s'élèvent à 78 % du budget pour l'Arabie saoudite, 80 % pour le Koweït et le Qatar, 65 % pour les EAU⁸⁰, et 25% pour la Russie.⁸¹ Ces revenus sont essentiels pour financer les dépenses sociales et les salaires du secteur public (50 % des dépenses courantes en Arabie saoudite en 2015⁸²), largement supérieurs à ceux du secteur privé. Ils sont également, aux yeux des dirigeants, un outil de stabilité politique, comme le montre l'augmentation des dépenses publiques après la vague révolutionnaire dans le monde arabe débutée au printemps 2011. Le prix du pétrole nécessaire pour équilibrer le budget (*fiscal breakeven*, voir Tableau 9), auquel il

⁸⁰ Laura El-Katiri, « Vulnerability, Resilience, and Reform: The GCC and the Oil Price Crisis 2014–2016 », *Center on Global Energy Policy*, décembre 2016, 31.

⁸¹ Aleksandra Malova et Frederick van der Ploeg, « Consequences of Lower Oil Prices and Stranded Assets for Russia's Sustainable Fiscal Stance », *Energy Policy* 105 (juin 2017): 27-40, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.022>.

⁸² Bassam Fattouh, Anupama Sen, et Tom Moerenhout, « Striking the Right Balance? GCC Energy Pricing Reforms in a Low Price Environment », *Oxford Institute of Energy Studies*, mai 2016, <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2016/04/Striking-the-Right-Balance-GCC-Energy-Pricing-Reforms-in-a-Low-Price-Environment.pdf>.

faut retirer le coût marginal de production, donne ainsi une approximation du « coût social » de la production.⁸³

Tableau 10: Indicateurs de dépendance des 15 premiers pays exportateurs de pétrole

	Exportations de pétrole (en mb/j)	Rente pétrolière en % du PIB en 2016	Rente ressources naturelles en % du PIB en 2016	Exportations d'hydrocarbures en % du total des exportations en 2016	Prix du pétrole nécessaire pour équilibrer le budget	PIB par tête en \$ en 2016	Taux de croissance moyen du PIB 2014-2017 en %	Ratio R/P du pétrole en année
Arabie Saoudite	7,3	26,4	27,2	79	84	20 028	2,46	62,3
Russie	5,1	7,0	11,5	47	NA	8 748	-0,23	27,2
Irak	2,8	42,4	42,4	100	54,3	4 609	3,35	107,9
EAU	2,7	14,5	15,3	20	67	37 622	2,91	72,4
Canada	2,7	0,3	1,0	18	NA	42 348	1,73	120,8
Nigéria	2,3	3,5	5,4	96	139	2 175	2,06	52,2
Angola	1,7	12,6	13,2	NA	82	3 308	2,28	18,1
Koweït	1,6	44,0	44,7	90	49	27 359	1,14	86,4
Venezuela	1,5	NA	NA	NA	117,5	NA	-8,87	303,0
Norvège	1,4	3,8	5,8	53	NA	70 867	1,46	11,4
Iran	1,3	13,6	16,0	NA	51,3	5 219	3,17	107,6
Kazakhstan	1,3	10,1	15,0	61	NA	7 714	2,21	51,4
Qatar	1,2	16,3	21,1	82	52,9	59 324	3,29	44,5
Mexique	1,2	1,5	2,6	5	NA	8 208	2,22	9,0
Algérie	0,8	10,9	13,6	94	64,7	3 916	3,16	24,0

Source : Banque mondiale

Le cas de l'Arabie saoudite illustre cette vulnérabilité sociale des États rentiers. Le secteur public, dont fait partie le secteur pétrolier, représente près des deux tiers du PIB et le secteur privé dépend largement des commandes publiques.⁸⁴ Lors de la chute des prix des hydrocarbures, le gouvernement a dû puiser dans ses réserves de change, qui ont fondu de près d'un tiers entre 2014 et 2017, et a dû se résoudre à emprunter sur les marchés internationaux. Le gouvernement a également décidé un gel des dépenses publiques, qui avaient pourtant augmenté chaque année entre 2003 et 2015⁸⁵, entraînant la réévaluation de certains avantages de la population, avec notamment une hausse des prix de l'énergie. Les subventions à l'énergie dans les pays exportateurs constituent d'ailleurs un défi important à relever.⁸⁶ Elles forment l'une des bases du contrat social

⁸³ Dale et Fattouh, « Peak Oil Demand and Long-Run Oil Prices ».

⁸⁴ Jane Kinninmont, « Vision 2030 and Saudi Arabia's Social Contract », Research Paper (Chatham House, juillet 2017), <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2017-07-20-vision-2030-saudi-kinninmont.pdf>.

⁸⁵ Kinninmont.

⁸⁶ Fattouh, Sen, et Moerenhout, « Striking the Right Balance? GCC Energy Pricing Reforms in a Low Price Environment ».

implicite entre les gouvernements des pays exportateurs et leur population, en permettant à cette dernière de bénéficier d'un prix ne reflétant pas celui auquel il est acheté sur le marché international. Elles sont toutefois remises en cause à la fois par les incertitudes autour du prix du pétrole, mais également par les objectifs de réduction des émissions de GES.⁸⁷ La communication gouvernementale intense autour de ces réformes fait mesurer la sensibilité de la question en termes de stabilité politique. Plus généralement, l'augmentation rapide de la population dans les pays du Conseil de coopération du Golfe (CCG) dans la prochaine décennie devrait mécaniquement réduire le niveau de rente pétrolière *per capita*.

Pour sa part, la Russie, bien qu'elle affiche un niveau de dépendance à la rente moindre que certains pays du Golfe, a montré tout au long de son histoire récente que les variations de prix du pétrole pouvaient avoir des conséquences politiques, économiques et sociales immédiates. La chute des cours du pétrole et leur forte volatilité dans les années 1980 ont par exemple pesé sur les évolutions politiques internes de l'URSS. De même, le cycle bas des prix durant les années 1990 a entravé les efforts de Boris Eltsine de relancer l'économie, tout comme le cycle de prix haut débuté au tournant des années 2000 a largement favorisé l'affirmation de Vladimir Poutine à la tête de l'État russe. Les revenus tirés des hydrocarbures comptent de plus en plus dans le budget consolidé de l'État, passant de 19 % en 2004 à plus de 31 % en 2014 (respectivement 30 % et 51% du budget de l'État fédéral)⁸⁸, et comptent pour 7,6 % du PIB en 2017.⁸⁹ À l'instar des pays exportateurs du Golfe, le contrat social tacite entre la société russe et son gouvernement, consistant – grossièrement – à passer outre les pratiques de prédateurs des élites et les restrictions de liberté contre une amélioration des conditions de vie, s'avère plus difficile à respecter dans des conditions de prix bas.

Des conséquences sur la scène internationale

Au-delà de l'aspect économique et socio-politique interne aux pays exportateurs, les ressources en hydrocarbures constituent également un facteur de puissance et d'influence sur la scène internationale (Klare, 2001, 2008, 2012). Or, la transition

⁸⁷ Jim Krane, « Navigating the Perils of Energy Subsidy Reform in Exporting Countries », Baker Institute Policy Report (Rice University's Baker Institute, mai 2014), <https://www.bakerinstitute.org/files/8679/>; Frederick van der Ploeg, « Fossil Fuel Producers under Threat », *Oxford Review of Economic Policy* 32, n° 2 (2016): 206-22.

⁸⁸ Nadia Sabitova et Chulpan Shavaleyeva, « Oil and Gas Revenues of the Russian Federation: Trends and Prospects », *Procedia Economics and Finance* 27 (2015): 423-28, [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01016-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01016-3).

⁸⁹ Banque mondiale, *Russian economic report: from recession to recovery*, mai 2017.

énergétique mondiale pourrait participer à réduire les bénéfices politiques que certains pays tiraient de l'exportation de leurs hydrocarbures. Comme pour le charbon à partir des années 1960, le pétrole continuera d'être consommé mais sa valeur économique et géopolitique diminuera fortement⁹⁰.

L'exemple le plus éloquent de ce point de vue est fourni par l'Arabie saoudite, qui a noué une alliance politico-sécuritaire extrêmement solide et durable avec les États-Unis dès les années 1930 autour de l'exportation de son pétrole destiné alors à l'armée américaine. Prévoyant le déclin de la production pétrolière américaine, F. D. Roosevelt propose à Ibn Saoud en 1945 la protection militaire des États-Unis contre un accès privilégié aux réserves saoudiennes. Cette alliance stratégique, parfois résumée au « Pacte du Quincy »⁹¹, devient un axe essentiel de la politique étrangère américaine dans les décennies qui suivent, réaffirmée notamment sous la présidence de Jimmy Carter (*Carter doctrine*) et de George W. Bush en 2005. La diminution progressive des importations américaines depuis le début des années 2010 et la perspective de voir les États-Unis devenir exportateur net de pétrole avant 2030⁹², à la faveur de l'exploitation des ressources non conventionnelles, représentent ainsi une source d'inquiétude économique et politique pour les Saoudiens, qui pourraient craindre une fragilisation de leur alliance avec Washington.

Le prix du pétrole représentait également un moyen de pression géopolitique durant ces dernières décennies. Les Saoudiens, à travers l'OPEP, ont ainsi su jouer de leur influence sur le cours du baril pour défendre leurs intérêts sur la scène internationale. Ce fut par exemple le cas lors de la décision de l'OPEP en 1973 d'établir un embargo en réaction à la guerre du Kippour, qui eut des conséquences mondiales, en particulier sur les économies occidentales. Plus récemment, la chute des prix de 2014 et leur maintien à un niveau bas sont en grande partie dus à la volonté de l'Arabie saoudite d'affaiblir économiquement l'Iran et des producteurs américains de pétrole non-conventionnels, avec qui elle est en confrontation pour le leadership régional. Il est difficile d'envisager, au vu des évolutions en cours (voir Partie I), que ce contrôle des prix par quelques acteurs - au premier rang desquels l'Arabie saoudite - puisse se perpétuer à long terme.

⁹⁰ Cherif et al., « Riding the Energy Transition ».

⁹¹ Du nom du bateau où se rencontrèrent en février 1945 F.D. Roosevelt et Ibn Saoud, bien que les historiens aient démontré depuis que le pétrole n'avait pas fait partie des discussions ce jour-là. Voir <https://orientxxi.info/magazine/de-quoi-parlaient-le-president-americain-et-le-roi-saoudien-en-fevrier-1945.1213>

⁹² « World Energy Outlook 2017 ».

La Russie a également souvent été accusée de manier l'« arme énergétique » à des fins géopolitiques (bien que cette notion d'« arme énergétique » soit soumise à discussion, étant donné le peu de résultat politique concret qu'elle a pu engendrer⁹³). Cette accusation porte principalement sur l'usage à des fins politiques de ses exportations de gaz (que ce soit les questions de volume, de tarifs ou de transit), en particulier à l'encontre de ses voisins (pays Baltes, Géorgie, Ukraine) et de l'Union européenne. La dépendance de cette dernière au gaz russe, de 34 % en 2017 (Turquie comprise) mais qui pourrait atteindre 40 % à moyen terme⁹⁴, demeure ainsi problématique, d'autant que le gaz pourrait être considéré par l'UE comme une énergie essentielle à la transition énergétique, plaçant la Russie comme un acteur essentiel du futur dispositif énergétique européen. Toutefois, la part encore importante des contrats « long terme » dans les approvisionnements européens et le fait que le marché européen représente près de 80% des exportations de Gazprom nuance la thèse d'une UE à la merci des pressions russes en matière gazière. Du fait des sources d'approvisionnement alternatives plus aisées à mobiliser, ces inquiétudes observées autour du gaz se révèlent moins aiguës concernant les exportations de pétrole vers l'UE, dont la Russie est pourtant le premier fournisseur à hauteur de 27,7 % en 2015⁹⁵.

Les marges de manœuvre des pays exportateurs en matière de politique étrangère pourraient ainsi se réduire avec la transition énergétique. Le volet militaire n'échappe pas à cette observation. Les revenus tirés de l'exportation des hydrocarbures permettent par exemple à l'État russe de financer des dépenses militaires qui se sont élevées jusqu'à 4,8 % du PIB en 2015 (3,9 % en 2018)⁹⁶. Une baisse de ces revenus pourrait ainsi freiner la Russie dans la modernisation de son outil militaire, entamée depuis les débuts des années 2010. Cet état de fait se retrouve au sein d'autres pays exportateurs, comme l'Arabie saoudite dont les dépenses militaires s'élèvent à 11,3 % du PIB en 2017 et qui mène actuellement une guerre coûteuse au Yémen.

⁹³ Karen Smith Stegen, « Deconstructing the “Energy Weapon”: Russia’s Threat to Europe as Case Study », *Energy Policy* 39, n° 10 (octobre 2011): 6505-13, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.051>.

⁹⁴ James Henderson et Jack Sharples, « Gazprom in Europe – two Anni Mirabiles but can it continue ? », *Insight 29* (The Oxford Institute for Energy Studies, mars 2018), <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/03/Gazprom-in-Europe-%E2%80%93-two-Anni-Mirabiles-but-can-it-continue-Insight-29.pdf>.

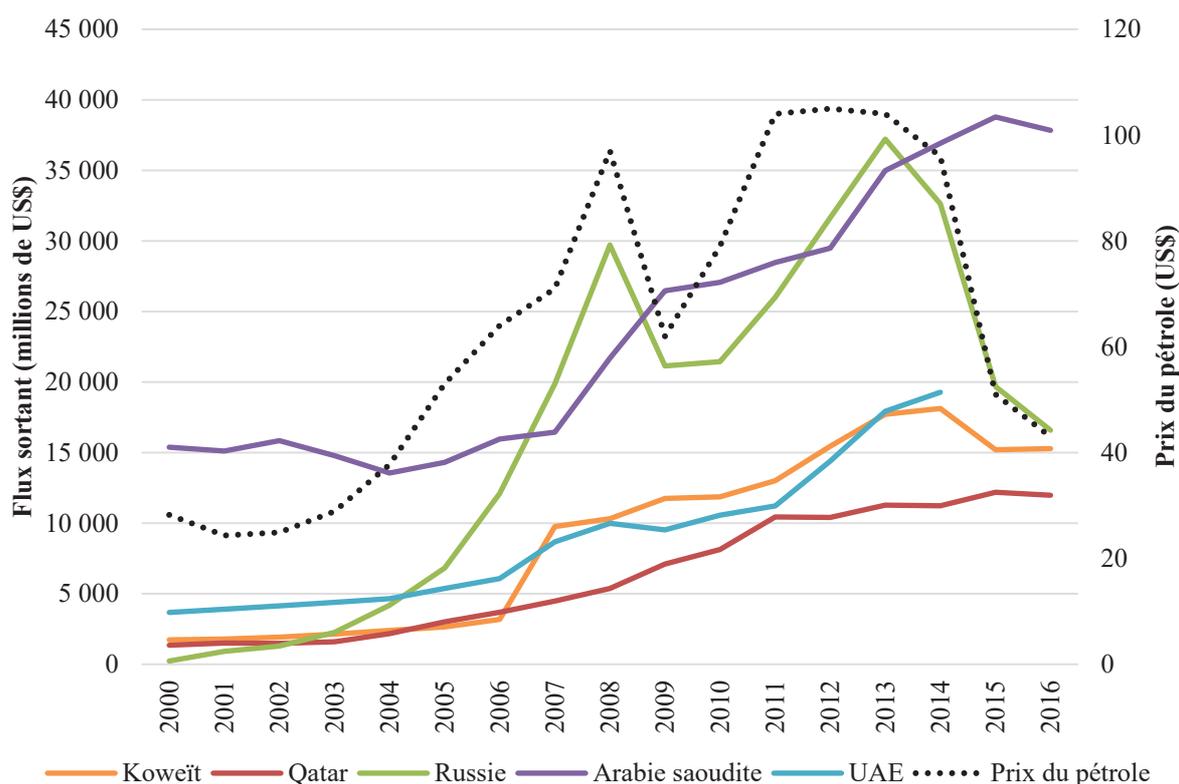
⁹⁵ Source Eurostat.

⁹⁶ The Military Balance 2018.

Au-delà de la place de l'énergie dans leur politique étrangère, une diminution des revenus des pays exportateurs, ou du moins les évolutions de leur modèle économique, peut engendrer des conséquences plus diffuses sur la scène internationale, liées à leur rôle dans l'économie régionale et mondiale. La Russie, en tant que moteur économique de la Communauté des Etats indépendants (CEI) et en particulier de l'Union économique eurasiatique (UEE), entraîne dans son sillage un certain nombre de pays (pour certains eux-mêmes exportateurs d'hydrocarbures comme le Kazakhstan, le Turkménistan et l'Azerbaïdjan). Le ralentissement économique de la Russie à la suite de la chute des cours de 2014 et de l'introduction de sanctions internationales à son encontre s'est ainsi traduit par un ralentissement similaire dans les pays de la région, provoquant le mécontentement des populations locales. À cela s'ajoutait la diminution des fonds envoyés par les millions de travailleurs migrants en Russie dans leur pays d'origine (*remittances*) de plus de 20 milliards de dollars selon la Banque mondiale, soit une baisse de près de 45%, entre 2013 et 2016, alors qu'ils représentent une manne financière essentielle pour les pays récipiendaires (plus d'un tiers du PIB du Tadjikistan par exemple). Cette problématique se retrouve au sein des pays exportateurs du CCG, qui accueillent plus de 25 millions de travailleurs migrants issus pour la plupart du sous-continent indien. L'Arabie saoudite est ainsi à l'origine de plus de 37 milliards de dollars d'envois de fonds en 2016, au deuxième rang mondial derrière les États-Unis. Les variations du prix du pétrole ne semblent toutefois pas avoir les mêmes conséquences qu'en Russie sur le flux sortant de fonds (Figure 29) mais la situation pourrait évoluer avec un maintien des prix bas et les évolutions des marchés du travail locaux (voir plus haut)⁹⁷. Une partie de la population, souvent la plus pauvre, du Pakistan, d'Inde et du Bangladesh, serait alors exposée à des difficultés économiques supplémentaires.

⁹⁷ « Is there a link between oil prices and remittances? | World Economic Forum », consulté le 25 août 2018, <https://www.weforum.org/agenda/2016/05/is-there-a-link-between-oil-prices-and-remittances>.

Figure 30 : Évolutions des envois de fonds en fonction du prix du pétrole



Source : Banque mondiale

Le rôle des pétrodollars dans l'économie mondiale comme dans le financement de la dette de certains pays occidentaux au premier rang desquels les États-Unis pourrait être remis en cause, entraînant un rééquilibrage encore incertain de l'ordre économique international.⁹⁸

Enfin, la littérature récente démontre que les revenus tirés des hydrocarbures contribuent à la stabilité des régimes, qu'ils soient démocratiques ou non⁹⁹. Leur diminution peut donc avoir comme conséquences une instabilité plus importante au niveau mondial, d'autant que l'abondance de pétrole est également susceptible d'exacerber les tensions entre pays producteurs.¹⁰⁰ La perpétuation de l'instabilité en Libye, en Syrie et en Irak, ou bien les conséquences des sanctions internationales à l'encontre de l'Iran ou, dans une moindre mesure, de la Russie, empêchent une quantité non négligeable de pétrole d'atteindre les marchés et participent à maintenir les prix

⁹⁸ Hache, op.cit.

⁹⁹ David Wiens, Paul Poast, et William Roberts Clark, « The Political Resource Curse: An Empirical Re-Evaluation », *Political Research Quarterly* 67, n° 4 (décembre 2014): 783-94, <https://doi.org/10.1177/1065912914543836>.

¹⁰⁰ Van de Graaf, « Battling for a Shrinking Market ».

hauts ou les parts de marché de certains acteurs. Ces derniers pourraient ainsi être tentés de considérer la stabilité de certaines régions comme n'allant pas dans le sens de leurs intérêts économiques.

3.2 Les choix à venir : comment s'adapter ?

Comme évoqué précédemment, les États exportateurs d'hydrocarbures n'ont pas attendu 2015 et l'Accord de Paris pour commencer à diversifier leur économie, les débats sur l'après-pétrole ou la dépendance aux matières premières remontant aux années 1970. La transition énergétique en cours dans les principaux marchés de l'énergie, qui s'appuie sur une évolution rapide des technologies bas-carbone, la prise de conscience autour du changement climatique et les incertitudes sur le marché pétrolier créent toutefois une forme d'urgence inédite, qui pressent les gouvernements à engager les transformations nécessaires. Trois enjeux principaux peuvent être distingués, bien qu'ils soient évidemment liés entre eux :

- la valorisation des réserves pétrolières restantes ;
- l'adaptation du modèle économique (voire même, pour certains, du modèle social et politique) à une baisse des revenus tirés des hydrocarbures ;
- l'insertion dans la nouvelle économie de la transition énergétique (exportation de minerais, innovation technologique, production d'ENR...).

Valoriser les réserves de pétrole restantes

Le contexte de transition énergétique globale et de lutte contre le changement climatique expose les investisseurs du secteur des hydrocarbures à un certain nombre de risques, qui pénalisent d'ores et déjà les pays exportateurs¹⁰¹. L'engagement, certes non-contraignant, pris lors de la COP 21 de limiter la hausse de la température moyenne de l'atmosphère à 2°C (et même en deçà si cela est possible) d'ici 2100 par rapport aux niveaux préindustriels implique en effet de laisser inexploités, d'ici 2050, 33 % des réserves de pétrole et 49 % des réserves de gaz au niveau mondial (*unburnable fossil fuels*)¹⁰². Au Moyen-Orient, 38 % des réserves pétrolières et 61 % des réserves gazières sont concernées, ainsi que, respectivement 18 % et 50 % dans l'espace post-soviétique.¹⁰³

¹⁰¹ « Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System » (IRENA, IEA, 2017).

¹⁰² Christophe McGlade et Paul Ekins, « The Geographical Distribution of Fossil Fuels Unused When Limiting Global Warming to 2 °C », *Nature* 517, n° 7533 (janvier 2015): 187-90, <https://doi.org/10.1038/nature14016>.

¹⁰³ *Ibid.*

En venant s'ajouter aux incertitudes déjà évoquées autour de l'évolution du prix et de la demande, les politiques de lutte contre le changement climatique font craindre aux investisseurs du secteur des hydrocarbures la multiplication des actifs échoués (*stranded assets*), c'est-à-dire les investissements qui ne parviendront pas à être rentables sur la durée de vie de l'infrastructure du fait, notamment, de l'application des politiques climatiques. Bien qu'il concerne l'ensemble des acteurs du secteur des hydrocarbures, le risque d'actifs échoués est toutefois plus fort dans les pays où le coût marginal de production est le plus élevé, que ce soit du fait de l'exploitation de réserves non conventionnelles ou bien difficiles d'accès (Arctique). Ainsi, les États-Unis seraient les premiers exposés avec 412 milliards de dollars de projets autour de réserves « inexploitable » d'un point de vue climatique d'ici 2025, suivis par le Canada (220 milliards), la Chine (179 milliards), la Russie (147 milliards) et l'Australie (103 milliards).¹⁰⁴

Ces risques pèsent déjà sur les capacités des acteurs à attirer des investissements, notamment dans le secteur de l'exploration. Le montant et la nature des investissements dans l'amont pétrolier ont ainsi diminué de 50 % entre 2014 et 2016 et semblent désormais s'orienter sur des projets de court et moyen termes¹⁰⁵. Cette situation pourrait induire une sous-capacité de production par rapport à la demande estimée en pétrole d'ici 2040. À cela s'ajoute une vague grandissante de désinvestissements portée par la société civile et certaines institutions publiques et privées (universités, ONG, mais aussi certains fonds souverains comme celui de la Norvège)¹⁰⁶. On estimait, en juin 2017, à plus de 5 000 milliards de dollars le montant des désinvestissements.¹⁰⁷

Pour valoriser leurs réserves en pétrole dans ce contexte, les pays exportateurs dont le ratio R/P s'élève pour certains à plus d'un siècle (voir Tableau 9) peuvent arbitrer entre trois stratégies, dont les deux premières sont opposées.¹⁰⁸

La première consiste à augmenter le volume de production pour vendre la plus grande quantité de pétrole dès à présent, tant que la demande se maintient à un niveau relativement élevé. Évidemment, cette situation ferait diminuer les prix, et favoriserait

¹⁰⁴ Van der Ploeg, « Fossil Fuel Producers under Threat ».

¹⁰⁵ « World Energy Outlook 2017 ».

¹⁰⁶ Julie Ayling et Neil Gunningham, « Non-State Governance and Climate Policy: The Fossil Fuel Divestment Movement », *Climate Policy* 17, n° 2 (17 février 2017): 131-49, <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1094729>.

¹⁰⁷ Van de Graaf, « Battling for a Shrinking Market ».

¹⁰⁸ Van de Graaf.

l'apparition du phénomène identifié comme le paradoxe vert (*green paradox*)¹⁰⁹ : de manière schématique, la transition énergétique, provoquant une baisse de la demande en pétrole, ferait baisser son prix, ce qui relancerait son attrait aux yeux des consommateurs et freinerait les efforts de transition. En réalité, du fait notamment des contraintes techniques de l'industrie pétrolière, ce risque est relativement faible¹¹⁰. Au-delà de la relation de causalité entre le prix du baril et le nombre de brevets bas-carbone déposés, le secteur des ENR semble avoir atteint un niveau de maturité qui le décorrèle en partie de l'évolution du secteur des hydrocarbures. Les investissements dans les capacités de production ENR n'ont en effet pas été affectés par la chute des prix du pétrole de 2014-2016¹¹¹, conséquence du fait que ce type d'investissements se fait principalement en réponse à des incitations hors marché (*feed-in tariffs*, subventions) les isolant des signaux prix du marché de l'énergie. Seuls les développements à court terme de certains secteurs, comme celui des biocarburants et, dans une moindre mesure, celui des véhicules électriques, pourraient être freinés par un cycle de prix bas¹¹². En outre, augmenter le volume de production nécessiterait de développer de nouvelles capacités de production, ce que tous les pays exportateurs ne sont pas en mesure de faire, en particulier dans le climat de risque qui entoure le secteur pétrolier.

La deuxième stratégie est l'inverse de la première : limiter la production pour conserver un niveau de prix élevé et la rente associée. Elle nécessite toutefois que l'ensemble des pays producteurs (OPEP et non-OPEP) s'accorde sur des quotas et les respecte. L'histoire démontre la difficulté d'un tel processus et, malgré l'entente actuelle avec la Russie notamment, il est hasardeux de l'envisager sur le long terme, surtout en réponse à des changements structurels du secteur de l'énergie. D'autre part, la corrélation entre hausse des prix du pétrole et hausse des dépenses de RD&D dans le secteur des ENR évoquée en partie II fait également supposer que le maintien d'un cours élevé ne ferait qu'accélérer la transition vers d'autres sources d'énergie.

Enfin, une troisième stratégie, d'ores et déjà mise en œuvre dans les principaux pays exportateurs du CCG notamment, consiste à augmenter la valeur ajoutée des exportations par le développement de l'aval pétrolier, notamment le raffinage et l'industrie

¹⁰⁹ Sinn, H. W. (2012). *The green paradox: A supply-side approach to global warming*. MIT press.

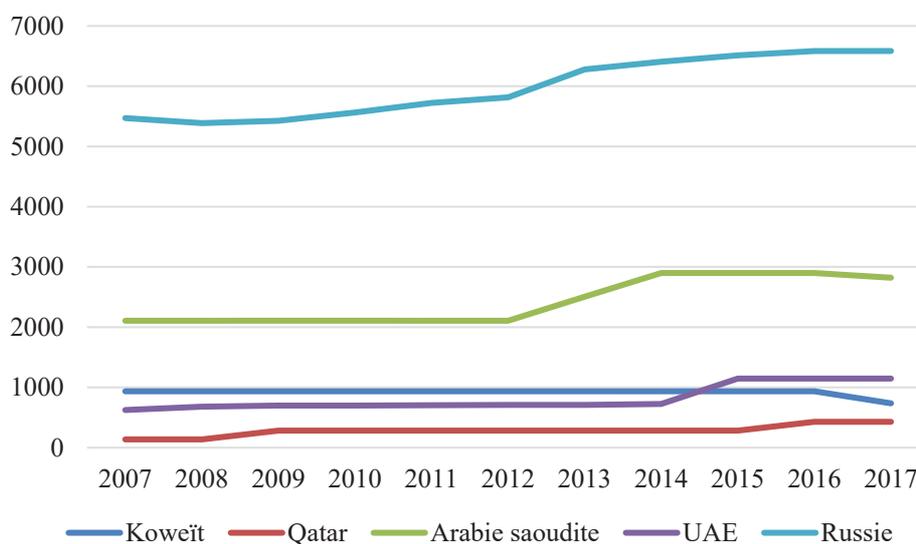
¹¹⁰ Robert D. Cairns, « The Green Paradox of the Economics of Exhaustible Resources », *Energy Policy* 65 (février 2014): 78-85, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.047>.

¹¹¹ Khan et al., « 2014 Oil Plunge ».

¹¹² Khan et al., « 2014 Oil Plunge ».

pétrochimique (Figure 30). L'AIE prévoit ainsi dans son New Policies Scenario que 34 % du pétrole brut au Moyen-Orient sera raffiné sur place en 2040 contre 25 % aujourd'hui, tandis que l'OPEP anticipe que 20 % des nouvelles capacités mondiales de raffinage d'ici 2040 seront localisées au Moyen-Orient¹¹³. L'Arabie saoudite, s'appuyant sur sa Vision 2030 (voir plus bas), a pris la tête des investissements dans le raffinage au Moyen-Orient. Sa compagnie nationale Saudi Aramco souhaite ainsi « capter et créer de la valeur à partir de chaque molécule d'hydrocarbure produite »¹¹⁴, en investissant massivement dans l'aval pétrolier. Elle aurait prévu 414 milliards de dollars d'investissements dans de nouvelles capacités de raffinage d'ici la fin des années 2020, à la fois en Arabie saoudite, mais également à l'étranger (Inde, Indonésie, Malaisie).¹¹⁵

**Figure 31 : Capacités de raffinage
(Milliers de barils par jour)**



Source : BP Statistical Review 2018

Quoi qu'il en soit, la manière de tirer le meilleur profit des réserves de pétrole restantes est essentielle puisqu'elle doit permettre le financement des deux autres enjeux auxquels font face les pays exportateurs : le changement de modèle économique et l'insertion dans l'économie de la transition énergétique.

¹¹³ "World Energy Outlook 2017" (AIE, 2018)

¹¹⁴ <http://www.saudiaramco.com/en/home/about/strategy.html>

¹¹⁵ <http://www.atlanticcouncil.org/blogs/energysource/saudi-aramco-s-downstream-push-will-increase-its-value>

La course à la diversification : des enjeux économiques et politiques

Ces dernières années, la majeure partie des principaux pays exportateurs ont établi des documents stratégiques qui mentionnent les grandes orientations économiques à suivre, à l'horizon d'une quinzaine voire d'une trentaine d'années (Tableau 10). Tous soulignent, parfois en creux, la nécessité de diversifier l'économie hors du secteur pétro-gazier.

Tableau 11: Exemples récents de stratégies de développement de pays exportateurs

Pays	Titre	Lancement
Abu Dhabi (EAU)	<i>Abu Dhabi Economic Vision 2030</i>	2008
Qatar	<i>Qatar National Vision 2030</i>	2008
Kazakhstan	<i>Kazakhstan 2050 Strategy</i>	2012
Dubaï (EAU)	<i>Dubai Clean Energy Strategy</i>	2015
Arabie saoudite	<i>Vision 2030</i>	2016
Azerbaïdjan	<i>Strategic roadmap</i>	2016
Nigeria	<i>National Strategy for Competitiveness in Raw Materials and Products Development in Nigeria</i>	2016
Émirats arabes unis	<i>UAE Energy Strategy 2050</i>	2017
Irak	<i>Iraq Vision 2030</i>	2017
Russie	<i>National Economic Security Strategy until 2030</i>	2017
Angola	<i>National Development Plan 2018-2022</i>	2018

Source : Gouvernements de pays mentionnés

Si l'on prend l'exemple de l'Arabie saoudite, la frénésie réformatrice en cours illustre bien cette urgence ressentie par certains dirigeants - en l'occurrence le jeune prince héritier Mohammed Ben Salmane (MBS) - de s'éloigner du modèle d'État rentier basé sur l'exportation de ressources pétro-gazières. Alors que les réflexions (et annonces officielles) sur la diversification nécessaire de l'économie remontent aux années 1970, la chute des cours de 2014 les a relancées avec une vigueur nouvelle. Dans un contexte de réorganisation du pouvoir en faveur de MBS, les autorités saoudiennes ont présenté, en 2016, l'initiative Vision 2030. Celle-ci prévoit une série d'objectifs ambitieux et sert tout à la fois de document de référence pour les réformes internes mais également de vitrine des volontés réformatrices de MBS à l'international, notamment à destination des investisseurs. Avec la baisse des dépenses publiques et la stimulation du secteur privé (nouvelles technologies, industrie du tourisme et du loisir, agroalimentaire), l'une des priorités est de développer les sources alternatives de revenus pour l'État¹¹⁶. Pour cela,

¹¹⁶ Kinnimont, « Vision 2030 and Saudi Arabia's Social Contract ».

Vision 2030 prévoit de faire du *Public Investment Fund* (PIF), créé en 1971, l'un des plus importants fonds souverains au monde. Il serait notamment abondé par la mise sur le marché de 5 % de la compagnie pétrolière nationale *Saudi Aramco* (et notamment les activités de raffinage) prévue dans un premier temps en 2018 puis en 2019, avec un objectif d'atteindre les 400 milliards de dollars d'actifs en 2020 et 2 billions en 2030¹¹⁷. Le PIF devrait permettre de diversifier les revenus de l'État à travers un retour sur investissement espéré de 8-9 % par an entre 2025 et 2030, contre 3 % aujourd'hui¹¹⁸. Il devrait également participer au développement de petites et moyennes entreprises, dans une logique de privatisation progressive de l'économie saoudienne. Les ENR font évidemment partie des réflexions et a été introduit l'objectif de produire 10 % d'électricité d'origine renouvelable d'ici 2023.¹¹⁹

Le développement du secteur privé et la stimulation de l'innovation nécessitent une certaine dose de liberté pour les citoyens et de respect de l'État de droit qui pourrait entrer en contradiction avec un régime aux pratiques encore autoritaires. Si Vision 2030 dépasse justement les simples orientations économiques en fixant des objectifs en matière sociétale (« a vibrant society ») et d'efficacité de l'État (« an ambitious nation »)¹²⁰, elle n'offre *a priori* pas de promesse de libéralisation politique. Ces frictions entre volonté de modernisation économique, conservatisme social et pratiques autoritaires et non démocratiques pourraient s'observer dans un certain nombre de pays exportateurs.

En outre, cette modernisation, et en particulier la réduction des dépenses de l'État et de son rôle au sein de l'économie, va inévitablement créer des gagnants et des perdants au sein de la société saoudienne¹²¹. Elle va notamment modifier les conditions de vie de millions de Saoudiens, particulièrement les jeunes, qui pourraient éprouver des difficultés à trouver une place dans un marché du travail devenu ultra-concurrentiel, et ce malgré les investissements dans le secteur éducatif. La moitié de la population saoudienne a moins de 25 ans aujourd'hui, ce qui devrait participer à plus que doubler le marché du

¹¹⁷ <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-10-22/how-saudi-arabia-is-building-its-2-trillion-fund-quicktake-q-a>

¹¹⁸ *Ibid.*

¹¹⁹ https://abonnes.lemonde.fr/economie/article/2017/04/18/l-arabie-saoudite-se-convertit-a-l-energie-verte_5112983_3234.html

¹²⁰ *Vision 2030*, Kingdom of Saudi Arabia, 2016.

¹²¹ Kinninmont, « Vision 2030 and Saudi Arabia's Social Contract ».

travail d'ici 2030, sans y compter une probable augmentation de la part des femmes¹²². De même, l'adoption d'un système économique libéral entraînera possiblement une demande de libéralisation des mœurs, à laquelle les autorités encore très conservatrices ne devraient pas répondre positivement. Ces frustrations potentielles pourraient mener à une remise en cause du contrat social qui prévaut, ou du moins exercer une pression politique inédite sur le gouvernement, pour lequel la stabilité reste la priorité absolue.

Enfin, il faut noter que si l'orientation globale des réformes apparaît comme irrémédiable, leur rythme et leur ampleur sont encore soumis à l'évolution des prix des hydrocarbures. L'introduction en bourse de *Saudi Aramco* semble ainsi, depuis 2017, moins prioritaire aux yeux de Ryad, du fait de la meilleure santé de l'économie saoudienne et serait même remise en cause en interne.¹²³ Elle devient donc un choix politique davantage qu'une nécessité économique pour MBS, qui voyait cette opération comme un pilier de sa modernisation de l'Arabie saoudite, à la fois en termes de financement, mais également en termes de signal lancé aux investisseurs.

Ces questionnements autour des choix économiques et politiques à venir sont partagés par l'ensemble des pays exportateurs d'hydrocarbures. Pour certains, plus fragiles économiquement socialement et politiquement comme le Venezuela, l'Algérie ou l'Azerbaïdjan, l'acuité des questionnements sur l'avenir du modèle de développement n'entraîne malheureusement pas les réformes nécessaires à ce jour. Notons que pour la Russie, la volonté des autorités de diversifier l'économie mais également les exportations d'hydrocarbures, en se tournant vers la Chine, revêt également un aspect géopolitique. Elle s'inscrit dans un contexte de tension avec l'Occident et notamment l'Union européenne, qui demeure son principal client énergétique.

S'insérer dans l'économie de la transition énergétique mondiale

Acteurs centraux du monde carbone, les pays exportateurs d'hydrocarbures disposent-ils du potentiel, et si oui, le développent-ils, pour s'insérer dans l'économie de la transition énergétique globale ?

¹²² Gassan Al-Kibsi et al., « Saudi Arabia beyond oil » (McKinsey Global Institute, décembre 2015), https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Featured%20Insights/Employment%20and%20Growth/Moving%20Saudi%20Arabias%20economy%20beyond%20oil/MGI%20Saudi%20Arabia_Full%20report_December%202015.ashx.

¹²³ <https://www.wsj.com/articles/doubts-grow-aramco-ipo-will-ever-happen-1530813982>

De manière assez peu surprenante, les pays exportateurs d'hydrocarbures disposent à ce jour d'une faible capacité de production ENR, en particulier si l'on classe à part le secteur hydroélectrique (Tableau 11 – la part élevée de la part des ENR dans la consommation finale du Nigeria s'explique par l'usage traditionnel de la biomasse). Le faible coût des hydrocarbures sur le marché domestique, du fait des subventions étatiques, freine considérablement le développement des capacités ENR. On observe toutefois, dans la plupart des pays exportateurs, une volonté parfois ancienne¹²⁴ de développer le secteur des renouvelables, porteur à la fois en termes d'image sur la scène internationale à l'heure d'un relatif consensus sur la lutte contre le changement climatique, mais également comme relais de croissance économique dans le cadre de la diversification¹²⁵ et réponse à la hausse de la demande en électricité.

Tableau 12: Énergie renouvelable et pays pétroliers

	Part des ENR dans la consommation finale en (%)	Capacités ENR totales (MW)	Capacités éoliennes (MW)	Capacités solaire PV (MW)	Émission de CO2 (tonne/habitant)
Algérie	0,06	663	10	400	3,7
Arabie saoudite	0	92	3	89	19,5
Azerbaïdjan	2,3	1 267	62	35	3,9
EAU	0,1	357	1	255	23,3
Irak	0,8	2 311	ND	37	4,8
Iran	0,9	12 263	191	111	8,3
Kazakhstan	1,6	2898	112	59	14,4
Koweït	0	41	10	31	25,2
Nigeria	86,6	2064	3	19	0,5
Qatar	0	43	ND	5	45,4
Russie	3,3	52179	11	186	11,9
Venezuela	12,8	ND	50	5	6
<i>Sources</i>	<i>Banque mondiale, 2015</i>	<i>IRENA, 2017</i>	<i>IRENA, 2017</i>	<i>IRENA, 2017</i>	<i>Banque mondiale, 2014</i>

Sources : Banque mondiale 2014, 2015, IRENA 2017

La situation, à la fois en termes de potentiel, de développement et de volonté politique, diffère toutefois sensiblement selon les pays exportateurs, y compris lorsqu'ils présentent un profil relativement similaire, comme au sein du CCG. Le Tableau 12, qui se base sur un

¹²⁴ Haris Doukas et al., « Renewable Energy Sources and Rationale Use of Energy Development in the Countries of GCC: Myth or Reality? », *Renewable Energy* 31, n° 6 (mai 2006): 755-70, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.05.010>.

¹²⁵ Montassar Kahia, Mohamed Safouane Ben Aïssa, et Lanouar Charfeddine, « Impact of Renewable and Non-Renewable Energy Consumption on Economic Growth: New Evidence from the MENA Net Oil Exporting Countries (NOECs) », *Energy* 116 (décembre 2016): 102-15, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.126>.

scénario de production d'électricité 100 % WWS (*Wind, water and sunlight*) en 2050, permet d'obtenir un aperçu intéressant du potentiel de chaque pays pour les différents types d'énergies. À l'exception de la Russie et du Kazakhstan, le solaire photovoltaïque se place en première position. Le coût de l'électricité photovoltaïque étant très sensible au facteur de charge et donc à l'ensoleillement, le solaire PV pourrait devenir dans les pays du CCG, où ce facteur de charge est élevé, une option économique ; et ceci plus rapidement que dans certains pays développés qui cherchent pourtant à développer le solaire, comme l'Allemagne. La géothermie et les énergies houlomotrices et marémotrices représentent une part négligeable de la production pour cet ensemble de pays et n'apparaissent donc pas dans le tableau.

Tableau 13 : Part de la demande finale d'électricité dans un scénario 100% WWS (Wind, water and sunlight) en 2050 (en %)

	Éolien onshore	Éolien offshore	Solaire PV	Solaire à concentration	Hydroélectricité
Algérie	32,6	0,0	55,1	12,0	0,2
Arabie saoudite	41,8	0,0	46,2	12,0	0,0
Azerbaïdjan	15,0	0,0	69,1	11,5	4,5
EAU	7,0	11,9	69,1	12,0	0,0
Irak	26,0	0,7	58,4	11,6	3,3
Iran	21,9	9,5	55,0	11,8	1,9
Kazakhstan	45,8	0,0	41,1	11,8	1,3
Koweït	1,2	11,7	75,1	12,0	0,0
Nigeria	6,3	0,0	81,0	11,9	0,6
Qatar	0,3	11,8	75,9	12,0	0,0
Russie	39,1	32,6	21,2	2,1	4,6
Venezuela	21,0	17,5	41,5	10,9	9,0

Source : Jacobson et al., 2017

Le gaz domine largement la production d'électricité dans la plupart des pays exportateurs, suivi par le pétrole. La hausse de la demande fait que certains pays, comme le Koweït et les EAU, sont désormais importateurs net de gaz.¹²⁶ Le développement des ENR dans les pays producteurs pourrait permettre de libérer un volume non négligeable de pétrole et de gaz pour l'exportation (ou réduire les importations), d'autant que les prix des ENR, et

¹²⁶ Le cas du Koweït est très particulier car ce dernier pays produit un brut très lourd et difficile à traiter et il préfère l'exporter pour augmenter ses revenus et profiter ainsi des flux de LNG pour importer du gaz et réduire ainsi ses émissions de GES.

du solaire en particulier, diminuent rapidement.¹²⁷ Il existerait ainsi deux manières de favoriser l'adoption des ENR dans ces pays : réduire les subventions aux hydrocarbures (voir plus haut) ou augmenter les subventions en faveur des ENR.¹²⁸ Le développement de ces dernières nécessiterait toutefois, pour les États, d'importants investissements dans les réseaux de distribution d'électricité.

Les situations diffèrent selon les pays exportateurs. Les EAU font la course en tête sur le secteur des ENR au sein du CCG, et plus largement parmi les pays exportateurs d'hydrocarbures. Dès 2007, Abu Dhabi signait une coopération avec le MIT pour développer le *Masdar Institute*, devenu central dans la stratégie de développement des énergies renouvelables au sein des EAU. Le projet phare *Masdar City* rassemble des entreprises et des institutions de recherches étrangères pour créer une ville entière neutre en carbone d'ici 2025. Plus généralement, les objectifs officiels sont d'atteindre 24 % d'énergie finale renouvelables en 2021, d'augmenter de 7 % les capacités ENR (Abu Dhabi) d'ici 2020, de 25 % d'ici 2030 (Dubai).¹²⁹ Le Qatar poursuit également cette stratégie de développement des coopérations internationales pour développer son secteur ENR. Malgré des institutions de recherche sur le solaire et quelques coopérations internationales avec les États-Unis, le Japon ou la France, les projets photovoltaïques peinent à se concrétiser en Arabie saoudite (Tableau 11). Les annonces du prince héritier MBS, lors de son séjour aux États-Unis en mars 2018, en faveur d'un investissement de 200 milliards de dollars pour construire 200 GW de capacités photovoltaïques d'ici 2030 pourraient changer la donne.¹³⁰ Enfin, en Russie, qui fut pionnière dans certaines technologies renouvelables comme l'éolien durant la période soviétique, le développement des ENR demeure lent malgré des coûts de plus en plus compétitifs (de l'éolien en particulier) par rapport aux énergies traditionnelles.¹³¹ Bien que le cadre réglementaire fût modifié en 2013 dans un sens favorable aux ENR, les difficultés

¹²⁷ Bassam Fattouh, Rahmatallah Poudineh, et Rob West, « The Rise of Renewables and Energy Transition: What Adaptation Strategy for Oil Companies and Oil-Exporting Countries? », *Oxford Institute of Energy Studies*, mai 2018, <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/05/The-rise-of-renewables-and-energy-transition-what-adaptation-strategy-for-oil-companies-and-oil-exporting-countries-MEP-19.pdf>.

¹²⁸ Rahmatallah Poudineh, « Rethinking energy policy in the MENA's hydrocarbon economies », *Forum*, Oxford Institute of Energy Studies, n° 108 (mars 2017), <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/04/OEF-108.pdf>.

¹²⁹ Steven Griffiths, « A Review and Assessment of Energy Policy in the Middle East and North Africa Region », *Energy Policy* 102 (mars 2017): 249-69, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.023>.

¹³⁰ <https://www.reuters.com/article/us-saudi-softbank-group/softbank-fund-saudi-arabia-to-create-worlds-biggest-solar-power-firm-idUSKBN1H40DN>

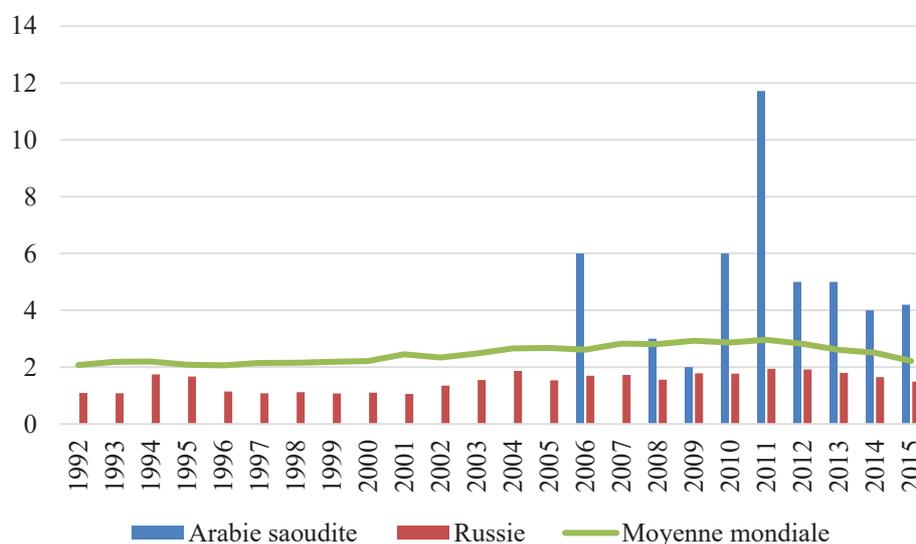
¹³¹ Tatiana A. Lanshina et al., « The Slow Expansion of Renewable Energy in Russia: Competitiveness and Regulation Issues », *Energy Policy* 120 (septembre 2018): 600-609, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.05.052>.

économiques ayant suivi la chute des cours du pétrole et l'instauration des sanctions internationales en 2014 ont participé à retarder les investissements nécessaires.

Comme évoqué en partie II, la transition énergétique participe à placer l'innovation en élément central de la compétitivité d'un pays au niveau mondial. Il s'agit donc de s'interroger, au-delà des objectifs officiels de développement de capacités et du montant des investissements pour les réaliser, sur la place des pays exportateurs dans le paysage de la R&D dans le secteur des technologies bas-carbone.

En s'appuyant sur la base Patstat, on observe que seules la Russie et l'Arabie saoudite déposent un nombre de brevets significatifs dans les technologies ENR. Les indices de spécialisations sur la période 2004-2014 montrent que la Russie tend à se concentrer sur l'éolien, l'hydroélectrique et les biocarburants, alors que l'Arabie saoudite l'est, de manière moins affirmée, dans les biocarburants seulement. Il est intéressant de souligner que les EAU, qui s'affirment en leader des ENR parmi les pays exportateurs, n'ont breveté que 4 inventions entre 1992 et 2014.

Figure 32 : Taille moyenne des familles de brevets des inventions brevetées



Source : PATSTAT

L'analyse de la taille des familles de brevets, qui donne une indication sur la valeur économique d'une invention (voir Partie 2.3), illustre en revanche le fait que la Russie produit des inventions destinées principalement au cadre national, à l'instar de la Chine. Les inventions saoudiennes, certes moins nombreuses, se situent en meilleures positions vis-à-vis des standards internationaux dans la mesure où elles sont souvent protégées

dans de multiples pays. De même, l'Arabie saoudite représente un poids légèrement supérieur en termes de brevets accordés par l'USPTO entre 2010 et 2014 et se place à égalité avec la Russie pour ce qui est des brevets délivrés par l'EPO sur la même période pour des inventions ENR.

Enfin, au vu de la demande en matériaux qui devrait, nous l'avons vu en partie I, augmenter dans le cadre de la transition énergétique (Tableau 13), certains pays exportateurs - au premier rang desquels la Russie - seraient susceptibles de s'insérer dans l'économie de la transition énergétique par le biais des matières premières.

Tableau 14 : Place de la Russie dans la production des matériaux dont la consommation subira une hausse d'au moins 50% selon un scénario 2DS

Matériau	% de la production mondiale	Rang mondial	2DS-RTS	B2DS-RTS
Aluminium	6,4%	2	70%	90%
Cuivre	/	/	61%	78%
Zinc	/	/	62%	74%
Argent	6%	4	81%	105%
Étain	0%	13	81%	105%
Plomb	5%	5	79%	98%
Zirconium	/	/	56%	21%
Indium	1%	8	81%	105%
Tantale	/	/	81%	105%
Manganèse	/	/	81%	105%
Molybdène	1%	9	81%	105%
Palladium	39%	1	81%	105%
Or	8%	3	81%	105%
Platine	11%	2	53%	11%

Source : USGS, 2018

La Russie se distingue en effet des autres pays exportateurs par des ressources minières importantes et variées. Seul le Kazakhstan, avec des ressources en uranium, en chrome et dans une moindre mesure en zinc exploite des ressources intéressantes du point de vue des technologies bas-carbone. La Russie se place donc en premier producteur de palladium avec plus de 39 % de la production mondiale, devant l'Afrique du Sud, considérant que la demande de ce métal devrait connaître l'une des plus fortes hausses (+81 %) dans le cadre d'un scénario 2DS, lié à son usage dans la catalyse automobile. Le pays est également le deuxième producteur d'aluminium (6,4 %), très loin derrière la

Chine (57,8 %), dont la demande atteindra +70 % dans le cadre du 2DS d'ici 2050, et troisième producteur d'or (8%) dont la hausse de la demande est évaluée à +81 %. Ces ressources devraient permettre à la Russie de bénéficier économiquement (voir géopolitiquement) de la diffusion à grande échelle des technologies bas-carbone. En tant que premier exportateur de gaz au monde, la Russie devrait également jouer un rôle clé dans les transitions énergétiques européenne et chinoise.

Pour certains pays du Golfe, en dépit d'un sous-sol moins généreux en termes de minerais, le faible coût de l'énergie constitue un avantage comparatif essentiel pour développer des industries à forte intensité énergétique, comme la production d'aluminium. Les EAU représentent ainsi 4,3 % de la production mondiale et l'Arabie saoudite s'est également lancée dans le secteur à la fin des années 2000.

L'un des écueils à éviter pour les pays exportateurs d'hydrocarbures serait de conserver une dépendance aux ressources naturelles, sans jamais engager de véritable diversification et sans jamais monter dans la chaîne de valeur mondiale. De nouvelles dépendances et/ou interdépendances pourraient se créer et agir au niveau géopolitique, en se superposant aux rapports de force liés aux hydrocarbures.

L'adaptation d'un certain nombre de pays exportateurs d'hydrocarbures à la transition énergétique mondiale, évoqués rapidement dans cette dernière partie, constituent un enjeu géopolitique essentiel. La transition énergétique va lourdement peser sur ces pays dans les décennies qui viennent, mais leurs évolutions politiques (et leurs conséquences sur la stabilité régionale) et économiques (et leurs liens avec les prix des hydrocarbures) influenceront également sur le cours de la transition elle-même¹³². De futures recherches amèneront à définir une typologie des différentes vulnérabilités des pays exportateurs de pétrole et de gaz, ainsi que de leurs capacités d'adaptation à la transition énergétique. Il serait intéressant d'y ajouter les risques (ou opportunités) pour ces pays liés au changement climatique, qui, à moyen et long termes, pèseront sur leurs choix en matière économique et énergétique et leur position au sein des négociations climatiques.

¹³² Fattouh, Poudineh, et West, « The Rise of Renewables and Energy Transition: What Adaptation Strategy for Oil Companies and Oil-Exporting Countries? »

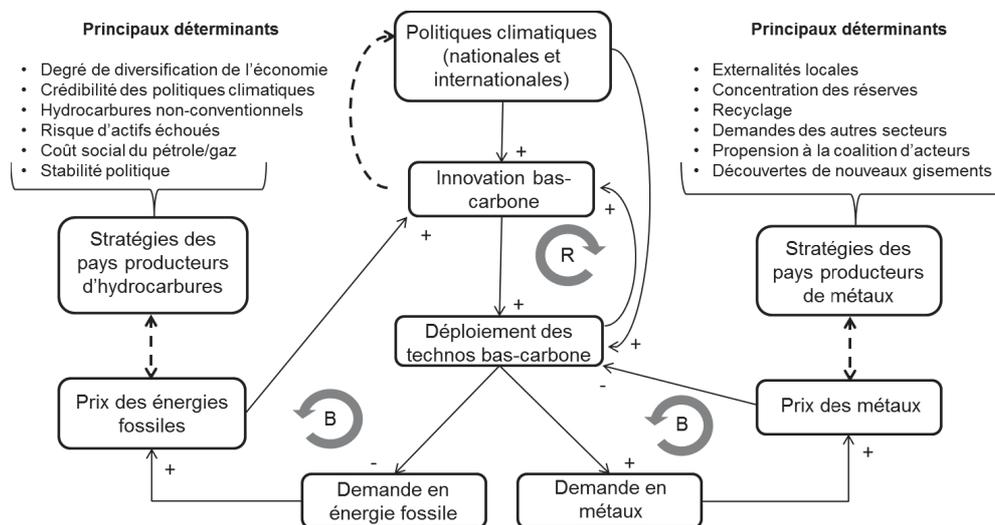
Enfin, ces réflexions sur l'adaptation des pays exportateurs d'hydrocarbures et les difficultés structurelles des économies rentières amènent à nous interroger sur les conséquences potentielles du besoin grandissant de certaines matières premières (voire partie I) du fait de la transition énergétique. Alors même que les effets néfastes de la rente énergétique freineront l'adaptation des pays exportateurs de gaz et de pétrole à la transition, cette même transition pourrait entraîner ou renforcer ces effets dans d'autres pays riches en ressources naturelles, en Amérique du Sud¹³³ (Chili, Argentine, etc.) et en Afrique notamment.

¹³³ <https://www.cfr.org/blog/latin-america-needs-more-home-grown-supply-chains>

CONCLUSION

Ce travail a cherché à analyser trois enjeux au cœur de la transition vers les énergies renouvelables : (1) l'importance des ressources minérales métalliques pour produire les technologies des ENR ; (2) les dynamiques d'innovation dans ces technologies et le rôle qu'elles confèrent aux règles de la propriété intellectuelle ; (3) les interactions entre la transition énergétique et les économies exportatrices de combustibles fossiles. Ces trois sous-systèmes interagissent au sein du système plus large que constitue la géopolitique des énergies renouvelables. Celle-ci peut être appréhendée comme un système complexe¹³⁴ et constitue un ensemble d'éléments ayant entre eux des interactions, c'est-à-dire des échanges d'énergie, de matière ou d'information. Ces interactions sont cruciales au sein d'un système complexe puisqu'elles garantissent que les états de ses éléments soient dépendants les uns des autres.¹³⁵ Finalement, le système a une mémoire, car la structure du système et les interactions font que l'état du système dépend de ses états passés et notamment des processus d'inertie de ce même système. La Figure 32 propose une représentation du système qui compose la géopolitique des énergies renouvelables. Nous la détaillons par la suite.

Figure 33: Principaux éléments et interactions de la géopolitique des énergies renouvelables.



¹³⁴ En dépit de l'absence de consensus quant à la définition du système complexe, nous pouvons nous fonder sur la caractérisation proposée par Ladyman, Lambert et Wiesner, 2013.

¹³⁵ Les éléments du système ne sont pas coordonnés dans le sens où l'ordre qui émerge du système est le produit de son désordre, et cet ordre est robuste dans la mesure où le manque de coordination des éléments n'empêche pas que soit préservés la structure et le comportement du système.

L'objectif de la Figure 32 n'est pas d'offrir une vue complète de la géopolitique des énergies renouvelables. Les éléments qui constituent le système sont eux-mêmes des sous-systèmes d'entités formant un groupe fortement lié par leurs interactions. Il n'est pas nécessaire, pour analyser le comportement du système, de connaître le fonctionnement de chaque élément : connaître leurs réactions aux autres éléments est suffisant pour en étudier les propriétés. Il est important de souligner que le système est ouvert dans le sens où il est lui-même partie d'un système plus large, régit notamment par les relations géopolitiques et économiques qu'entretiennent les pays et les acteurs impliqués dans la transition énergétique.

Les rectangles de la Figure 32 représentent les principaux éléments de la géopolitique des ENR. Des relations causales lient ces éléments. Le sens de la causalité à un moment donné est indiqué par le sens de la flèche et la nature de la corrélation entre les deux éléments est indiquée par le signe apposé au bout d'une flèche de causalité. Trois flèches en pointillés sont représentées sur la figure. Elles se distinguent des autres, car il est difficile d'établir *a priori* le signe de la corrélation. Ces relations sont pour ainsi dire « en construction » comme nous le verrons par la suite. Il faut souligner que les politiques climatiques impactent de deux manières le déploiement des ENR. D'une part, elles peuvent rendre profitable le déploiement de ces technologies *via* des taxes sur les énergies fossiles ou des subventions à la production d'énergie renouvelable (e.g. *feed-in tariffs*). D'autre part, les politiques climatiques génèrent des signaux qui incitent au développement de nouvelles technologies et stimulent ainsi l'innovation bas-carbone qui à son tour contribue au déploiement des ENR *via* l'amélioration de leur efficacité.

Tel qu'il est représenté, le système contient trois boucles de rétroactions. La première boucle est une boucle de rétroaction positive qui est bien connue et sur laquelle les politiques climatiques fondent de grands espoirs : c'est la boucle de l'apprentissage représentée par la flèche circulaire entourant un R pour « *reinforcing* ». Elle représente l'idée que l'innovation impacte positivement le déploiement des ENR, qui produit des retours d'expérience bénéficiant à l'innovation. Ces retours d'expérience sont les externalités d'adoption qui englobent le *learning-by-doing*, le *learning-by-using* et les externalités de réseaux qui définissent les gains additionnels qu'un utilisateur d'une technologie reçoit quand elle est adoptée par d'autres utilisateurs (Jaffe et al., 2005). Les

deux autres boucles sont des boucles négatives, indiquées par des flèches circulaires entourant un B pour « *balancing* ». Ces boucles de rétroaction sont cruciales pour appréhender les dynamiques de la géopolitique des ENR, car elles sont susceptibles d'annihiler, voire de surcompenser, les effets de la boucle de l'apprentissage. La boucle de gauche exprime le fait que l'innovation bas-carbone va participer à accroître le déploiement des ENR en les rendant plus attractives sur le plan économique. La conséquence de ce déploiement sera une réduction de la demande en énergie fossile et donc une baisse possible du prix de ces énergies. Il existe une boucle de rétroaction négative parce que la baisse du prix de l'énergie fossile impacte négativement l'innovation bas-carbone en rendant les projets ENR relativement moins rentables en comparaison des projets conventionnels. La seconde boucle de rétroaction négative, représentée sur la droite de la figure, est, elle aussi, liée aux ajustements des prix et aux évolutions de la demande, mais cette fois sur les marchés des matières premières métalliques. L'existence de cette boucle tient au fait que le déploiement des ENR contribuera à augmenter la demande en métaux. La conséquence directe d'une demande plus forte sera de faire, *ceteris paribus*, augmenter les prix des métaux, alourdissant ainsi le coût de production des technologies ENR ce qui freinera leur déploiement.

Ces deux boucles de rétroactions négatives tendent à réguler le système. Autrement dit, elles impliquent que l'innovation bas-carbone et le déploiement des ENR génèrent indirectement des effets qui les impacteront négativement par la suite. Dans ce cadre, les seuls stimuli au déploiement des ENR sont générés par les politiques climatiques et les externalités de leur adoption qui contribuent à en faire baisser les coûts (boucle de rétroaction positive).

L'originalité de ce travail est de démontrer que l'analyse de la transition énergétique ne doit pas se restreindre aux liens entre les politiques climatiques, l'innovation et le déploiement des ENR. Une vision plus large est nécessaire pour prendre en compte dans un premier temps les rétroactions négatives du déploiement des ENR *via* les secteurs des hydrocarbures et des métaux. D'autre part, il convient d'analyser de plus près la rétroaction de l'innovation sur les politiques climatiques pour s'assurer qu'une boucle positive se forme.

Les politiques de recyclage des métaux permettent de réduire le coût de la transition énergétique.

La hausse de la demande en métaux pour la production des technologies ENR risque de contribuer à faire augmenter les prix de ces métaux à long terme. La Figure 32 ne rend pas entièrement compte de la complexité des liens entre le secteur des ENR et le secteur de métaux et il est évident que les situations ne seront pas identiques pour le cuivre ou le lithium par exemple. Toutefois, on peut s'attendre à une réaction de la part des pays détenteurs des ressources en métaux qui pourraient disposer d'un pouvoir de marché plus fort ; la demande pour les métaux de la transition découlant directement de celle pour l'énergie. De plus, l'épuisement progressif des réserves pourrait contribuer à accroître la concentration des secteurs de la production des métaux. C'est un risque pour le déploiement des ENR qui peuvent voir leur coût croître suite à la hausse des prix des métaux. D'autres facteurs sont susceptibles de contribuer à cette augmentation. L'accumulation de pollution locale liée aux industries extractives provoque des oppositions à l'ouverture de nouveaux projets miniers et une demande croissante pour des procédés d'extraction plus respectueux de l'environnement, et donc plus coûteux. Il est également à craindre que le déploiement des ENR fasse augmenter le coût de l'énergie et donc indirectement le coût de production des métaux. Face à ces différents facteurs, les politiques de recyclage apparaissent comme une option efficace. Premièrement, le recyclage permet de rendre le secteur de la production plus compétitif dans la mesure où chaque pays peut devenir producteur, indépendamment de ses ressources minières. Deuxièmement, le recyclage génère moins de pollution locale que la production des métaux extraits d'une mine. Il permet ainsi une exploitation plus soutenable des mines restantes. Finalement, le recyclage des métaux nécessite généralement moins d'énergie que la production primaire et il permet ainsi de s'affranchir en partie d'une hausse du coût de l'énergie ; cette affirmation est d'autant plus vraie pour les métaux dits « structurels » toutefois le recyclage des métaux utilisés en petite quantité et dans des matrices complexes peut s'avérer très coûteux en énergie et donc non rentable (cas du lithium dans les batteries Li-ion par exemple). Tous ces facteurs participent à faire des politiques de recyclage un moyen d'atténuer la boucle de rétroaction négative qui existe entre le déploiement des ENR et les prix des métaux.

La diversification des économies productrices d'hydrocarbures est déterminante pour le déploiement des ENR.

Le déploiement des ENR est lié à l'évolution des prix des énergies fossiles de deux manières. Premièrement, les prix des énergies fossiles contribuent à déterminer la compétitivité relative des ENR par rapport aux technologies conventionnelles. Ainsi des prix hauts stimulent le déploiement des ENR. Deuxièmement, l'innovation bas-carbone et donc l'amélioration des technologies ENR est, comme nous l'avons vu, positivement impactée par une hausse des prix des énergies fossiles. Cette amélioration contribue ensuite à accroître l'attractivité des technologies ENR et accélère leur déploiement. Dans ce contexte, l'évolution des prix des énergies fossiles est déterminante. Or, comme nous l'avons détaillé, deux stratégies théoriques peuvent être adoptées par les pays producteurs vis-à-vis des prix. La première correspond à un choix de la part des producteurs d'exporter à bas prix leurs réserves restantes. La seconde est celle de la cartellisation des pays producteurs qui s'entendraient pour maximiser leurs marges unitaires en vendant à un prix élevé les énergies fossiles. Les pays détenteurs de ressources fossiles arbitreront entre ces deux stratégies selon le degré de diversification qu'ils souhaitent atteindre. La diversification de ces économies implique des investissements majeurs qu'un État sous contrainte budgétaire sera d'autant plus apte à réaliser qu'il dégagera à court terme une rente importante de l'utilisation de ses réserves. Pour cette raison, la diversification d'une économie pétrolière est plus difficile dans un contexte de prix bas. Dès lors, comment enjoindre les pays producteurs d'hydrocarbures à adopter une stratégie de diversification sur le long terme, et ainsi réduire le risque de *green paradox* ? La réponse tient dans la stabilité des politiques climatiques mises en place par les pays consommateurs. En cas de forte incertitude sur la pérennité des politiques climatiques, les pays producteurs d'hydrocarbures seront incités à maintenir la dépendance des pays consommateurs d'hydrocarbures en pratiquant des prix relativement bas. Au contraire, l'anticipation d'une sortie inéluctable des énergies fossiles enjoint les pays producteurs d'hydrocarbures à implémenter des stratégies de diversification de leurs économies à long-terme. Pour cette raison, la pérennité et la stabilité des politiques climatiques sont déterminantes pour réduire l'incertitude sur les niveaux de prix des hydrocarbures.

Les politiques climatiques doivent s'assurer que les droits de propriété intellectuelle ne deviennent pas un point de blocage de la négociation climatique.

Sur la Figure 32, une flèche en pointillés complète la boucle de rétroaction entre l'innovation bas-carbone et les politiques climatiques. Le caractère négatif ou positif de cette boucle dépendra de la répartition des droits de propriété intellectuelle sur l'innovation bas-carbone. Dans un scénario extrême, peu de pays détiennent l'ensemble des droits de propriété sur les technologies ENR, maintiennent leur leadership dans ces secteurs et peuvent ainsi vendre ces technologies au prix fort. La boucle de rétroaction qui se forme devient alors négative puisque les pays consommateurs de ces technologies se montreront réticents à prendre des engagements ambitieux de réduction de leurs émissions, en anticipant l'importance du coût de la transition énergétique, la perte de souveraineté technologique dans le secteur de l'énergie et la diminution de leur compétitivité économique. Un scénario opposé est celui dans lequel les droits de propriété intellectuelle sur les ENR sont distribués entre un nombre suffisant d'acteurs pour que, d'une part, une compétition s'amorce en vue de faire baisser les prix et, d'autre part, de nombreux pays prenant part aux négociations climatiques anticipent les retombées économiques positives de la transition énergétique. La boucle de rétroaction devient alors positive puisque l'innovation bas-carbone permet de réduire le coût de la transition et génère des gains économiques dans un large nombre de pays, renforçant alors les engagements pris lors des négociations internationales. Comme nous l'avons vu dans la partie II, le paysage mondial de l'innovation bas-carbone se rapproche davantage du premier scénario puisque la question des droits de propriété intellectuelle a, pour le moment, représenté un frein aux négociations internationales sur le climat. Pourtant, les évolutions récentes peuvent laisser penser que la situation pourrait s'inverser. Le virage vert amorcé par la Chine, premier émetteur de GES dans le monde, et son accumulation de connaissances dans les technologies des ENR rendent le pays plus favorable à la transition énergétique en lui offrant l'opportunité de devenir un exportateur majeur de ces technologies. Des pays fortement émetteurs comme l'Inde et la Russie accusent en revanche un retard certain dans ces technologies. Pour que ces États partagent l'ambition d'une transition énergétique vers les ENR, il est nécessaire qu'ils puissent avoir accès à ces technologies à un coût abordable. Dans cette optique, des efforts de négociations ne doivent donc pas porter exclusivement sur les objectifs de réduction des émissions de

GES, mais aussi de nouveaux outils traitant du transfert de technologie et du cofinancement des projets de R&D dans les ENR. ■

BIBLIOGRAPHIE

ADEME (2017), « Les scénarios 2030-2050 ». <https://www.ademe.fr/connaître/priorités-stratégiques-missions-lademe/scenarios-2030-2050>

Agence internationale de l'énergie (2017), « Energy Technology Perspectives. Tracking Clean Energy Progress ».

Agence Internationale de l'Énergie (AIE), « World Energy Outlook », Éditions 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017.

Agence internationale de l'énergie (2015) et Agence pour l'énergie nucléaire (AEN), « Projected Costs of Generating Electricity », 2015 Édition.

Alazard-Toux, N., Criqui, P., Devezeaux de Lavergne, J-G, Hache, E., Le Net, E., Lorne, D., Mathy, S., Menanteau, P., Safa, H., Teissier, O., Topper, B. (2014), « Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique », 115 p.

Alazard-Toux, N., Criqui, P., Devezeaux De Lavergne, J.-G., Hache, E., Le Net, E., Lorne, D., Mathy, S., Menanteau, P., Safa, H., Teissier, O., Topper, B., (2014). « Les scénarios de transition énergétique de l'ANCRE ». Revue de l'Énergie, 189-210.

Alazard-Toux, N., Criqui, P., Devezeaux De Lavergne, J.-G., Hache, E., Le Net, E., Lorne, D., S., Menanteau, S. Mima, F. Thais. (2017). « Scénario "loi de transition énergétique pour la croissance verte" de l'ANCRE : focus sur le mix énergétique ». HAL Post-Print, hal-01569649.

Alexeev, M., Conrad, R., (2005). « The Elusive Curse of Oil ». *Working Papers Series*, SAN05-07. Duke University, Terry Sanford Institute of Public Policy, http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=806224.

Al-Kibsi, G., Woetzel, J., Isherwood, T., Khan, J., Mischke, J., Noura, H (2015). « Saudi Arabia beyond oil ». McKinsey Global Institute, décembre. [https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Featured%20Insights/Employment%20and%20Growth/Moving%20Saudi%20Arabias%20economy%20beyond%20oil/MGI%20Saudi%20Arabia Full%20report December%202015.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Featured%20Insights/Employment%20and%20Growth/Moving%20Saudi%20Arabias%20economy%20beyond%20oil/MGI%20Saudi%20Arabia%20Full%20report%20December%202015.ashx)

Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE), (2015). Rapport Ressources minérales et énergie, 75p. (Disponible à l'adresse suivante : https://www.allianceenergie.fr/wp-content/uploads/2017/06/Ancre_Rapport_2015-Ressources_minerales_et_energie_0.pdf)

Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE) (2014), "Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique", 115p.

Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE) (2015), "Decarbonization Wedges Report", Novembre 2015, 55p.

Aranda Uson A., Lopez Sabiron A.M., Ferreira G., Llera Sastresa E., (2013). « Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry waste management options », *Renewable and sustainable energy reviews* 23.

Arent, D., Arndt, C., Miller, M., Tarp, F., Zinaman, O. (2017) et World Institute for Development Economics Research, éd. *The Political Economy of Clean Energy Transitions*. First edition. UNU-WIDER Studies in Development Economics. Oxford, United Kingdom: Oxford University Press.

Asia Pacific Energy Research Centre (2007), *A Quest for Energy Security in the 21st century*.

Association négaWatt (2017). « Scénarios 2017-2050 : Hypothèses et résultats ». <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2017-2050-hypotheses-et-resultats>

Auty R., (1993). *Sustaining Development in Mineral Economies: The Resource Curse Thesis*, Londres, Routledge.

Ayling, J., Gunningham, N. (2017). « Non-State Governance and Climate Policy: The Fossil Fuel Divestment Movement ». *Climate Policy* 17, n° 2 : pp. 131-49. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1094729>.

Banque mondiale (2017). « The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future », 112p. <http://documents.worldbank.org/curated/en/207371500386458722/The-Growing-Role-of-Minerals-and-Metals-for-a-Low-Carbon-Future>

Barton, J., H., (2007). « Intellectual Property and Access to Clean Energy Technologies in Developing Countries. An Analysis of Solar Photovoltaic, Biofuel and Wind Technologies ». Trade and Sustainable Energie Series, ICTSD Programme on Trade and Environment, December 2007.

Bertram, M., Graedel, T.E., Rechberger, H., Spatari, S., (2002). The contemporary European copper cycle: waste management subsystem. *Ecological economics* 42, pp. 43-57.

Blengini, G. A., Nuss P., Dewulf J., Nita V., Talens Peirò L., Vidal-Legaz B., Latunussa C., et al. (2017). « EU Methodology for Critical Raw Materials Assessment: Policy Needs and Proposed Solutions for Incremental Improvements ». *Resources Policy* 53: 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.008>.

Bointner, R., (2014). « Innovation in the energy sector: Lessons learnt from R&D expenditures and patents in selected IEA countries ». *Energy Policy*, Vol. 73, pp. 733-747.

Baudry, M., & Bonnet, C. (2017). Demand-pull instruments and the development of wind power in Europe: a counterfactual analysis. *Environmental and Resource Economics*, pp. 1-45.

Cairns, R.D. (2014) « The Green Paradox of the Economics of Exhaustible Resources ». *Energy Policy* 65 : 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.10.047>.

Calel, R., Dechezleprêtre, (2016). « Environmental Policy and Directed Technological Change: Evidence from the European Carbon Market ». *The review of economics and statistics*, Vol. 98, No. 1, pp. 173-191.

Callen, T., Cherif, R., Hasanov, F., Hegazy, A., Khandelwal, P., (2014) « Economic Diversification in the GCC: Past, Present, and Future ». *Staff Discussion Notes* 14, n° 12 : 1. <https://doi.org/10.5089/9781498303231.006>.

Cantwell, J., Janne, O., (1999). « Technological globalization and innovative centres: the role of corporate technological leadership and locational hierarchy ». *Research Policy*, Vol. 28, pp. 119-144.

Cherif, R., Hasanov, F., Pande, A., (2017) « Riding the Energy Transition: Oil Beyond 2040 ». *IMF Working Papers* 17, n° 120 : 1. <https://doi.org/10.5089/9781484301128.001>.

Chester, L, (2010). « Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature », *Energy Policy* 38, pp. 887-895.

Coenen, L., Benneworth, P., Truffer, B., (2012). « Toward a spatial perspective on sustainability transitions », *Research Policy* 41, pp. 968-979.

Collier, P., & Hoeffler, A. (2004), « Greed and grievance in civil war » *Oxford Economic Papers*, 56 (4), 563-595.

Commissariat à l'Énergie atomique et aux Énergies alternatives (CEA), Nuclear Power Plants in the World, 2015 – <http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/ouvrages/Elecnucl-2015.pdf>

Connolly, D., H. Lund, B.V. Mathiesen, et M. Leahy. (2010), « A Review of Computer Tools for Analysing the Integration of Renewable Energy into Various Energy Systems ». *Applied Energy* 87 (4): 1059-1082. doi:10.1016/j.apenergy.2009.09.026.

Corden, W. M., Neary, J. P., (1982) « Booming Sector and De-Industrialisation in a Small Open Economy ». *The Economic Journal* 92, n° 368: 825. <https://doi.org/10.2307/2232670>.

Crabb, J., M., Johnson, D., K.N., (2010). Fueling innovation: the impact of oil prices and CAFE standards on energy-efficient automotive technology. *The Energy Journal*, Vol. 31, n°1, pp. 199-216.

Criekemans, D., (2018). Geopolitics of Renewable Energy Game and Its Potential Impact upon Global Power Relations. *The Geopolitics of Renewables*. Scholten, Daniel (Ed.), pp. 37-73.

Criqui P., Mima S., (2012), “European climate-energy security nexus: A model based scenario analysis”, *Energy Policy*, 41, pp. 827-842.

Dale, S., Fattouh, B., (2018) « Peak Oil Demand and Long-Run Oil Prices ». *Oxford Institute of Energy Studies*, Energy Insight. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/01/Peak-Oil-Demand-and-Long-Run-Oil-Prices-Insight-25.pdf>.

Dang, J., Motohashi, K., (2015). Patent statistics: A good indicator for innovation in China? Patent subsidy program impacts on patent quality. *China Economic Review*, Vol. 35, 137-155.

De Perthuis, C. Solier, B. (2018). « La transition énergétique face au tempo de l'horloge climatique », *Information et débats* n°56, Chaire Économie du Climat.

Dewulf, J., Blengini, G., A., Pennington, D., Nuss, P., Nassar, N., T., (2016). Criticality on the international scene: Quo vadis? *Resources Policy*, Vol. 50, pp. 169-176.

Doukas, H., Patlitzianas, K. D., Kagiannas, A. G., Psarras, J., (2006). « Renewable Energy Sources and Rationale Use of Energy Development in the Countries of GCC: Myth or Reality? » *Renewable Energy* 31, n° 6 : 755-70. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.05.010>.

Dulong de Rosnier, M., Le Crosnier, H. (dir.), (2013). *Propriété intellectuelle. Géopolitique et mondialisation*. Paris, CNRS Éditions, Coll. « Les Essentiels d'Hermès ».

EDF – Le Cycle de Vie d'une Centrale Nucléaire - <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-cycle-de-vie-d-une-centrale-nucleaire>

El-Katiri, L., (2016). « Vulnerability, Resilience, and Reform: The GCC and the Oil Price Crisis 2014–2016 ». *Center on Global Energy Policy*, 31.

Elshkaki, A., Graedel, T.E, Ciacci, L., Reck, B.K. (2016), Copper demand, supply, and associated energy use to 2050, *Global Environmental Change*, Volume 39, pp.305-315.

European Commission, (2008). *The Raw Materials Initiative—Meeting our Critical Needs for Growth and Jobs in Europe*, COM(2008)699 final. European Commission (EC), Brussels, Belgium.

European Commission, (2011). *Tackling the Challenges in Commodity Markets and on Raw Materials*, COM (2011) 25 final. European Commission, Brussels, Belgium.

European Commission, (2014). *Report on Critical Raw Materials for the EU*, Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials. European Commission (EC), Brussels, Belgium.

European Commission, (2017). *Report on the 2017 list of Critical Raw Materials for the EU*. European Commission (EC), Brussels, Belgium.

Fattouh, B., Poudineh, R., West, R. (2018). *The Rise of Renewables and Energy Transition: What Adaptation Strategy for Oil Companies and Oil-Exporting Countries?*, *Oxford Institute of Energy Studies*. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/05/The-rise-of-renewables-and-energy-transition-what-adaptation-strategy-for-oil-companies-and-oil-exporting-countries-MEP-19.pdf>

Fattouh, B., Sen, A., Moerenhout, T., (2016) « Striking the Right Balance? GCC Energy Pricing Reforms in a Low Price Environment ». *Oxford Institute of Energy Studies*.

<https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2016/04/Striking-the-Right-Balance-GCC-Energy-Pricing-Reforms-in-a-Low-Price-Environment.pdf>

Fischer, T., Leiding, J., (2014). Testing patent value indicators on directly observed patent value – An empirical analysis of Ocean Tomo patent actions. *Research Policy*, Vol. 43, issue 3, pp. 519-529.

Forrester, Jay W., (1971). *World Dynamics*, Wright-Allen Press, Cambridge. Seconde Edition: Wright-Allen Press (1973).

Forrester, Jay W., (1989). *The Beginning of System Dynamics*. Banquet Talk at the international meeting of the System Dynamics Society Stuttgart, Germany July 13.

Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M A., Gutzmer, J., (2017). Raw material 'criticality'—sense or nonsense?, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50 123002.

Fu, X., Ueland, S.M., Olivetti, E. (2017). Econometric modeling of recycled copper supply, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 122, Pages 219-226.

Galvez-Behar, G., (2016). *Les Empires et leurs brevets. Les techniques et la globalisation au XXe siècle*. Hilaire-Pérez, L., Zakharova, L., Presses Universitaires de Rennes, pp. 281-296.

Gassan, Al-K., Woetzel, J., Isherwood, T., Khan, J., Mischke, J., et Noura, H. (2015). « Saudi Arabia beyond oil ». McKinsey Global Institute, décembre. https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Featured%20Insights/Employment%20and%20Growth/Moving%20Saudi%20Arabias%20economy%20beyond%20oil/MGI%20Saudi%20Arabia_Full%20report_December%202015.ashx.

Geels, F.W., Schot, J., (2010). The dynamics of socio-technical transitions: a sociotechnical perspective in grin. In: Rotmans, J., Schot, J. (Eds.), *Transitions to Sustainable Development: New Directions in the Study of Long Term Transformative Change*. Routledge, London.

Geldron, A. (2017). *L'épuisement des métaux et minéraux : faut-il s'inquiéter ?*, Note technique, ADEME, 23p.

Gemechu, E., Helbig C., Sonnemann G., Thorenz A., and Tuma A. (2016). 'Import-Based Indicator for the Geopolitical Supply Risk of Raw Materials in Life Cycle Sustainability Assessments: Import-Based Indicator for Geopolitical Supply Risk of Raw Materials', *Journal of Industrial Ecology*, 20, 154–65 <<https://doi.org/10.1111/jiec.12279>>

Giurco, D., Petrie, J.G (2007). Strategies for reducing the carbon footprint of copper: New technologies, more recycling or demand management?, *Minerals Engineering*, Volume 20, Issue 9, pp.842-853.

Glachant, M., Dechezlepretre, A., (2017). What role of climate negotiations on technology transfer? *Climate Policy*, Vol. 17, n°8, pp. 962-981.

Glöser, S., Soulier, M., Tercero Espinoza, L. A., (2013). Dynamics analysis of global copper flows. Global stocks, postconsumer material flows, recycling indicators, and uncertainty evaluation, *Environmental Science & Technology* 47, pp. 6564-6572.

Glöser, S., Tercero Espinoza, L.A., Gandenberger, C., Faulstich, M., (2015). Raw materials criticality in the context of classical risk assessment. *Resources policy*, 44, pp. 35-46.

Goe, M., Gaustad, G., (2014). Identifying critical materials for photovoltaics in the U.S. : A multi-metric approach. *Applied Energy*, Vol. 123, pp. 387-396.

Gomez, F., Guzman, J.I., Tilton, J.E., (2007). Copper recycling and scrap availability. *Resources Policy* 32, pp. 183-190.

Gordon, R.B., Bertram, M., Graedel, T.E., 2006. Metal stocks and sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 103, 1209–1214.

Graedel, T.E., Barr, R., Chandler, C., 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. *Environ. Sci. Technol.* 46, 1063–1070. <http://dx.doi.org/10.1021/es203534z>.

Graedel T. E., Harper E. M., Nassar N. T., Reck B. K., (2013). On the materials basis of modern society, *PNAS*.

Graedel, T.E, Nuss, P., (2014). Employing considerations of criticality in product design. *JOM* 66, pp.1-7.

Graedel T. E., Harper E. M., Nassar N. T., Nuss Philip, Reck B. K., (2015). Criticality of metals and metalloids, *PNAS*.

Graedel, T. E., Reck B. K. (2016). 'Six Years of Criticality Assessments: What Have We Learned So Far?: Six Years of Criticality Assessments', *Journal of Industrial Ecology*, 20, 692–99 <<https://doi.org/10.1111/jiec.12305>>

Grandell, L., Lehtila, A., Kivinen, M., Koljonen, T., Kihlman, S., Lauri, L.S. (2016), Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies, *Renewable Energy* 95, pp. 53-62.

Griffiths, S., (2017) « A Review and Assessment of Energy Policy in the Middle East and North Africa Region ». *Energy Policy* 102 : 249-69. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.023>.

Gordon, R.B., Bertram, M., Graedel, T.E., (2006). Metal stocks and sustainability. *Proc. Natl. Acad. Sci. États-Unis* 103, 1209–1214.

Gordon, R.B., M. Bertram, T.E. Graedel, (2007). On the sustainability of metal supplies: A response to Tilton and Lagos, *Resources Policy* 32, pp. 24-28.

Greenfield, A., Graedel, T.E, (2013) The omnivorous diet of modern technology, *Resources, Conservation and Recycling* 74, pp.1– 7.

Guellec, D., van Pottelsbergue de la Potterie, B. (2000). The Impact of Public R&D Expenditure on Business R&D. OECD Science, Technology and Industry Working Papers, 2000/04, OECD Publishing, Paris.

Gupeng, Z., Xiangdong, C., (2012). The value of invention patents in China: Country origin and technology field differences. *China Economic Review*, Vol. 23, pp. 357-370.

Hache, E., (2016), "La géopolitique des énergies renouvelables : amélioration de la sécurité énergétique et / ou nouvelles dépendances ?", *Revue Internationale et Stratégique*, n°101.

Hache, E., (2018), "Do renewable energies improve energy security in the long run?", *International Economics. In Press*, Février.

Hache, E., Palle, E. (2017), "Intégration des énergies renouvelables (EnR) variables sur les réseaux électriques : méthodologies, scénarios et conséquences industrielles", Rapport pour le CVT-Ancre, octobre, 128p.

Hache, E., Palle, A. (2019), "Renewable energy source integration into power networks, research trends and policy implications: A bibliometric and research actors survey analysis", *Energy Policy*, 124, Janvier, pp.23-35.

Hache, E., Simoën, M. (2018). Fiche Panorama « Inde : les défis de l'industrialisation et de la dépendance énergétique dans un contexte de changement climatique »

Harhoff, D., Wagner, S., (2009). The duration of patent examination at the European Patent Office. *Management Science*, Vol. 55, n° 12, pp. 1969-1984.

Hatayama, H., and Tahara K., (2018). 'Adopting an Objective Approach to Criticality Assessment: Learning from the Past', *Resources Policy*, 55, 96-102 <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.11.002>>

Helm, D., (2016) « The Future of Fossil Fuels—Is It the End? » *Oxford Review of Economic Policy* 32, n° 2 : 191-205. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grw015>.

Henderson, J., Sharples, J. (2018). Gazprom in Europe – two Anni Mirabiles but can it continue ?, *Insight 29*. The Oxford Institute for Energy Studies. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2018/03/Gazprom-in-Europe-%E2%80%93-two-Anni-Mirabiles-but-can-it-continue-Insight-29.pdf>

Hu, A., Zhang, P., Zhao, L., (2017). China as number one? Evidence from China's most recent patenting surge. *Journal of Development Economics*, Vol. 124, pp. 107-119.

Hicks, J., (1932). *The Theory of Wages*, London, Macmillan, pp. 124-125.

Intergovernmental Panel on Climate Change, (2014). Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IRENA, AIE (2017). Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System.

Jaffe, A., Newell, R., Stavins, R., 2005. A tale of two market failures: Technology and environmental policy. *Ecological Economics*, Vol. 54, Issues 2-3, pp. 164-174.

Jara, J.J., Lagos, G., Tilton, J.E (2008). Using exploration expenditures to assess the climate for mineral investment, *Resources Policy*, Volume 33, Issue 4, pp. 179-187, ISSN 0301-4207, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2008.08.003>.

Jewell, J, Cherp, A, Riahi, K. (2014). Energy security under de-carbonization scenarios: an assessment framework and evaluation under different technology and policy choices. *Energy Policy* 65,743–760.

Johnstone, N., Haščič, I., Popp, D., (2010). Renewable Energy Policies and Technological Innovation: Evidence Based on Patent Counts. *Environmental and Resource Economics*, Vol. 45, pp. 133-155.

Kahia, M., Ben Aïssa, M. S., Charfeddine., L., (2016). Impact of Renewable and Non-Renewable Energy Consumption on Economic Growth: New Evidence from the MENA Net Oil Exporting Countries (NOECs). *Energy* 116 : 102-15. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.126>.

Karl, T. L. (1997). *The Paradox of Plenty: Oil Booms and Petro-States*. London: University of California Press, Ltd.

Khan, M. I., Yasmeen, T., Shakoor, A., Khan, N. B., Muhammad, R. (2017). 2014 Oil Plunge: Causes and Impacts on Renewable Energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68 : 609-22. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.026>.

Kinninmont, J. (2017). Vision 2030 and Saudi Arabia's Social Contract. Research Paper. Chatham House. <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2017-07-20-vision-2030-saudi-kinninmont.pdf>

Kirkpatrick, A. (2017), After the Resource Curse: The Unexplored Possibility of the Post-Rentier State ». *International Studies Perspectives*, ekw013. <https://doi.org/10.1093/isp/ekw013>

Koske, L., Wanner, I., Bitetti, R., Barbiero, O., 2015. The 2013 update of the OECD product market regulation indicators: policy insights for OECD and non-OECD countries. OECD Economics Department Working Papers, No., 1200.

Krane, J., (2014). Navigating the Perils of Energy Subsidy Reform in Exporting Countries. Baker Institute Policy Report. Rice University's Baker Institute. <https://www.bakerinstitute.org/files/8679/>

Krause, Bossel, Müller-Reißmann, (1980), *Energiewende – Wachstum und Wohlstand ohne Erdöl und Uran*, S. Fischer Verlag.

Ladyman, J., Lambert, J., Wiesner, K., (2013). What is a complex system? *European Journal for Philosophy of Science*, Vol. 3, Issue 1, pp. 33-67.

Lanjouw, J., O., Mody, A., (1996). Innovation and the international diffusion of environmental responsive technologies. *Research Policy*, Vol. 2, pp. 549-571.

Lanshina, T.A., J.A. "Skip" Laitner, Potashnikov, V.Y., Barinova, V.A., (2018). The Slow Expansion of Renewable Energy in Russia: Competitiveness and Regulation Issues ». *Energy Policy* 120 : 600-609.

Lapointe, S., (2000). L'histoire des brevets. *Les Cahiers de la Propriété Intellectuelle*, Vol. 12, n°3.

Lew, D., J., (2000). Alternatives to coal and candles: wind power in China. *Energy Policy*, Vol. 28, pp. 271-286.

Lorot, P., 2009. De la géopolitique à la géoéconomie. *Géoéconomie*, No. 50, pp. 9-19.

Luciani, G., Hertog, S., Woertz, E., Youngs, R. (Ed.) (2012). *The Gulf Region: Economic Development and Diversification* (4 vols.), Berlin: Gerlach Press.

Luttwak, E., 1990. From Geopolitics to Geo-economics. *Logics of Conflict, Grammar of Commerce. The National Interest*, No. 20, Summer 1990, pp. 17-23.

Mahdavy H., (1970) « The patterns and problem of economic development in rentier states », in M. A. Cook (ed.), *Studies in the Economic History of the Middle East from the Rise of Islam to the Present Day*, Oxford, Oxford University Press, p. 428-467.

Malova, A., Van der Ploeg, F., (2017). « Consequences of Lower Oil Prices and Stranded Assets for Russia's Sustainable Fiscal Stance ». *Energy Policy* 105 : 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.022>.

Mazzucato, M. (2013). *The Entrepreneurial State: debunking public vs. private sector myths*. Anthem, 2013.

McGlade, C., Ekins., P. (2015). « The Geographical Distribution of Fossil Fuels Unused When Limiting Global Warming to 2 °C ». *Nature* 517, n° 7533 : 187-90. <https://doi.org/10.1038/nature14016>.

Meadows, D.H., & D.L., Randers, J., Behrens III, W.W, (1971). *The limits to growth*. Universe Books, New York.

Morrison, K.M. (2009) « Oil, Nontax Revenue, and the Redistributive Foundations of Regime Stability ». *International Organization* 63, n° 01 : 107. <https://doi.org/10.1017/S0020818309090043>.

National Research Council, (2008a). *Managing Materials for a Twenty-first Century Military*, National Academies Press, <https://www.nap.edu/catalog/12028/managing-materials-for-a-twenty-first-century-military>

National Research Council (2008b). *Minerals, Critical Materials And the U.S. Economy*, Prepublication Version [Online]; National Academies Press; Washington, DC, 2008; https://www.nap.edu/resource/12034/critical_minerals_final.pdf

Newell, R., G., Jaffe, A., B., Stavins, R., N., (1999). The induced innovation hypothesis and energy-saving technological change. *The quarterly journal of economics*, Vol. 114, Issue 3, pp. 941-975.

OCDE. (2009). *OECD Patent Statistics Manual*. OECD (Ed), Paris.

Ockwell, D., Haum, R., Mallett, A., Watson, J., (2010). Intellectual property rights and low carbon technology transfer: Conflicting discourses of diffusion and development. *Global Environmental Change*, Vol. 20, pp. 729-738.

Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole –OPEP- (2017). « World Oil Outlook 2040 ».

https://www.opec.org/opec_web/flipbook/WOO2017/WOO2017/assets/common/downloads/WOO%202017.pdf.

Paish, O., (2002). Small hydro power: technology and current status. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 6, pp. 537-556.

Park, W., G., (2008). International patent protection: 1960-2005. *Research Policy*, Vol. 37, pp. 761-766.

Passet, R., (2010). Les grandes représentations du monde et de l'économie à travers l'histoire. *Les Liens qui libèrent*.

Passet, R., (1979). *L'économique et le vivant*. Payot.

Ploeg, F. van der., (2016). « Fossil Fuel Producers under Threat ». *Oxford Review of Economic Policy* 32, n° 2 : 206-22. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grw004>.

Pollitt, M., 2012. The role of policy in energy transitions: Lessons from the energy liberalization era. *Energy policy*, Vol. 50, pp. 128-137.

Popp, D., (2002). Induced innovation and energy prices. *American Economic Review*, Vol. 92, n° 1, pp. 160-180.

Popp, D., (2005). Lessons from patents: Using patents to measure technological change in environmental models. *Ecological Economics*, Vol. 54, pp. 209-226.

Poudineh, R., (2017). « Rethinking energy policy in the MENA's hydrocarbon economies ». *Forum*, Oxford Institute of Energy Studies, n° 108. <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/04/OEF-108.pdf>.

Putnam, J., (1997). *The Value of International Patent Rights*. UMI Dissertation Services.

Radetzki, M., Eggert, R.G., Lagos, G., Lima, M., Tilton, J.E. (2008) The boom in mineral markets: How long might it last?, *Resources Policy*, Volume 33, Issue 3, Pages 125-128, ISSN 0301-4207, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2008.05.002>.

Remme U., Mäkela J., 2001, *TIMES Training Workshop*, Gothenburg.

Ross, M., (2012). *The Oil Curse: How Oil Wealth Shapes the Development of Nations*, Princeton: Princeton University Press.

Sabitova, N., Shavaleyeva, C. (2015). Oil and Gas Revenues of the Russian Federation: Trends and Prospects. *Procedia Economics and Finance* 27: 423-28. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01016-3](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01016-3)

Schmalensee, R. (2012). *Energy Decisions, Markets and Policies*, MITOPENCOURSEWARE, Massachusetts Institute of Technology.

Scholten, D (Ed.), (2018), *The Geopolitics of Renewables*, Springer.

Scholten, D., Bosman R. (2016). 'The Geopolitics of Renewables; Exploring the Political Implications of Renewable Energy Systems', *Technological Forecasting and Social Change*, 103, 273-283

Serrano-González, J., & Lacal-Arántegui, R. (2016). Technological evolution of onshore wind turbines—a market-based analysis. *Wind Energy*, 19(12), pp. 2171-2187.

Slade, M., (1980). An econometric model of the U.S. secondary copper industry: Recycling versus disposal, *Journal of Environmental Economics and Management*, Volume 7, Issue 2, pp.123-141.

Smil, V., (2010), *Energy Transitions. History, Requirements, Prospects*. Greenwood Publishing Group, 178p.

Smith Stegen, K., (2011) « Deconstructing the “Energy Weapon”: Russia’s Threat to Europe as Case Study ». *Energy Policy* 39, n° 10 : 6505-13. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.051>.

Soete, L., (1987). The impact of technological innovation on international trade patterns: The evidence reconsidered. *Research Policy*, Vol. 16, pp. 101-130.

Sovacool, B. K. (2016). 'How Long Will It Take? Conceptualizing the Temporal Dynamics of Energy Transitions'. *Energy Research & Social Science*, 13: 202-15.

Smith Stegen, K. (2011). Deconstructing the “Energy Weapon”: Russia’s Threat to Europe as Case Study. *Energy Policy* 39, n° 10: 6505-13. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.051>

Snyder, D.H., (1966). *Stockpiling Strategic Materials, Politics and National Defense*, San Francisco, Calif.: C.A. Chandler Publishing.

Son, H., 2015. The History of Western futures studies: An exploration of the intellectual traditions and three-phase periodization, *Futures* 66, pp.120-137.

Sverdrup H. and Koca D. (2016). A short description of the WORLD 6.0 model and an outline of elements of the standard parameterization. SIMRESS.

The White House, National Security Study Memorandum 197: Critical Imported Commodities. Washington. [Online] 1974.

http://www.nixonlibrary.gov/virtuallibrary/documents/nssm/nssm_197.pdf (accessed 06.05.18.).

Thoma, G., (2013). Quality and Value of Chinese Patenting: An International Perspective. *Seoul Journal of Economics*, Vol. 26, no. 1, pp. 33-71.

Thoma, G., (2017). The Value of Chinese Patenting. *Patent Management and Valuation: The Strategic and Geographical Dimension*. Thoma, Grid (ed.), Routledge studies in technology, work and organizations, pp. 252-279.

Thuy Nguyen, R., Fishman, T., Zhao, F., Imholte, D.D., Graedel, T.E. (2018), Analyzing critical material demand: A revised approach, *Science of the Total Environment* 630, pp.1143–1148.

Tilton, J.E. Phillip C.F. Crowson, John H. DeYoung, Roderick G. Eggert, Magnus Ericsson, Juan Ignacio Guzmán, David Humphreys, Gustavo Lagos, Philip Maxwell, Marian Radetzki, Donald A. Singer, Friedrich-W. Wellmer, (2018). Public policy and future mineral supplies, *Resources Policy*, ISSN 0301-4207, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.01.006>

Tilton, J.E., Lagos, G. (2007) Assessing the long-run availability of copper, *Resources Policy*, Volume 32, Issues 1–2, pp.19-23, ISSN 0301-4207, <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2007.04.001>.

Tilton, J.E. (2003) *On Borrowed Time? Assessing the Threat of Mineral Depletion* (Resources for the Future, Washington, DC).

Tolon, K. (2012). Futures studies: A new social science rooted in Cold War strategic thinking. In M. Solovey & H. Cravens (Eds.), *Cold war social science: Knowledge production, liberal democracy, and human nature* (pp. 45–62). New York: Palgrave Macmillan.

Ulfelder, J. (2007). Natural-Resource Wealth and the Survival of Autocracy. *Comparative Political Studies*, 40(8), 995-1018.

UNFCCC, (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change, available at: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>

UNFCCC, (2017). The Paris Agreement. Available at: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

USGS (2018). *Draft Critical Mineral List—Summary of Methodology and Background Information*, <https://pubs.usgs.gov/of/2018/1021/ofr20181021.pdf>

Van de Graaf, T. (2018). Battling for a Shrinking Market: Oil Producers, the Renewables Revolution, and the Risk of Stranded Assets, In *The Geopolitics of Renewables*, Daniel Scholten (Ed.), 61:97-121. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67855-9_4

Veille Blanchard, E., 2011. Les limites à la croissance dans un monde global. Thèse de doctorat, École des Hautes Études en Sciences sociales.

Verdolini, E., Galeotti, M., (2011). At home and abroad: An empirical analysis of innovation and diffusion in energy policy. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 61, Issue 2, pp. 119-134.

Vihma, 2018. Geoeconomic analysis and the limits of critical geopolitics: a new engagement with Edward Luttwak. *Geopolitics*, Issue 1, Volume 23, pp. 1-21.

Wiens, D., Poast, P., Clark, W.R., (2014). « The Political Resource Curse: An Empirical Re-Evaluation ». *Political Research Quarterly* 67, n° 4 : 783-94. <https://doi.org/10.1177/1065912914543836>.

World Bank, (1996). China: Renewable energy for electric power, 15592-CHA, World Bank, Washington, DC, 11 September.

World Economic Forum, (Consulté le 25 août 2018). Is there a link between oil prices and remittances? <https://www.weforum.org/agenda/2016/05/is-there-a-link-between-oil-prices-and-remittances>

Wu, C., (2014). Comparisons of technological innovation capabilities in the solar photovoltaic industries of Taiwan, China, and Korea. *Scientometrics*, Vol. 98, pp. 429-446.

Yueh, L., (2009). Patent laws and innovation in China. *International Review of Law and Economics*, Vol. 29, pp. 304-313.