

Vers un après pétrole ?
Prospective énergétique à l'horizon 2050

Introduction.....	3
Du pétrole au mix énergétique : éléments de compréhension.....	6
1. Le système économique pétrolier.....	6
Chaîne de valeur :.....	6
Prospection et mise en exploitation de gisements :	7
Typologie des pays producteurs de pétrole :.....	7
2. Les autres sources d'énergie.....	9
Consommation mondiale d'énergie.....	9
Composition du mix énergétique mondial	10
Production mondiale d'énergie primaire	10
Scénario 1 : Plein gaz.....	13
Le dispendieux prolongement du régime pétrolier	13
Des dommages environnementaux à forts coûts humains.....	13
Une relative stabilité du mix énergétique mondiale.....	14
Une économie toujours plus gourmande en ressources énergétiques	15
Des mobilités individuelles en fort développement	15
Entre compétition et coopération : géopolitique pétrolière à l'horizon 2050	16
Scénario 2 : nouveau modèle énergétique, ancien paradigme économique.....	17
Une transition énergétique lente initiée par le marché.....	17
Les difficultés de la lutte contre le réchauffement climatique.....	18
Transition énergétique et stratégies technologiques : l'heure des choix ?.....	18
Des systèmes productifs en voie de relocalisation	19
Les métaux rares au cœur du système économique mondial.....	19
Architecture urbaine centralisée, réseaux énergétiques décentralisés.....	20
Nouvelles rentes et troubles géopolitiques : les économies pétrolières en 2050.....	20
Scénario 3 : le rêve de Rifkin	21
Diminution de la consommation de pétrole et baisse du prix du baril.....	21
Un réchauffement global contenu mais des dégradations environnementales sensibles	21
Maturité des ENR et complexification des infrastructures énergétiques	22
Un capitalisme décentralisé et à courtes chaînes de valeur	22

Des synergies accrues entre urbanisme et mobilité	23
Une redistribution des cartes géopolitiques liée à la transition énergétique	23

Dans son acception la plus vaste, la transition énergétique désigne le remplacement progressif de la principale source primaire de consommation énergétique. Les révolutions industrielles en constituent des précédents remarquables. Les transitions énergétiques naissent soit de la découverte ou l'adoption généralisée d'une source d'énergie plus efficace que la source dominante, soit de la raréfaction critique de la principale ressource énergétique. Un changement de paradigme énergétique qui ne serait motivé par aucun des deux facteurs constituerait un événement sans précédent dans l'histoire de l'humanité.

À l'ère de l'anthropocène, l'homme devra limiter son impact environnemental et réduire ses émissions de gaz à effets de serre. La décarbonation du mix énergétique – passage d'un modèle basé sur des énergies fossiles à un modèle basé sur des énergies renouvelables, fait figure d'élément-clé pour y parvenir.

Transition énergétique et réflexions sur l'après-pétrole sont indissociables.

Cette étude prospective propose d'examiner à moyen terme – à l'horizon 2050 – différentes évolutions possibles du système énergétique mondial. Elle n'a pas vocation à se substituer aux travaux de prévisions quantitatives mais vise à les compléter par un examen systémique donnant lieu à l'exploration de scénarios qualitatifs.

« *Le pétrole est une commodité à fort contenu diplomatique et militaire, avec une valeur fiscale indéniable et accessoirement un pouvoir calorifique.* » Par ce trait d'esprit, André Giraud, ministre de l'Industrie lors du deuxième choc pétrolier, rend compte des multiples dimensions de la problématique pétrolière : l'instrumentalisation géopolitique et le potentiel économique comptent davantage que les qualités intrinsèques d'une source énergétique. Une abondante littérature, depuis Daniel Yergin jusqu'à Andrew Price-Smith s'est attaché à mettre en lumière les liens unissant économie pétrolière et ordre géopolitique international. Ali Laïdi, historien de la guerre économique, définit le pétrole comme « *le produit le plus conflictogène de l'économie mondiale.* » Changer de régime énergétique revient à réformer la grammaire des rapports de forces géoéconomiques mondiaux. C'est pourquoi un horizon temporel inférieur à trente ans semble insuffisant pour envisager les effets d'une transition vers un hypothétique ordre mondial post-pétrolier.

La question pétrolière n'est pas soluble dans la relation de l'homme face à la finitude des ressources terrestres. Depuis M. King Hubbert jusqu'à Matthieu Auzanneau, de nombreux auteurs annoncent l'imminence d'un *peak oil*, point d'inflexion à partir duquel les capacités de production pétrolière déclineraient inexorablement, laissant la demande économique inassouvie. Sans que cette lecture des enjeux pétroliers soit erronée – les ressources fossiles sont bel et bien limitées – elle ne coïncide pas avec l'agenda de la transition énergétique. Les effets des dégradations environnementales liées à notre système énergétique seront significatifs bien avant qu'un *peak oil* ne désorganise significativement nos systèmes économiques

Notons enfin l'essor de la collapsologie, discours se donnant pour objet l'étude un possible effondrement civilisationnel. L'influence collapsologique sur l'interprétation notre régime énergétique et de ses conséquences environnementales catastrophiques transparait dans les récentes publications d'essayistes comme Paul Jorion ou Pablo Servigne et Raphael Stevens. Le caractère roboratif et stimulant des hypothèses d'effondrement n'occulte pas l'impression d'une surenchère catastrophiste chez ces auteurs.

La démarche prospective s'efforce d'exposer les implications de différentes hypothèses d'évolutions des systèmes développées dans des récits de futurs possibles. Elle met en évidence aussi bien les problématiques communes aux différents scénarios que leurs singularités.

La transition plus ou moins marquée vers un après-pétrole entrainera des mutations systémiques. Afin de rendre compte de cet impact, chaque scénario présente une évolution possible des réserves et de l'exploitation pétrolière, du mix énergétique mondial, des mobilités, de l'évolution des systèmes technologiques et des appareils productifs, et enfin du changement climatique. L'examen de ces différentes dimensions donnera un aperçu du degré de transformation subit par nos le système capitaliste.

À l'échelle mondiale, le mix énergétique n'évolue que très lentement : le pétrole représentait en 2017 30 % de l'énergie finale consommée, niveau identique à celui de 1990. L'horizon 2050 retenus pour les scénarios s'inscrit donc à la fois dans le temps long géopolitique et technologique, et dans le temps court énergétique.

Ce travail explore trois hypothèses d'évolution :

- 1) Le **maintien du régime énergétique actuel** basé sur le pétrole et les autres énergies fossiles. Cette hypothèse soutient le scénario « **Plein gaz** », qui envisage les conséquences de l'absence de transition énergétique.
- 2) La **décarbonation volontariste du mix énergétique** avec l'objectif de rendre le capitalisme écologiquement soutenable. Le scénario « **Nouveau modèle énergétique, ancien paradigme économique** » se fonde sur cette hypothèse.
- 3) La **transformation radicale des systèmes économiques et énergétiques**, sur laquelle se base le scénario « **le rêve de Rifkin** ».

D'autres scénarios, explorant des hypothèses de débrayage technologique ou d'effondrement civilisationnel, seraient envisageables. Nous les jugeons toutefois d'un intérêt moindre.

La transition vers un système économique mondial dominé par le *low tech* ne semble pas vraisemblable à l'aune du trait techniciste qui structure le capitalisme¹. La tendance *low tech* pourrait toutefois infuser dans les trois scénarios sans en changer la teneur fondamentale.

L'attention croissante pour le thème de l'effondrement civilisationnel procède moins d'une pulsion morbide que d'une incapacité à se représenter la lente et léthale dégradation de notre environnement. « *Plutôt envisager la mort qu'affronter la sénilité* » semblent confesser les collapsologues. La pensée des enjeux de l'anthropocène a vocation à devenir un schème cognitif structurant, analogue à la tendance techniciste du système capitaliste. L'hypothèse d'un effondrement civilisationnel nous semble néanmoins trop peu vraisemblable à l'horizon 2050 pour soutenir un scénario mondial.

¹ La tendance à la surenchère technique et au solutionnisme a fait l'objet d'une large conceptualisation, dont le précurseur français fut sans doute Jacques Ellul (*le Système technicien*, 1977 ; *le Bluff technologique*, 1988).

Ces scénarios peuvent être résumés ainsi :

2050	<i>Plein gaz</i>	<i>Nouveau modèle énergétique...</i>	<i>Le rêve de Rifkin</i>
Offre et prix du pétrole	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de l'offre • Augmentation du prix 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de l'offre • Augmentation du prix 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de l'offre • Diminution du prix
Évolution du mix énergétique	<ul style="list-style-type: none"> • 88% d'énergie fossiles et nucléaires • 12% d'ENR 	<ul style="list-style-type: none"> • 76% d'énergie fossiles et nucléaires • 24% d'ENR 	<ul style="list-style-type: none"> • 50% d'énergie fossiles et nucléaires • 50% d'ENR
Changement climatique	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des températures de 5 à 7°C horizon 2100 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des températures de 5°C horizon 2100 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des températures de 2°C horizon 2100
Système agricole	<ul style="list-style-type: none"> • Productivisme • Baisse des rendements 	<ul style="list-style-type: none"> • Transformation qualitative • Baisse des rendements 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Urban farming</i> • Circuits courts
Chaînes de valeur	<ul style="list-style-type: none"> • Largement mondialisées • Deuxième vague de délocalisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Relocalisation • Intensification capitalistique 	<ul style="list-style-type: none"> • Relocalisation • Prégnance des <i>smart grids</i> et solutions TIC
Démographie et urbanisme	<ul style="list-style-type: none"> • 9,5 milliards d'humains • 68% d'urbains 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 milliards d'humains • 72% d'urbains 	<ul style="list-style-type: none"> • 10 milliards d'humains • 66% d'urbains
Mobilités	<ul style="list-style-type: none"> • Développement des mobilités individuelles • 2,2 milliards d'automobiles 	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution des mobilités quotidiennes • Moindre recours au pétrole 	<ul style="list-style-type: none"> • Courtes distances • Multimodalité • <i>Mobility as a Service</i>
Géopolitique pétrolière	<ul style="list-style-type: none"> • Course à l'Arctique • Rivalité Arabie Saoudite - Iran 	<ul style="list-style-type: none"> • Course aux métaux rares • Transition difficile pour la plupart des pays pétroliers 	<ul style="list-style-type: none"> • Course aux métaux rares • Perte d'influence du système économique pétrolier

Tableau 1. Résumé des scénarios prospectifs

Afin d'accompagner le lecteur dans l'appropriation de la problématique de l'après-pétrole, ces scénarios contrastés sont précédés d'une introduction synthétique à l'économie pétrolière et au mix énergétique mondial.

Envisager la transition vers un après-pétrole nécessite quelques connaissances préalables sur des caractéristiques de l'or noir : ses composantes intrinsèques, son rôle dans le système économique mondial et l'impact global de son emploi comme combustible et comme vecteur énergétique.

L'étude de ces caractéristiques n'est toutefois pas suffisante : envisager la transition vers un monde utilisant moins de pétrole revient à questionner les alternatives, leurs potentiels et leurs limites.

Cette première partie a pour vocation de permettre au lecteur de comprendre succinctement l'écosystème du pétrole et d'avoir un aperçu du mix énergétique dans lequel il s'inscrit.

1. Le système économique pétrolier

Le pétrole est une huile minérale composée d'hydrocarbures² divers. La composition chimique du pétrole est essentielle : elle détermine ses propriétés énergétiques³. Les hydrocarbures n'ont ni la même utilité ni la même valeur d'échange. L'intensité de raffinage nécessaire pour rendre le pétrole propre à l'usage est la composante principale de son prix hors taxe.

Chaîne de valeur :

La chaîne de valeur du pétrole peut être scindée en cinq étapes génériques : **exploration, extraction, acheminement, raffinage, commercialisation**.

L'**exploration** et l'**extraction** sont deux activités engendrant d'importants investissements initiaux et suscitant un retour sur investissement incertain. Jusqu'aux années 1980, il était courant que les États délèguent les activités de recherche et l'exploitation aux *International Oil Companies* (IOC) : BP, Chevron, ExxonMobil, Total, Shell. Celles-ci exploitaient ensuite les gisements à leurs propres bénéfices moyennant l'acquittement d'une rente au pays sur lequel elles opéraient. Cette pratique tend à disparaître aujourd'hui : les pays pétroliers préfèrent prospecter et extraire leur pétrole à partir de compagnies nationales (*National Oil Companies*, NOC). Quelques NOC parmi les plus connues : Gazprom (Russie), Petrobras (Brésil), China National Petroleum Corporation et Sinopec (Chine), Petronas (Malaisie) ou encore Aramco (Arabie Saoudite). Les NOC contrôlent 90% des réserves pétrolières prouvées.

Le pétrole extrait est acheminé sur les sites dédiés au raffinage. L'**acheminement** peut se faire par voie terrestre (oléoduc) ou maritime (bateaux tankers). À échelle mondiale, le pétrole est le premier bien échangé en volume.

Le **raffinage** du pétrole est un procédé industriel qui permet de transformer le pétrole brut en différents produits finis tels que l'essence, le fioul lourd (produits énergétiques) ou le naphta (produit non énergétique).

Acheminement, raffinage et commercialisation sont généralement assurées par la même entreprise. Bien que ces activités soient les principaux déterminants du prix du pétrole transformé, les marges appliquées sont très inférieures à celles des activités d'exploration et d'extraction. Les NOC se focalisent généralement sur les deux premières phases et sous-traitent les trois dernières à des opérateurs en aval. Le modèle des IOC repose traditionnellement sur l'intégration verticale de toute la chaîne de valeur.

² Composé organique constitué d'atomes de carbone et d'hydrogène.

³ Densité API (calculée selon la méthode de l'American Petroleum Institute), concentration en soufre.

Prospection et mise en exploitation de gisements :

Depuis 2013, les découvertes de pétrole conventionnel s'effondrent à l'échelle mondiale. En 2016, l'équivalent de 2.4 milliards de barils qui ont été découverts, contre une moyenne annuelle de 9 milliards au cours de la décennie 2000. S'il n'est pas douteux que la ressource pétrolière se raréfie, le principal facteur expliquant ce recul réside dans la faiblesse des investissements d'exploration liée à la chute du prix du baril depuis 2014.

Avec près de 80% des volumes découverts depuis 2014, les États-Unis se montrent les plus dynamiques en termes de prospection. La filière pétrolière américaine s'appuie sur l'exploitation d'un type de pétrole non conventionnel : le *shale oil*, connu en France sous le nom de pétrole de schiste.

Par ailleurs, la part du pétrole extrait en eaux profondes (golfe de Guinée, golfe du Mexique, large du Brésil...) est en très net repli : en 2016, il ne représentait plus que 13 % des projets approuvés, loin de la moyenne de 40 % constatée au cours des quinze années précédentes.

Les projets d'exploitation de ressources *deep offshore* ou d'extraction à partir de sables bitumineux ne peuvent atteindre le seuil de rentabilité dans un contexte de cours mondial du baril durablement bas. Les compagnies privilégient désormais les gisements moins gourmands en capitaux.

Typologie des pays producteurs de pétrole :

Le pétrole a été (et demeure) une formidable source de revenus pour les pays producteurs. Toutefois, on constate que les pays abondamment dotés en pétrole (et plus généralement en matières premières) éprouvent des difficultés à diversifier leurs économies. Ce phénomène est imputable :

- Principalement à l'appréciation de la devise du pays qui découle de l'accroissement des recettes d'exportation. L'appréciation d'une monnaie rend *de facto* les importations moins onéreuses. Elle implique de plus la perte de compétitivité des filières locales, certains pans industriels se trouvent être complètement délaissés.
- Secondairement à un effet d'éviction, les capitaux et la main-d'œuvre tendant à se polariser vers les filières les plus porteuses.

Ces difficultés éprouvées par les pays producteurs de matières premières est souvent appelée « mal hollandais ».

Dans les pays peu développés avant la découverte de d'hydrocarbures, les recettes pétrolières sont souvent mobilisées pour subventionner les pans économiques mis en difficultés par les deux effets. En pratique, ce type de politique a un effet néfaste sur la compétitivité des secteurs subventionnés.

Selon leur degré de dépendance aux hydrocarbures, on peut classer les pays producteurs de pétrole en trois catégories :

- **Pays dépendants** : il s'agit d'États ayant connu une croissance économique importante grâce à l'exploitation du pétrole. Ne pouvant pas s'appuyer sur un tissu économique suffisamment dense, l'appréciation de leur monnaie a découragé les efforts de développement de ces filières industrielles ou agricoles. La revitalisation de l'économie extra-pétrolière fait aujourd'hui figure d'enjeu crucial pour ces pays.

		Arabie saoudite	Irak	Venezuela	Nigeria	Angola	Algérie
Production (2014)	Nbr barils / jour (en millier)	11 624	3 364	2 685	2 428	1 756	1 721
	% de la production	15,14%	4,38%	3,50%	3,16%	2,29%	2,24%
	Rang mondial	2	8	12	13	16	17
Réserves (2014)	Réserves en barils (en millier)	266 578 000	143 059 000	299 953 000	37 070 000	8 423 000	12 200 000
	% des réserves mondiales	17,86%	9,58%	20,09%	2,48%	0,56%	0,82%
	Rang mondial	2	4	1	9	17	15

Tableau 2. Production et réserve pétrolière du groupe « pays dépendants » - BP *Statistical review of world energy*

- **Producteurs de petite taille** : ces pays ont eu rapidement la capacité à s'émanciper de leur dépendance au pétrole en raison de leur petite taille et/ou de leur faible population. Les régimes politiques se trouvent ainsi en capacité de subventionner l'économie locale tout en investissant dans des relais de croissance (outils productifs local ou étranger, fond d'investissement)

		EAU	Koweït	Qatar	Norvège
Production (2014)	Nbr barils / jour (en millier)	3 474	2 767	2 055	1 904
	% de la production	4,52%	3,60%	2,68%	2,48%
	Rang mondial	6	11	14	15
Réserves (2014)	Réserves en barils (en millier)	97 800 000	101 500 000	25 244 000	5 497 000
	% des réserves mondiales	6,55%	6,80%	1,69%	0,37%
	Rang mondial	6	5	12	22

Tableau 3. Production et réserve pétrolière du groupe « producteurs de petites tailles » - BP *Statistical review of world energy*

- **Puissances économiques** : la production de pétrole renforce leur puissance sur le plan économique. Le pétrole ne constitue pas leur principale source de croissance. N'étant pas dépendant de cette ressource, ils peuvent se permettre de l'utiliser comme outil géopolitique en jouant sur les volumes de production et sur les cours.

		USA	Russie	Chine	Canada	Iran	Brésil	Mexique
Production (2014)	Nbr barils / jour (en millier)	14 021	10 847	4 598	4 383	3 377	2 966	2 812
	% de la production	18,26%	14,13%	5,99%	5,71%	4,40%	3,86%	3,66%
	Rang mondial	1	3	4	5	7	9	10
Réserves (2014)	Réserves en barils (en millier)	36 520 000	80 000 000	24 649 000	4 161 000	157 530 000	15 314 000	11 079 000
	% des réserves mondiales	2,45%	5,36%	1,65%	0,28%	10,55%	1,03%	0,74%
	Rang mondial	10	7	13	25	3	14	16

Tableau 4. Production et réserve pétrolière du groupe « puissances économiques » - BP *Statistical review of world energy*

2. Les autres sources d'énergie

Consommation mondiale d'énergie

La consommation d'énergie peut être exprimée dans sa forme primaire ou finale.

La consommation finale équivaut à la consommation d'énergie primaire, à laquelle il faut ajouter les consommations énergétiques tout au long de la chaîne de valeur permettant de passer d'une ressource brute au flux énergétique consommé.⁴

La consommation mondiale d'énergie a doublé (+101%) entre 1973 et 2016. On constate un ralentissement de croissance de la consommation mondiale d'énergie qui semble se stabiliser autour de 1% par an.

	Production		Consommation		Cons./ hab. tep
	Mtep	%	Mtep	%	
Chine	2 496	18,10%	2 973	21,80%	2,17
États-Unis	2 018	14,60%	2 188	16%	6,8
Inde	554	4%	851	6,20%	0,65
Russie	1 334	9,70%	710	5,20%	4,93
Japon	30	0,20%	430	3,20%	3,38
Allemagne	120	0,90%	308	2,30%	3,77
Brésil	279	2%	298	2,20%	1,43
Corée du Sud	51	0,40%	273	2%	5,39
Canada	471	3,40%	270	2%	7,54
France	138	1%	246	1,80%	3,71
Iran	324	2,30%	237	1,70%	2,99
Indonésie	426	3,10%	225	1,60%	0,87
Arabie saoudite	649	4,70%	222	1,60%	7,03
Mexique	192	1,40%	187	1,40%	1,55
Royaume-Uni	119	0,90%	181	1,30%	2,78
Mondial	13 790	100%	13 647	100%	1,86

Tableau 6. Production et consommation totale d'énergie par pays (2016) – AIE *World Energy Statistic 2017*

Les usages finaux de l'énergie ont très peu évolué les 25 dernières années. Industrie et transport sont les premiers pôles de consommation, suivi par les usages résidentiels (éclairage, chauffages, appareils domestiques).

	Industrie	Transport	Résidentiel	Tertiaire	Agriculture Pêche	Usages non énergétiques	Non spécifié	Total
1990	29%	25%	24%	7%	3%	8%	4%	100%
2015	29%	29%	22%	8%	2%	9%	1%	100%

Tableau 7. Répartition des usages énergétiques (2016) – AIE *World Energy Statistic 2017*

⁴ Dans le cas du pétrole : exploration, extraction, acheminement, raffinage, commercialisation.

Composition du mix énergétique mondial

L'expression « mix énergétique » désigne la répartition entre les différentes sources d'énergies primaires utilisées pour satisfaire aux besoins énergétiques dans une zone géographique donnée. Derrière l'expression « transition énergétique », il faut entendre « diminution significative de la part des énergies carbonées dans le mix énergétique. »

En 2016, le pétrole constitue toujours la première source d'énergie (33%) devant le charbon (28.1%) et le gaz naturel (21.6%). L'utilisation de charbon demeure incontournable dans le système énergétique mondial : la Chine, qui consomme le quart de la production mondiale d'énergie, présente un mix énergétique composé à 70% de charbon. Si les énergies renouvelables gagnent du terrain, elles ne représentent que 10,7% des consommations énergétiques totale.

Production mondiale d'énergie primaire

Répartition de la consommation d'énergie primaire dans le monde

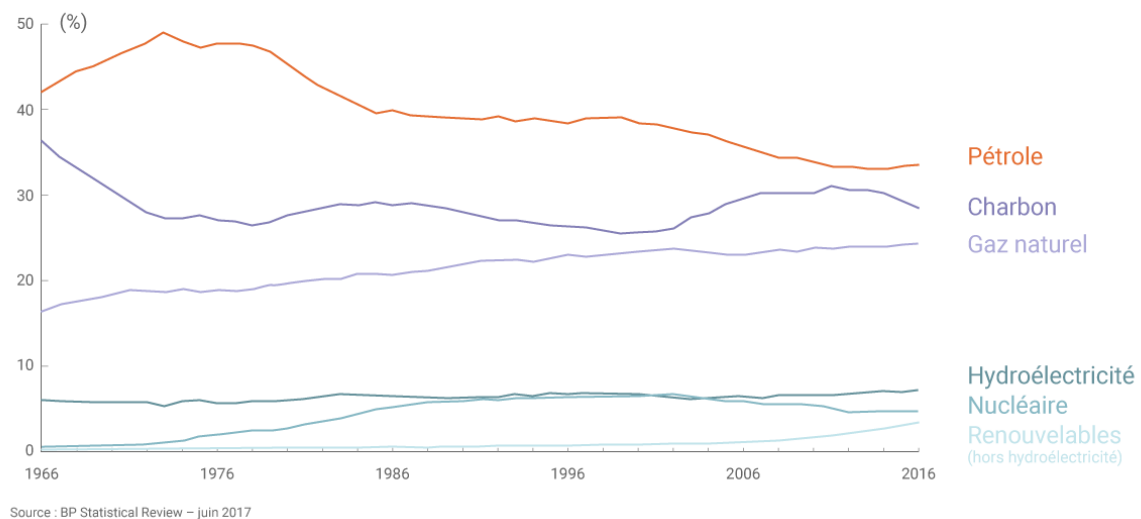


Tableau 8. Production mondiale d'énergie primaire par source d'énergie (2016) BP *Statistical review of world energy*

- Charbon

Combustible de la première révolution industrielle, le charbon conserve au même titre que le pétrole une place incontournable dans le système énergétique du XXI^e siècle. 41% de la production électrique mondiale provient de centrale au charbon, ce qui en fait encore aujourd'hui le combustible le plus répandu pour cet usage. La Chine consomme à elle seule près de la moitié de la production de charbon. Depuis 2000, 80% de la hausse de la demande de charbon sert à nourrir la croissance économique chinoise. La consommation mondiale de charbon a augmenté de plus de 24% entre 2005 et 2014, et l'Agence Internationale de l'Énergie anticipe une croissance légère et régulière de celle-ci entre 2017 et 2040.

La demande mondiale en charbon sera stimulée par le développement des pays d'Asie du Sud-Est (Indonésie, Malaisie, Vietnam, Philippines, etc.), mais surtout par l'Inde qui absorberait la moitié de la croissance mondiale de consommation de charbon. Cette énergie est retenue par New Delhi comme l'option la plus économique pour donner accès à l'électricité aux 240 millions d'Indiens qui en sont encore privées et pour développer de l'industrie manufacturière du pays.

Au rythme d'extraction actuel, les réserves prouvées de charbon suffiraient à assurer 153 ans d'exploitation.

Réserves prouvées de charbon (2016)										Total 10 premiers
Etats-Unis	Chine	Russie	Australie	Inde	Allemagne	Ukraine	Kazakhstan	Indonésie	Pologne	
22,1%	21,4%	14,1%	12,7%	8,3%	3,2%	3,0%	2,2%	2,2%	2,1%	91,3%

Tableaux 9. Répartition des réserves prouvées de charbon (2016) – AIE *World Energy Statistic 2017*

- Gaz naturel

Le gaz naturel est la troisième source d'énergie mondiale et connaît un regain de vigueur grâce au développement des gaz non conventionnel. Les États-Unis ne possèdent que 4,7% des réserves prouvées mais assurent 21,1% de la production mondiale (en 2016), devant la Russie (16,3% en 2016) et l'Iran (5,7% en 2016).

En raison de la vétusté des infrastructures et des sanctions internationales, les productions pétrolière et gazière iraniennes sont sous-optimales. Des mesures de restriction sur le système de paiement et les assurances ont en outre entraîné le retrait du marché iranien des principales compagnies étrangères (Total, Shell, Repsol). Depuis la levée des sanctions internationales en janvier 2016, l'Iran renoue avec la croissance des exportations dans le secteur énergétique.

Au rythme d'exploitation actuel, les réserves prouvées de gaz couvrent 53 ans de production.

- Énergie nucléaire

Le parc nucléaire mondial compte 437 réacteurs nucléaires, répartis dans 30 pays, et représente 4,5% du mix énergétique mondial (contre 6% en 1990).

Les pays ayant initialement porté cette technologie (États-Unis, Japon, France, Allemagne, Angleterre) tendent aujourd'hui à la délaisser en raison des risques associés à son utilisation (terroriste, accident industriel), des coûts d'entretien et de la problématique de la gestion des déchets. Ils sont relayés par les pays ayant de fort besoin en énergie : Chine, Russie, Inde, et dans une moindre mesure les pays d'Europe de l'Est (Slovaquie, Hongrie, Ukraine, Biélorussie).

États-Unis (parc de 99 réacteurs nucléaires) et France (58 réacteurs) sont les deux principaux producteurs d'électricité à base de matière fissile. Si les États-Unis possèdent le plus grand nombre de réacteurs nucléaires, la part de l'électricité d'origine nucléaire n'y est que de 19,5%. La France est le pays dont la part d'électricité d'origine nucléaire est la plus importante : 77%.

- Les énergies renouvelables (EnR)

Les EnR proviennent de flux naturels, par opposition aux énergies fossiles non renouvelables et dont les stocks s'épuisent. Ces flux possèdent deux origines : le Soleil (à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux) et la Terre (qui dégage de la chaleur). La part des EnR dans le mix énergétique était sensiblement identique en 2017 à ce qu'elle était dans les années 1990. La forte croissance des pays en développement (Chine, Inde, Brésil) soutenue par la consommation d'énergies fossiles explique cette stagnation.

L'exploitation d'EnR engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est à ce jour beaucoup plus faible que celui des énergies fossiles. Les avancées technologiques ont permis une nette amélioration des performances énergétique et une diminution du coût des EnR depuis le début des années 2010.

Il existe quatre types d'EnR :

- **La biomasse** permet de générer de l'énergie grâce à la chaleur dégagée par la combustion directe de matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou après un processus de transformation de la matière (par exemple, la méthanisation). C'est la plus ancienne des EnR mais aussi la plus importante dans le mix énergétique (9,7% du mondial en 2015). Avec des procédés éprouvés, une matière première inépuisable et d'accès facile (déchets), cette filière poursuit son développement. Elle présente l'avantage d'être accessible aux pays les moins bien dotés en ressources (financière et matière première). Les principaux relais de croissance se trouvent aujourd'hui dans le recours aux technologies du numérique (sous exploitées) présentant un fort potentiel de rationalisation des *process*.
- **L'hydroélectrique** exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). Le secteur fait l'objet d'investissements importants, en particulier en Asie et en Amérique latine, du fait des importantes ressources naturelles non exploitées. Il est également très répandu en Suisse. La production hydroélectrique mondiale atteint les 910 Mtep par an, soit 6% de la production énergétique mondiale. La Chine est aujourd'hui le premier producteur mondial devant le Canada, le Brésil et les Etats-Unis.
- Les technologies du **photovoltaïque** et de **l'éolien** sont sans doute les plus médiatisées des EnR, et sont pourtant les moins usités répandus : elles ne comptent que pour 0,5% du mix énergétique mondial à elles-deux. Les avancées technologiques enregistrées au cours des deux dernières décennies en font les solutions les plus prometteuses et avec le plus fort potentiel de croissance.

Aujourd'hui, la Chine investit massivement en matière d'EnR (1/3 des investissements mondiaux annuels) et polarise les compétences technologiques. Malgré une adoption tardive, le pays est le premier producteur mondial d'énergies renouvelables⁵.

La production d'EnR est aujourd'hui très dépendante de l'utilisation des terres rares. En 2016, la Chine fournissait 89% de la production mondiale de terres rares, et abritait 44% des réserves connues. Les Etats-Unis, le Brésil ou encore la Russie possèdent, dans une moindre mesure, d'importantes réserves. Le bilan carbone et le volume d'énergie nécessaire à l'extraction dissuadent ces États de développer leur production domestique de terres rares, d'où le recours au producteur chinois.

⁵ Sur ce point, cf. Annexe.

La notion de « réserve pétrolière » n'indique pas l'état du stock mondial de pétrole d'un point de vue géologique : elle reflète la quantité des ressources pétrolières prouvées ou supposées à une date donnée. Il s'agit donc d'une notion technologique, au sens où l'on ne peut séparer cet indicateur de l'état des techniques de prospection et d'extraction. C'est pourquoi le *peak oil*, annoncé dès les années 1950 par Marion King Hubbert, ne s'est pas produit au cours des soixante dernières années.

Ce scénario explore l'hypothèse d'une poursuite de la fuite en avant technologique qui permet de repousser toujours plus loin l'horizon du pic pétrolier.

La place centrale de l'énergie dans les chaînes de valeur mondiales confère à la question de l'approvisionnement pétrolier un caractère de priorité stratégique absolue pour les États. La prédominance des enjeux énergétiques sur l'intérêt général s'explique par la consubstantialité du système énergétique avec l'économie capitaliste. Cette consubstantialité se manifeste physiquement par des réseaux d'infrastructures énergétiques lourdes, et idéologiquement par un discours technicien occultant les aspects politiques des choix énergétiques.

Faute d'être confronté avant 2050 à la rareté absolue, le système reposant sur l'utilisation de combustibles fossiles ou géologiques (charbon, pétrole, gaz naturel, matière fissile) se maintient, évinçant les alternatives durable ou *low tech* plus coûteuses à mettre en œuvre ou d'utilisation plus contraignante. La part du pétrole dans le mix énergétique mondial finit par se résorber d'elle-même pour cause de manque de compétitivité de la filière.

Le dispendieux prolongement du régime pétrolier

Stimulée par la croissance économique mondiale, la production pétrolière augmente fortement jusqu'au milieu des années 2030. Le prix du baril de brut ne reflète pas plus qu'au XXe siècle la raréfaction de la ressource : hausse et baisse des cours mondiaux se succèdent en fonction des stratégies d'offres des pays producteurs et des ajustements de la demande. L'offre mondiale se nourrit de l'exploitation de nouveaux gisements et de nouveaux types de ressources.

Les champs pétrolifères et gazières de l'Arctique sont exploités à la fin des années 2020 au prix d'importants efforts de recherche et développement principalement consentis par la Russie. Le perfectionnement des technologies EOR⁶ et de forage offshore profond, financés par des programmes de recherche impulsés par les *majors* pétrolières, répondent à la même logique. L'exploitation des pétroles dits « non conventionnels » (pétrole de schistes, sables bitumineux, pétrole lourd) est rendue compétitive par l'amélioration des techniques de raffinage. Elle permet à certains États de s'affranchir de leurs dépendances envers les approvisionnements internationaux.

Les prouesses industrielles nécessaires à l'augmentation de la production mondiale finissent par poser un problème de rentabilité des gisements dès lors que la capacité d'extraction faiblit : le cours du pétrole connaît au cours de la décennie 2040 une nette augmentation corrélée à l'inflation des coûts de production. En mal de rentabilité, l'industrie pétrolière connaît en 2050 une crise de débouché liés à son manque de compétitivité face aux énergies alternatives.

Des dommages environnementaux à forts coûts humains

Sur la période 2020 – 2040, les émissions moyennes de CO2 atteignent les 45 milliards de tonnes annuelles. Les objectifs des accords internationaux de limitations des émissions ne sont atteints qu'à

⁶ *Enhanced oil recovery*, technologie qui permet de prolonger la durée de vie des champs de pétrole mature.

la fin des années 2030. Entamés au début des années 2040, les efforts de décarbonation sont trop timides et trop tardifs pour endiguer le phénomène de réchauffement climatique. Le GIEC anticipe un accroissement de 5 à 7°C des températures moyennes à l’horizon 2100.

L’élévation du niveau des océans dépasse les 30 centimètres en 2050, posant la question de l’endiguement des villes côtières. Les déplacements de population liés à la montée des eaux ne provoquent pas de migrations internationales massives, mais entravent le bon fonctionnement économique des aires les plus touchées par les déplacements locaux de population. La hausse des températures entraîne une désertification accrue de l’Afrique et du sud de l’Europe.

La surmortalité liée aux dégradations environnementales impacte la démographie mondiale. Déjouant les prévisions, le nombre d’humains n’excède pas 9,5 milliards au milieu du XXI^e siècle. Les événements climatiques extrêmes (vagues de chaleur, sécheresses, ouragans, etc.) se succèdent, entraînant une hausse significative du taux de mortalité. Les émissions de particules polluantes affectent également l’état sanitaire d’une population mondiale de plus en plus sujette aux maladies respiratoires chroniques. On assiste enfin à la résurgence mondiale de maladies infectieuses jusque-là contenues (paludisme, dengue).

Une relative stabilité du mix énergétique mondiale

Les États ont majoritairement anticipé l’enchérissement du cours du pétrole et se sont efforcés de diversifier leurs sources d’approvisionnement dans le contexte de forte demande énergétique des années 2020. Sur la période 2015 – 2050, la demande énergétique mondiale a crû de 50% pour dépasser la barre des 20 Gtep.

L’insuffisance des investissements consentis à échelle nationale en termes d’unités de production et de recherche et développement ne permet pas à la filière renouvelable de concurrencer la consommation d’énergies fossiles. Motivée par sa stratégie de diversification des sources d’approvisionnement énergétique et par de forts enjeux de santé publique (qualité de l’air dans les mégapoles), la Chine se dote du programme le plus ambitieux en matière d’EnR. Une intense activité de dépôts de brevet pour l’ensemble des technologies renouvelables (solaire, éolien, géothermique) atteste la maturité technologique d’une filière chinoise intégrant toute la chaîne de production. Malgré l’amélioration de l’efficacité énergétique des solutions technologiques et l’accroissement du nombre d’unités de production, la part des EnR dans le mix énergétique mondial ne progresse pas significativement (10% en 2015 contre 12% en 2050) en raison des fortes consommations d’énergies fossiles des pays en développement.

L’augmentation du prix des hydrocarbures n’entrave pas la domination des énergies fossiles dans le mix énergétique mondial en 2050. Gaz, pétrole et charbon demeurent relativement bon marché, et leur exploitation présente l’avantage de ne nécessiter que des infrastructures devenues *low tech*. Les pays en développement d’Afrique et d’Asie y ont donc recours afin de satisfaire des besoins énergétiques croissants.

Les combustibles fossiles assurent une part importante dans le mix énergétique des pays développés par effet d’inertie : les chaînes de production et de distribution de ces sources d’énergie conservent un avantage compétitif lié à leur ancrage ancien, dans un contexte marqué par la faiblesse des investissements publics. La lenteur de déploiement de structures de productions renouvelables joue en la faveur des hydrocarbures en limitant la capacité de diffusion des alternatives électriques.

La part de l’énergie nucléaire croît jusqu’à atteindre 13% du mix énergétique mondial en 2050 sous l’impulsion des programmes nucléaires civils indien et chinois. Le géant chinois Hualong One se positionne comme le leader mondial de l’énergie nucléaire, et met sa maîtrise technologique au service d’une politique de croissance internationale. Les déchets radioactifs font l’objet d’un marché mondial de retraitement et d’enfouissement que se disputent les pays les moins nantis afin d’assurer

leur développement. Les *early adopter* (France, Angleterre, Allemagne, Japon) ont quant à eux progressivement renoncé à leur filière nucléaire du fait des problématiques industrielles insolubles (déchets, démantèlement) et des risques associés venant s'ajouter aux risques d'exploitation (accidents industriels, menace terroriste).

Une économie toujours plus gourmande en ressources énergétiques

Les pays occidentaux voient la dynamique de désindustrialisation encore à l'œuvre dans les années 2020 participer à la réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre. Les efforts de relocalisation de la production sont un trompe-l'œil : ils consistent en l'assemblage local des produits finis à partir de composants importés. Les chaînes de valeur industrielles et commerciales destinées à irriguer les marchés européens et étatsuniens restent largement mondialisées. Les économies occidentales tertiaisées composent par ailleurs avec une augmentation de leurs consommations énergétiques liée au développement exponentiel des systèmes d'informations.

Afin de lutter contre les dégradations environnementales, les États industrialisés ou réindustrialisés dans la seconde moitié du XXe siècle (Chine, Mexique, Indonésie, pays d'Europe de l'Est, etc.) initient volontairement un mouvement de délocalisation industrielle. À l'exception des activités d'extraction, non délocalisables, ils ne conservent dans leurs tissus économiques locaux que les industries à forte valeur ajoutée (informatique, santé, EnR, etc.) et externalisent les activités les plus polluantes ou les moins rentables vers les pays en développement.

L'Afrique jouit d'une croissance entretenue par les flux d'investissements directs à l'étranger liés à cette vague de délocalisation industrielle. Le continent entre dans une phase d'intense développement, portés par ses pays anglophones les plus dynamiques (Kenya, Ethiopie, Ghana). L'accroissement des capacités productives nécessite le développement rapide de filières énergétiques. Des centrales électriques au charbon et au pétrole se développent donc dans les années 2020-2030. Malgré un fort potentiel de production d'EnR, la croissance économique passe pour le continent africain par une forte augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

Faute de volonté politique de sortir du paradigme consumériste, le système agricole mondial doit soutenir l'accroissement démographique malgré la dégradation des sols liés aux usages des techniques agraires des révolutions vertes. Le changement climatique et l'étalement urbain contribuent à accentuer la pression sur les terres arables. Les volumes d'intrants (engrais azotés et pesticides) utilisés ne cessent de croître pour maintenir des rendements équivalents à ceux du début du XXIe siècle. Alternative à l'utilisation massive et énergivore d'intrants, le développement des cultures OGM fait figure de pis-aller. Les cours des céréales se font de plus en plus volatiles, et la gestion des pénuries devient dès les années 2030 une préoccupation politique majeure pour les pays en développement.

Des mobilités individuelles en fort développement

L'accroissement démographique, le processus d'urbanisation et l'absence de réorganisation des systèmes productifs impliquent un fort accroissement des mobilités au cours des trente prochaines années.

68% de l'humanité réside en zones urbaines. Les villes asiatiques, indiennes et africaines voient leurs populations et leurs aires urbaines s'accroître significativement. Cette rapide expansion dans des zones faiblement maillées par les réseaux d'infrastructures urbaines est soutenue essentiellement par l'augmentation du nombre de véhicules individuels : on estime que 2,2 milliards d'automobiles sont en circulation à l'échelle mondiale en 2045. Dans ce parc automobile foisonnant, les moteurs à explosion conservent une large part (92%) malgré l'essor d'alternatives électriques et hybrides

Le développement des transports en commun urbains se polarise principalement au Moyen-Orient et en Chine. Les connexions interurbaines s'améliorent à l'échelle des continents sous l'effet de la généralisation et de la modernisation de l'offre en chemin de fer. Après une phase de croissance intense du trafic aérien, les mobilités longues distance par avion sont quant à elles sur le déclin pour des raisons d'augmentation des coûts d'exploitation et de concurrence des moyens de télécommunication immersifs.

Entre compétition et coopération : géopolitique pétrolière à l'horizon 2050

Le pétrole conserve un rôle central dans l'économie mondiale jusqu'en 2050. Son potentiel conflictogène est à la fois exacerbé par sa raréfaction et atténué par la coopération nécessaire à l'exploitation des pétroles non-conventionnels ou à forte profondeur.

Les pays producteurs de grande taille que sont les Etats-Unis, la Russie, la Chine ou le Brésil se livrent à une concurrence technologique et à une intense activité diplomatique afin d'assurer l'accès de leurs champions nationaux aux ressources pétrolières arctiques. Cette course à l'Arctique entraîne un jeu diplomatique complexe entre États du conseil de l'Arctique (Canada, États-Unis, Groenland, Danemark, Norvège, Islande, Russie) et compagnies pétrolières. Les contraintes techniques et la dangerosité de l'exploitation expliquent une collaboration avancée entre parties prenantes.

Les pays producteurs de petite taille (Norvège, Qatar, Emirats Arabes Unis, Koweït) conservent une importante rente pétrolière jusqu'à la crise de débouché de 2050. Ils s'appuient également sur la constitution de fonds souverains comme outils d'investissement productif leur permettant de diversifier leur manne. Ces fonds souverains contribuent à l'accroissement du rayonnement diplomatique de ces États.

Le contexte de forte demande pétrolière permet le maintien du régime saoudien qui entend plus que jamais jouer le rôle de leader du Moyen-Orient. L'Arabie Saoudite sunnite trouve en l'Iran chiite un challenger redoutable, moins doté en hydrocarbure mais mieux diversifié économiquement. Le rapport de force entre les deux puissances régionales est instrumentalisé par les puissances américaines et russes qui ont un intérêt objectif à privilégier la conflictualité indirecte. Ils conservent ainsi un ancrage géopolitique dans une région où l'influence chinoise (stratégie dite des « nouvelles routes de la soie ») devient prégnante.

La « transition énergétique » telle que nous l’envisageons actuellement consiste dans le passage d’un modèle basé sur des énergies fossiles à un modèle basé sur des énergies de flux. Ces dernières sont souvent qualifiées de durables : leur production s’inscrit dans une temporalité économique et non géologique. Les questions des modalités incitatives et du rythme des réalisations constituent deux enjeux majeurs de cette transition. Ce scénario explore ce que pourrait être une transition énergétique suivant les tendances actuellement à l’œuvre. Le changement de système énergétique vise à maintenir le système économique que nous connaissons.

Dans l’hypothèse retenue, la consommation d’énergies fossiles croît jusqu’à 2040 où le *peak oil* est atteint. La croissance économique est stimulée par le faible coût des énergies fossiles qui n’incite pas les États à accélérer leurs politiques de transition énergétique. La faiblesse de l’orientation politique fait reposer la responsabilité de cette transition sur les citoyens, entreprises et ONG. Passé le *peak oil*, la transition énergétique est contrainte par le manque de ressources fossiles. La période 2020-2050 est marquée par des épisodes climatiques extrêmes et par un accroissement de la pollution atmosphérique aux lourdes conséquences environnementales et sanitaires.

L’humanité prend conscience de son impact écologique – on parle d’ère de l’anthropocène, actant ce que le prospectiviste Thierry Gaudin appelle l’inversion du rapport de domination entre l’homme et la nature. Pourtant, le sentiment quasi universel d’une dégradation de l’environnement et de l’urgence d’une transition énergétique ne produit pas un changement radical du modèle de société. Les pays en développement entendent faire profiter leur population d’un mode de vie consumériste se rapprochant des standards occidentaux, et assurer la pérennité de ce dernier en canalisant ses externalités. Si les énergies renouvelables jouent un rôle accru dans le mix énergétique mondial, celui-ci demeure intense en carbone.

Horizon 2050, la raréfaction absolue des ressources fossiles confronte l’humanité à un enchérissement généralisé des énergies, liés à une demande forte et à une réduction de l’élasticité de l’offre énergétique.

Une transition énergétique lente initiée par le marché

La consommation pétrolière tend à croître jusqu’à un pic atteint en 2040 avec une production journalière avoisinant les 105 millions de barils par jour. L’épuisement des gisements les plus aisément exploitables et un manque structurel d’investissements en recherche et développement contribue à la diminution des volumes extraits. La demande en énergie fossile se détériore d’autant plus que l’amélioration continue du taux de retour énergétique⁷ des ENR confère à ces solutions alternatives un avantage compétitif sur certains usages (chauffage, mobilité).

Avant le *peak oil*, la transition énergétique est davantage guidée par une logique de marché que par une politique volontariste. Dans ce contexte, l’incapacité des structures productives à suivre les besoins mondiaux après ce choc pétrolier d’un nouveau genre nourrit une forte augmentation des cours, entraînant des désordres économiques de grande ampleur. Marchés et États doivent s’ajuster à la raréfaction du combustible en usant d’énergies de substitution ; les filières anciennes (charbon, gaz, nucléaire) sont sollicitées afin de pallier la faiblesse de l’offre.

Afin de diminuer leur facture énergétique, les agents économiques (entreprises, associations, simples citoyens) ajustent d’eux-mêmes modes de production et habitudes de consommation. Les industriels

⁷ Ratio de la quantité d’énergie fournie par une source énergétique et de la quantité d’énergie investie pour le captage, la transformation et la fourniture de cette énergie.

conçoivent par exemple des véhicules moins lourds, dont le taux d'occupation et d'utilisation augmente grâce aux *business models* issus de l'économie collaboratives.

Le pétrole représente encore en 2050 25% du mix énergétique. Son utilisation demeure incontournable dans le fret de marchandises et les transports long-courriers.

Les difficultés de la lutte contre le réchauffement climatique

Les engagements de limitation d'émission de gaz à effet de serre pris par les États au cours des différents sommets internationaux du climat ne sont que partiellement honorés. À l'exception notable du Japon, les pays d'Asie, toujours très industrialisés, ne peuvent respecter leurs quotas d'émissions. Les États européens, aux économies tertiarisées et aux populations vieillissantes, réduisent sensiblement leur impact écologique direct.

La population mondiale dépasse les 10 milliards d'habitants à l'aube de l'année 2050, dont 72% d'urbains. Malgré les efforts des municipalités du monde entier pour tendre vers la sobriété énergétique, l'explosion démographique des villes se traduit par une augmentation conséquente des mobilités individuelles et de la consommation de biens manufacturés, autant de défis pour la limitation des émissions de CO₂.

Le recours accru à des filières énergétiques carbonées comme palliatif au pétrole manquant pour irriguer l'économie mondiale après 2040 se solde par un accroissement de l'empreinte écologique de l'activité humaine. Le *peak oil* marque donc un changement de paradigme économique dommageable écologiquement. La tendance au réchauffement climatique s'amplifie : une augmentation des températures de 5°C horizon 2100 est anticipée.

Transition énergétique et stratégies technologiques : l'heure des choix ?

Les initiatives en matière de transition écologique varient fortement selon les particularités des aires géographiques. La part des ENR dans le mix énergétique mondial atteint les 24% en 2050.

Les États-membres de l'Union Européenne ne parviennent pas à un consensus sur une politique commune de transition énergétique ambitieuse et disruptive. Les contraintes budgétaires pesant sur les États-membres impliquent la sanctuarisation de leur croissance économique – croissance que favorise un cours du Brent stable et des approvisionnements sécurisés. Les programmes européens privilégient la gestion curative et industrielle des externalités (dépollution, retraitement des déchets) sur les investissements proactifs (programme de la recherche fondamentale et appliquée, investissements dans les infrastructures EnR, promotion des solutions *low-tech*). Les initiatives émanant de la société civile jouent un rôle important dans la transition énergétique européenne en favorisant les productions locales et écologiques. Toutefois, le vieux continent éprouve des difficultés à rester un acteur majeur en matière de R&D sur les technologies de transitions.

Les États-Unis maintiennent une forte exploitation des énergies fossiles sur leur sol avec un usage intensif des techniques de fracturation horizontale. La filière pétrole de schiste voit sa production atteindre un plateau à 4 millions de baril par jour au milieu des années 2030 – avant de voir ce volume décroître de 33% au cours des deux décennies suivantes. Le gouvernement fédéral encourage l'exploitation des schistes bitumineux afin d'entretenir la vitalité économique de régions dépendantes des hydrocarbures. L'approvisionnement en énergie bon marché dope la compétitivité à l'internationale de l'économie américaine mais la prive de l'opportunité de réaliser une transformation nécessaire au regard des dommages environnementaux. Les capacités américaines d'investissement en R&D, publiques comme privés privilégient l'exploitation et la valorisation des énergies fossiles (pétrole et gaz). La dépendance aux énergies fossiles handicape considérablement un système économique étatsunien inadapté au monde de l'après *peak oil*.

L'Asie est le premier pôle d'innovation en matière d'énergies décarbonées, portée par la politique volontariste de la Chine. Composant avec un environnement dégradé, cette dernière a rapidement développé ses filières nucléaires et renouvelables, réduisant à dessein sa consommation en charbon et en pétrole. La capacité d'impulsion de Pékin permet la constitution d'un écosystème cohérent de production et de répartition des énergies, conférant aux solutions technologiques chinoises plusieurs longueurs d'avance en matière de *smart grids*. La filière ENR jouit en outre d'un avantage concurrentiel liés à l'accès préférentiel aux ressources minières (terres rares) extraites localement.

Des systèmes productifs en voie de relocalisation

Face à l'augmentation mondiale des coûts du fret, la relocalisation des unités de production figure à l'agenda des acteurs industriels. Le développement de certaines technologies (intelligence artificielle, robotique, impression 3D) stimule cette tendance. L'intensité capitaliste et algorithmique de la production s'accroît, tandis que le nombre d'emplois industriels qualifiés diminue. Les échanges internationaux de produits finis se rétractent.

Le prix des denrées alimentaires subit une augmentation marquée et continue dès les années 2030. L'enchérissement du prix des intrants (engrais azotés issus de la filière pétrochimique) et la baisse des rendements subséquentes aux dégradations environnementales (accidents climatiques, érosion) nourrissent cette tendance. Après 2040, le mouvement inflationniste s'accélère ; la volatilité du cours mondial des céréales devient un enjeu de sécurité économique mondiale. Des émeutes urbaines liées aux difficultés d'approvisionnement nourrissent l'instabilité géopolitique dans les zones géographiques les plus exposés aux événements climatiques extrêmes.

Afin de sécuriser ses approvisionnements alimentaires, l'Union Européenne promeut une politique de relocalisation et oriente son système agricole vers une agriculture écologique intensive. Cette démarche recueille l'adhésion de l'opinion publique qui soutient les filières locales pourvoyeuses d'emplois, mais contribue à une diminution importante de l'offre et au retour ponctuel de pénuries consécutives aux épisodes climatiques extrêmes.

Les métaux rares au cœur du système économique mondial

Le mix énergétique s'ajuste aux variations du rapport performance/coût d'une technologie de production d'énergie finale. Sur la période 2020-2050, ce rapport s'améliore continuellement concernant les ENR tandis qu'il se dégrade pour des énergies fossiles de plus en plus coûteuses. Cette reconfiguration génère de nouvelles dépendances et de nouvelles rentes de matières premières.

Entre 2020 et 2040, le cours des métaux connaît une forte volatilité. Les améliorations technologiques régulières de la filière ENR polarisent le marché sur des besoins fluctuant en minerais. L'extraction de terres rares se généralise aux États-Unis, en Russie mais également au Brésil et à Madagascar. L'accroissement de la demande porte sur : cobalt, lanthane, lithium, utilisés dans la production de voitures électriques ; platine, palladium, rhodium, nécessaires aux piles à combustibles ; néodyme, dysprosium, terbium, utilisés par la filière éolienne ; cadmium, indium, gallium indispensable pour le solaire photovoltaïque.

Horizon 2040, le coût des énergies renouvelables amorce une diminution inéluctable liée à deux facteurs : l'augmentation continue de l'efficacité énergétique des solutions de la filière, et la création d'un marché d'échange centralisé desdits métaux rares qui permet de stabiliser les prix et lisser les niveaux de production.

Corollaire à la hausse de la demande de métaux, une augmentation de la consommation énergétique mondiale : de 12% de la demande énergétique mondiale en 2015, la part de l'énergie primaire mondiale consacrée à l'extraction et au raffinage des ressources métalliques augmente à 18% en 2050.

Architecture urbaine centralisée, réseaux énergétiques décentralisés

Le mouvement mondial d'urbanisation et de métropolisation sous-produit de l'industrialisation s'accélère : en 2050, 72% d'une population mondiale de 10 milliards d'humains est citadine. Les métropoles se forment autour d'un noyau concentrant les fonctions décisionnelles et de banlieues étendues aux fonctions spécialisées (résidentielle, industrielle, commerciales...). Si les villes d'Europe et d'Asie parviennent à généraliser l'usage des transports en communs, ceux-ci restent faiblement développés sur les continents américain et africain.

Dans des aires urbaines étalées, les connexions périphéries – périphéries se font de plus en plus délicates : l'organisation radiale des transports est inadaptée à la ville du XXI^e siècle. La mobilité individuelle reste prédominante, mais implique de moins en moins la consommation de pétrole (recours aux voitures électriques, covoiturage, essor des mobilités douces). La distance moyenne parcourue quotidiennement par les individus tend à diminuer en raison de la digitalisation, et en particulier de la lente diffusion du télétravail.

Le mode de gestion décentralisés des problématiques énergétiques – désormais traitées au niveau des territoires, se généralise en Europe et en Asie : les métropoles gèrent au plus près production et la distribution de l'énergie mais aussi les externalités pour former un ensemble cohérent (transports, traitement des déchets, urbanisme, etc.). Ce mouvement de déconcentration renforce le modèle des partenariats public-privé comme norme gestionnaire des services publics, ouvrant ainsi la porte aux géants de l'économie numérique sous couvert de gestion des *smart grids*. Désintégration et réorganisation de la chaîne de valeur énergétique permettent la multiplication des innovations digitales et des unités de production d'énergie.

Nouvelles rentes et troubles géopolitiques : les économies pétrolières en 2050

Le *peak oil* de 2040 marque l'apogée de la puissance des pays producteurs de pétrole. Pour autant, leur situation sont très contrastées.

Les pays rentiers de petites tailles comme le Qatar, le Koweït, les Emirats Arabes Unis ou la Norvège assurent une transition en bon ordre de leur modèle social et économique vers l'après-pétrole. La rentabilité financière de leurs fonds d'investissement leur assure des subsides indexés sur la croissance des secteurs les plus porteurs de l'économie mondiale. Ces États font le choix d'une forte régulation de leur production domestique afin de préserver un stock d'hydrocarbure et de soutenir le cours du brut par la réduction des volumes produits.

Les pays producteurs de grandes tailles tels que l'Arabie Saoudite, le Venezuela, l'Angola, le Nigéria, l'Algérie ou l'Irak connaissent des difficultés à diversifier leur économie malgré la hausse des cours : le mal hollandais n'est pas conjuré. Les rentes pétrolières servent à subventionner des pans entiers de leurs économies et à assurer les importations en denrées alimentaire. La diminution de la production pétrolière mondiale après 2040 pose donc d'importants problème de stabilité politique pour ces États privés de leur manne traditionnelle.

Les grandes puissances économiques productrices de pétrole (États-Unis, Russie, Brésil) sont dotées d'un fort potentiel de production de matières premières stratégiques (produits agricoles, terres rares). Leur position s'accompagne d'un pouvoir de régulation du prix des métaux, nouveau levier de leur puissance économique. Le *peak oil* confronte ces pays à d'importants défi. La Russie doit composer avec une la menace sécessionniste accrue – portée par la surreprésentation des migrants Chinois en Sibérie. Le Brésil demeure une puissance régionale pénalisée par la corruption de ses élites. Les États-Unis ont initié une transition énergétique trop tardive, et accusent un retard en termes de maîtrise des ENR se traduisant par une forte perte de compétitivité.

Si l'on emprunte le cadre d'analyse développé par Jeremy Rifkin, les révolutions industrielles sont le produit d'un processus d'interactions complexes entre un régime énergétique et un système de communication.

La première révolution industrielle s'est appuyée sur l'usage du charbon, combustible propre à entraîner les machines à vapeur. La technicisation et la complexification des organisations et des sociétés fut rendue possible par l'augmentation de la fréquence des communications et l'industrialisation de l'imprimerie, toutes deux fortement tributaires des applications de la force motrice de la vapeur (transit du courrier par chemin de fer, presses à cylindre...).

La technologie centrale de la deuxième révolution industrielle, le moteur à explosion, nécessita la généralisation de la consommation de pétrole raffiné. Son pouvoir de transformation systémique fut catalysé par la généralisation des moyens de communication électrique : téléphone, ondes radio, télévision.

Rifkin voit dans l'émergence conjointe des réseaux informatisés et des énergies renouvelables les prémises d'une troisième révolution industrielle. Favoriser l'émergence de celle-ci permettrait de réduire drastiquement la dépendance aux combustibles fossiles, et ainsi de prolonger la dynamique mondiale de développement des sociétés.

Discutable d'un point de vue historique, le cadre d'analyse de l'essayiste américain présente néanmoins d'indéniables vertus heuristiques. Il nous permet de penser la transition dans un âge de l'après-pétrole comme facteur structurant d'une transformation systémique du système économique mondial. Ce scénario vise à explorer les conditions-cadres et les conséquences d'une mutation du système capitaliste impulsé depuis l'Europe et la Chine. La maturité des filières électriques renouvelables fait connaître à l'énergie électrique un nouvel âge d'or au dépend de l'usage de pétrole. Les ressources fossiles sont moins sollicitées pour la production énergétique, au contraire des ressources métalliques.

Diminution de la consommation de pétrole et baisse du prix du baril

La demande énergétique mondiale augmente de 50% sur la période 2020-2050, hausse imputable au développement économique de l'Inde et de l'Afrique. La décarbonation du mix énergétique se produit à un rythme soutenu sur la période 2020 – 2050 : les ENR voient leur part dans la production énergétique bondir de 10 à 50%. Cet essor est rendu possible par des progrès technologiques soutenant l'accroissement continu du taux de retour énergétique des énergies renouvelables.

L'épuisement de champs pétroliers exploités de longue date (Cantarell, Gawar, mer du Nord, etc.), et l'insuffisance des investissements industriels (technologiques et de prospection) entraînent une baisse de la production mondiale de pétrole raffiné. Le prix du baril chute, en cause une demande en berne que la stagnation des volumes extraits au niveau de 2035 (90 millions de barils par jours) ne permet pas de compenser. La demande en dérivés d'hydrocarbures augmente quant à elle au bénéfice de la croissance mondiale des usages plasturgiques, contribuant à soutenir les cours.

Un réchauffement global contenu mais des dégradations environnementales sensibles

La substitution des EnR au pétrole implique une réduction sensible des émissions de gaz à effet de serre, couplée au développement des plans de capture du carbone par la biomasse. Les États parviennent à respecter les engagements de lutte contre le changement climatique pris en 2015 lors de la COP 21 de Paris. La limitation du réchauffement global à 2°C horizon 2100 fait figure d'objectif

atteignable, même si le caractère tardif de la transition implique des dommages environnementaux majeurs.

En contrepartie, la très polluante activité d'extraction minière connaît un fort développement afin de pourvoir aux besoins en métaux et terres rares des industriels. Si ces matières premières sont indispensables à la transition énergétique, leur extraction demeure en elle-même très énergivore : 18% de la consommation énergétique totale est imputable aux activités minières en 2050.

Maturité des ENR et complexification des infrastructures énergétiques

La transition énergétique a emprunté la voie d'une politique volontariste en Asie, où Chine et Japon ont très tôt initié la décarbonation de leur mix énergétique. En Europe, cette transition suit une logique *bottom-up* autant que *top-down* : emblématiques de cette double tendance, des investissements conséquents dans le parc résidentiel, faisant de chaque bâtiment sa propre unité de production énergétique, sont consentis par les propriétaires sur incitations étatiques.

Les investissements portent sur des solutions matures, longuement développées et ayant vu leur taux de rendement énergétique s'accroître très fortement au cours des décennies 2010 – 2020 et 2020 – 2030 : solaire photovoltaïque et thermique, énergie éolienne, biogaz, biomasse, géothermie et biocarburants de troisième génération. Les vecteurs énergétiques alternatifs aux combustibles fossiles se perfectionnent également : les batteries voient leurs capacités de stockage s'améliorer et leur durée de vie s'accroître, tandis que le développement des piles à combustible permet l'élargissement de leur utilisation à la fin des années 2030. Les solutions technologiques permettant la transition énergétique sont largement développées en Asie, et particulièrement en Chine, leader indiscutable de la recherche sur les ENR depuis les années 2010.

Les structures de production énergétiques interconnectées se comptent par centaines de millions. Le caractère intermittent des ENR font de la gestion réticulaire un enjeu crucial : les *smart grids* gèrent la production et le stockage énergétiques selon des algorithmes complexes. Ils s'appuient sur les applications énergétiques de la blockchain permettant de tenir registre des transactions effectuées.

Un capitalisme décentralisé et à courtes chaînes de valeur

La troisième révolution industrielle se manifeste par un changement de paradigme économique conduisant à la décentralisation généralisée des structures de production. Les progrès de la robotique permettent la diffusion du modèle de l'usine 4.0, structure compacte propre à produire des biens hyper-individualisés à proximité de leurs lieux de consommation. Le volume des échanges internationaux de biens manufacturés décroît rapidement, entraînant à la baisse les activités de logistiques et de commerce de détail. Le modèle industriel du XXe siècle connaît une mutation se caractérisant par la relocalisation des structures de production et le raccourcissement des chaînes de valeur. Les consommations énergétiques liées au transport de produits semi-finis et à l'acheminement de produits finis diminuent.

La mutation la plus spectaculaire provient toutefois de la banalisation de l'impression 3D. La plupart des artefacts peuvent être téléchargés sous formes schématiques et personnalisés par les utilisateurs depuis des plateformes numériques. La matérialisation à la demande des objets de consommation courante devient un enjeu de sécurité publique. Afin d'assurer un contrôle de l'activité, certains Etats s'arrogent un monopole public sur l'impression 3D, faisant des imprimantes des communs sur le modèle des forges communales d'autrefois.

Dans le secteur primaire, l'essor de l'*urban farming* permet de subvenir à une part croissante des besoins en approvisionnement des citoyens, tandis que des marketplaces numériques mettent en

relation directe consommateurs et producteurs. Les circuits alimentaires se raccourcissent et la consommation locale redevient la norme en Europe.

De centralisées et hiérarchisées, les structures de production évoluent vers une déconcentration latérale ou de nombreuses unités de production se coordonnent grâce aux technologies de l'information et de la communication. L'efficacité de cette nouvelle forme de capitalisme permet une diminution substantielle des gaspillages.

Des synergies accrues entre urbanisme et mobilité

La reconfiguration de l'activité économique contribue au remodelage de l'urbanisme. La nouvelle organisation des villes où vivent désormais les 2/3 de l'humanité contribue à limiter les mobilités pendulaires. Les aires citadines se composent de cellules urbaines organisées autour de noyaux productifs interconnectés : on parle de « ville des courtes distances » où les fonctions urbaines (résidentielles, productive, éducation, loisir etc.) sont assurées dans un périmètre réduit. Lieux de vie et lieux de travail tendent à se confondre, tandis que la part de télétravailleurs s'accroît fortement.

Afin de diminuer l'impact environnemental du phénomène urbain, l'accent est mis par les autorités sur les transports en commun et sur les mobilités douces. L'Amérique du Nord tente ainsi de compenser son retard en termes d'infrastructures de mobilité collective. Le parc automobile mondial atteint les 2 milliards d'unités à la fin des années 2030, stimulé par les besoins en développement des pays africains et asiatiques. Ce chiffre masque de fortes disparités régionales : le pourcentage de moteurs à explosion et le nombre des voitures possédées par les ménages diminuent ainsi fortement en Europe et en Asie de l'Est.

Le concept de *Mobility as a Service* se généralise, contribuant à l'affaiblissement de la distinction entre mobilité individuelle et mobilité collective : les modes transports partagés et la multimodalité deviennent la norme pour les déplacements. Les usagers bénéficient ainsi d'une large palette de transports (depuis le vélo électrique jusqu'à la navette autonome) mis à disposition par différents opérateurs organisés en écosystèmes. L'*open data* favorise le calcul de ces itinéraires individualisés multimodaux, aussi bien pour les mobilités intra qu'inter-urbaines.

Une redistribution des cartes géopolitiques liée à la transition énergétique

La Chine est en 2050 l'État le plus avancé en termes de transition énergétique. Le mix énergétique chinois comporte 60% d'EnR, contribuant largement à la résorption de la pollution aérienne et à l'indépendance énergétique chinoise. Au bénéfice d'importants efforts de recherche et développement certifiés par une intense activité de dépôts de brevet, la Chine est devenue le principal pourvoyeur mondial de solutions énergétiques. Ce leadership technologique se double d'un rôle de producteur de ressources-clés de la transition énergétique (métaux rares), affermissant un peu plus le statut de superpuissance de Pékin.

Face à l'affirmation de l'hégémonie chinoise, les États-Unis connaissent des difficultés conjoncturelles liées à une transition énergétique enclenchées tardivement et aux déséquilibres du marché mondial du pétrole. Un déficit galopant, conjugué à un moindre recours du dollar pour le *trading* international du pétrole, provoque des difficultés budgétaires mettant à bas la suprématie monétaire américaine. À l'instar des États-Unis, les pays producteurs de pétrole et abondamment dotés en ressources naturelles (Brésil, Russie, Canada) doivent également réadapter leur appareil productif vers le paradigme économique de la troisième révolution industrielle.

Autrement plus graves sont les difficultés rencontrées par les pays disposant d'une économie tournée vers l'exportation de pétrole et autres énergies fossiles (principalement Arabie Saoudite, Nigeria, Angola, Venezuela, Algérie, Irak). La chute des cours des hydrocarbures les prive de leur levier d'action

traditionnel, la subvention de pans entiers de leur économie par la rente pétrolière. Les difficultés d'adaptation de ces États contribue à l'exacerbation de la conflictualité, en particulier au Moyen-Orient où l'équilibre régional entre deux blocs religieux – un groupe d'États chiites mené par l'Iran et une coalition sunnites menée par l'Arabie Saoudite, est mis à mal.

Les pays ayant fait fructifier leur rente pétrolière par la réalisation d'investissements à l'étranger et dans leurs outils productifs propres (Norvège, Qatar, Koweït, Émirat Arabes Unis) bénéficient des importants dividendes de la croissance verte, tout comme l'Europe dont le développement s'appuie sur la transformation vers une économie de type troisième révolution industrielle.