

La croissance verte : de l'intention à la mise en œuvre

Pierre-André Jouvet¹ et Christian de Perthuis²

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, le monde est engagé sur une croissance permettant de doubler le produit intérieur brut par tête tous les vingt-cinq ans. A partir de 1973, la croissance s'est redéployée, amorçant avec la montée en régime des économies émergentes un correctif à la polarisation séculaire de la richesse sur les pays occidentaux et le Japon. Les craintes que le mur de la rareté des matières premières ne bloque le processus ont été déjouées. La démographie et l'élargissement de la croissance menacent en revanche d'altérer des fonctions régulatrices majeures comme la stabilité du climat, le maintien de la diversité biologique, le cycle de l'eau. La croissance verte consiste à transformer les processus de production et de consommation pour préserver ou reconstituer ces fonctions régulatrices du capital naturel.

Les économistes de la croissance ont bien décrit la façon dont le progrès technique permet de contourner le mur de la rareté des ressources naturelles. La modélisation de la croissance verte exige de dépasser leur représentation standard, en considérant le capital naturel non plus comme une externalité mais comme un facteur de production. Il apparaît alors que le processus de croissance finit par se bloquer si un investissement suffisant n'est pas dirigé vers ce capital. Mais la réalisation de cet investissement dégrade la rémunération des autres facteurs de production engagés, ce qui pose des questions inédites de répartition et d'équité.

Dans la pratique, la transition vers la croissance verte dépend des avancées à réaliser dans quatre domaines : l'élargissement de la notion d'efficacité qui, s'appliquant à un plus grand nombre de variables, est susceptible de déclencher de nouvelles grappes d'innovations ; la transition énergétique qui doit anticiper la rareté croissante des sources fossiles mais dont le rythme et les modalités doivent surtout être guidés par le risque climatique ; l'intégration de la valeur du capital naturel dans la vie économique ce qui implique des arbitrages nouveaux et complexes à trouver en terme de répartition des revenus et des patrimoines ; une révision de l'échelle des risques au sein du système financier dont les innovations pour diriger des ressources à bas coûts vers la croissance verte seraient grandement facilitées par une tarification effective des nuisances environnementales.

Les auteurs tiennent à remercier les relecteurs de ce cahier pour leurs corrections et commentaires constructifs, en particulier Johanna Etner (Université Paris Ouest), Jean-Marie Chevalier (Université Paris Dauphine) et Dominique Bureau (Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie), ainsi que l'ensemble des membres de la Chaire Economie du Climat. Les opinions exprimées dans ce cahier restent celles des auteurs.

1. Professeur d'économie à l'Université Paris Ouest Nanterre et Directeur Scientifique de la Chaire Economie du Climat
pierre-andre.jouvet@chaireeconomieduclimat.org
2. Professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine et Président du Conseil Scientifique de la Chaire Economie du Climat
christian.deperthuis@chaireeconomieduclimat.org



Sommaire

Introduction :	2
1. Les ressorts de la croissance : une vision historique	4
Une perspective millénaire : les soubassements démographiques	4
Une vision séculaire : interdépendances et polarisations géographiques.....	5
Une optique décennale : un déplacement de centre de gravité de l'économie mondiale ...	7
Croissance et ressources naturelles : les fonctions régulatrices du capital naturel	9
2. Vers une fonction de production intégrant l'environnement	12
Les sources de croissance dans la représentation standard de la production	12
L'introduction de la pollution dans la fonction de production	14
Le capital naturel comme facteur de production : le berger et la tonte des moutons	15
Capital naturel et rémunération des facteurs de production : qui paye l'eau utilisée pour la tonte ?.....	17
L'exemple de la tarification des émissions de CO ₂ en Europe	18
De l'exemple du CO ₂ à sa généralisation : une typologie des croissances vertes.....	19
3. La mise en œuvre de la croissance verte	21
Un élargissement de la notion d'efficacité.....	21
La transition énergétique, motrice de la croissance verte	23
De questions nouvelles de répartition et d'équité.....	26
Les leviers du financement	28
Conclusion	31
Bibliographie	33
Annexe technique	35

Introduction :

Depuis les Sumériens, on sait qu'une croissance mue par une accumulation du capital prédatrice de l'environnement finit par s'autodétruire : grâce à la maîtrise de l'irrigation, Sumer inventa l'écriture, le droit, la ville. Incapable de maîtriser le drainage, complément indispensable de l'irrigation en milieu aride, elle disparut du fait de la stérilisation des sols par le sel. Les habitants de l'île de Pâques connurent le même destin : après avoir coupé le dernier arbre, ils abandonnèrent leur île avec ses immenses statues de granit plantées sur un paysage lunaire. Dans un monde minéral, seule la pierre peut subsister. A l'instar des Sumériens, notre croissance serait-elle en train de buter sur la disponibilité des ressources naturelles ou la capacité limite de la planète à absorber les pollutions ?

La croissance verte est généralement présentée comme un mode de croissance permettant d'échapper à de telles situations limites. Elle constituerait une alternative à la décroissance (ou la stagnation) où nous entrainerait inévitablement la poursuite des modèles historiques. Ce type de représentation présente deux limites principales.

La première est qu'il est extrêmement périlleux d'établir le diagnostic des limites physiques à la croissance. Prenons le cas le plus célèbre : celui de Malthus. Lorsque paraît le fameux *Essai sur le Principe de la Population* (1798), le Royaume Uni abrite 20 millions d'habitants et la planète un milliard. Malthus pense alors que la croissance démographique va rapidement buter sur la rareté des terres agricoles. Le Royaume Uni compte aujourd'hui 61 millions d'habitants et la planète 7 milliards, bien mieux nourris en moyenne qu'à l'époque. Dans l'intervalle, les hommes ont développé des progrès techniques inimaginables à l'aube du XIX^e siècle. Serions-nous devenus plus clairvoyants, capables d'anticiper les ruptures technologies du XXI^e siècle ?

Seconde limite : la définition décrit un résultat sans fournir la moindre indication sur les conditions requises pour l'atteindre. Du coup, il devient possible d'imaginer autant de croissances vertes que de croissances non vertes et même parfois de les déguiser, les renommer et les confondre ! Le ministère de l'écologie va recenser ses « emplois verts ». Les experts vont calculer qu'il y a 25 % « d'investissement vert » dans tel plan de relance mais seulement 10 % dans tel autre. Tel constructeur spécialiste de voitures de sport à plus de 250 g de CO₂ rejetés par km va faire certifier ses chaînes de montage pour leur performance écologique ; tel autre va vanter son dernier modèle électrique, à « émission zéro » si on omet les rejets de CO₂ liés à l'électricité. En l'absence de définition rigoureuse, le « vert » devient une notion à géométrie variable dont chacun peut s'affubler sans qu'aucune agrégation ne puisse en donner une vision synthétique.

Ce cahier vise à définir la notion de croissance verte d'une façon rigoureuse afin d'identifier les conditions de sa mise en œuvre. Le concept de croissance y est utilisé dans le sens habituel des économistes : l'ensemble des mécanismes conduisant à une augmentation de la richesse pouvant être appréhendée en termes de production, de revenu ou de conditions de vie. En soi, cette croissance n'est, a priori, ni « bonne » ni « mauvaise ». Pour la qualifier, il convient de s'interroger

sur les mécanismes rattachant les facteurs mobilisés, leur rémunération et la richesse produite. La qualification de « verte » dépend de la façon dont on traite le capital naturel dans ce processus. Une croissance mérite le qualificatif de « verte » quand elle intègre le capital naturel parmi les facteurs de production dans lesquels il faut investir au même titre que dans le travail ou le capital.

Le papier se décompose en trois sections :

La perspective historique adoptée dans la section 1 rattache le changement d'échelle opéré par la croissance dans le monde durant les dernières décennies à l'émergence de questions nouvelles comme la destruction de la couche d'ozone, le réchauffement du climat, la perte de la biodiversité. Dans cette perspective, c'est moins l'indisponibilité de telle ou telle ressource qui pose problème que le déséquilibre cumulatif introduit dans des capacités régulatrices essentielles du capital naturel. Restaurer ces capacités est l'enjeu de la croissance verte durant les prochaines décennies.

La section 2 propose une réflexion sur les conditions de mise en œuvre de la croissance verte à partir de l'écriture d'une fonction de production réunissant trois facteurs : le travail, le capital productif, le capital naturel. Cette formalisation permet de poser avec rigueur la question du degré de substituabilité ou de complémentarité entre capital naturel et capital productif. Deux questions émergent rapidement : celle de l'évaluation du capital naturel du fait de son hétérogénéité ; celle de sa rémunération qui renvoie à des questions inédites de redistribution. Pour passer de la représentation schématique au monde réel, il convient d'introduire un prix du capital naturel dans le circuit économique.

La section 3 explore les voies d'une telle introduction dans le monde réel en tirant les leçons des expériences de tarification du carbone engagées dans le cadre des politiques climatiques. La croissance verte y apparaît en premier lieu comme un élargissement même de la notion d'efficacité. Cet élargissement doit s'appliquer à la transition énergétique qui constituera un moteur déterminant de cette nouvelle croissance durant les prochaines décennies. Sa mise en œuvre implique de résoudre des questions nouvelles de répartition et d'équité, tant à l'échelle nationale qu'internationale. Elle appelle des innovations financières dont le déploiement serait grandement facilité par une tarification effective des nuisances environnementales.

En conclusion, il est rappelé que de multiples voies sont ouvertes pour graduellement considérer le capital naturel comme un facteur de production, aboutissant à une multiplicité de « croissances vertes » possibles qui renvoient à des choix différents, parfois antagoniques, de société.

1. Les ressorts de la croissance : une vision historique

Nombreuses ont été les alertes dans le passé nous mettant en garde contre les risques d'une interruption de la croissance liée à l'épuisement des ressources naturelles : rareté des terres arables, de l'énergie fossile, de l'eau, des stocks de poisson, des métaux rares... Les historiens de la croissance nous révèlent combien les sociétés ont su déjouer les alertes successives grâce aux progrès techniques conduisant à utiliser plus efficacement ces ressources rares, à en élargir la disponibilité par des investissements d'exploration ou à en trouver des substituts. La croissance passée serait-elle déjà bien plus « verte » que nous ne le pensions ? Ce serait oublier que ces multiples déplacements ne contribuent guère à la restauration du capital naturel considéré comme un système global, extrêmement sophistiqué, dont nos trajectoires de croissance menacent certaines capacités régulatrices essentielles : la stabilité du climat, le maintien de la biodiversité, le cycle de l'eau,... L'analyse historique donne un fil pour qualifier le capital naturel non pas comme une agrégation de ressources finies, mais comme un ensemble de systèmes régulateurs que certains modes de croissance peuvent perturber et d'autres renforcer.

Une perspective millénaire : les soubassements démographiques

Jusqu'où remonter dans le temps ? Grâce au travail méticuleux réalisé par Maddison (2001), on dispose d'indications sur la croissance économique du monde au cours des deux derniers millénaires. Dans ce temps long, il apparaît combien le développement de la capacité productive des hommes conditionne leur nombre. Or la démographie est la première variable à prendre en compte pour poser la question de la croissance verte sur de bonnes bases.

De l'an zéro à l'an mille, aucun moteur ne permet d'enclencher un processus cumulatif de création de richesse. A la fin du premier millénaire, les capacités productives et le niveau de vie de l'Europe sont en retrait sur ceux de l'empire romain. Sa population, de l'ordre de 25 millions d'habitants a stagné, comme celle de la Chine. L'Afrique et le Japon se sont sans doute légèrement peuplés ce qui expliquerait la très modeste croissance du nombre des habitants de la planète, passant de 230 à 268 millions en mille ans. Une variation totalement invisible à l'échelle des générations.

Entre 1000 et 1500, une compétition apparaît entre les deux blocs majeurs de l'économie mondiale que sont l'empire chinois et l'Europe. Les deux moteurs en sont l'agriculture et la navigation. Au milieu du millénaire, la Chine compte probablement pour un quart de la richesse produite dans le monde contre un cinquième pour l'Europe. Malgré les ravages provoqués par les famines et les épidémies, la population de la planète amorce un lent mouvement ascendant. En cinq siècles, elle a plus que doublé en Europe et un peu moins que doublé en Chine et dans les autres régions du monde.

Au-début du XIX^e siècle, les historiens ne savent pas très bien nous dire si le produit par habitant est supérieur en Chine ou en Europe¹. Ils conviennent en revanche que les écarts restent étroits entre

¹ Maddison (2001) estime que l'Europe a pris un sérieux avantage sur la Chine, contrairement à Bairoch et Levy-Leboyer (1967).

ces deux ensembles qui constituent les premières puissances économiques du monde. Depuis 1500, la productivité agricole s'est améliorée grâce aux techniques culturales et à la pénétration graduelle de nouvelles espèces cultivées consécutive au développement des échanges. Le rythme de la croissance démographique s'est élevé à près de 0,3 % l'an. La population mondiale a plus que doublé en trois siècles pour dépasser un milliard d'habitants en 1820.

L'année 1820 peut être considérée comme celle du démarrage à grande échelle d'un processus cumulatif couramment appelé « révolution industrielle » qui va totalement bousculer la géographie de l'économie mondiale et sa démographie. Portée par la baisse spectaculaire de la mortalité des jeunes enfants et des femmes en couche, le rythme de croissance de la population s'accélère de période en période pour atteindre son maximum durant la décennie 1870. Le rythme se ralentit ensuite grâce à un puissant mouvement de baisse de la natalité, amorcé dans les pays les plus riches dès les années soixante, qui se transmet graduellement aux autres zones géographiques. Le monde est entré en transition démographique. Sa population pourrait se stabiliser vers la fin du siècle aux alentours de 10 milliards d'habitants : dix fois celle de 1820.

Tableau 1 : Population mondiale

Année	Millions d'hab.	Hab/km ²
0	230	1,5
1000	270	1,8
1500	440	2,9
1820	1041	7,0
1913	1800	12,0
1950	2500	16,7
2010	6896	46,2
2050	9306	62,3

Source : A.Maddison (2001) & ONU

Rapportons maintenant le nombre des hommes à la superficie totale. Jusqu'en 1820, on a l'image d'une planète à peu près vide, avec en moyenne moins de 10 habitants au km². La situation change du tout au tout durant le XX^e siècle où la population est multipliée par quatre. En 2010, on compte en moyenne un peu moins de cinquante habitants au km². Si on transformait la terre en un immense lotissement, chaque habitant pourrait disposer d'un peu plus de 2 hectares et serait à environ de 150 mètres de son voisin. En 1820, chacun pouvait disposer de 14 hectares. En 2050, malgré le ralentissement de la fécondité que prolongent tous les démographes, la taille des lots devrait s'approcher de 1,5 hectare. La croissance verte consiste à adapter les modes de production et de consommation à ce rétrécissement sans précédent des lots d'espace naturel disponibles pour l'habitat d'une espèce vivante qui a pris l'habitude de domestiquer ou de détruire nombre de ses concurrentes : l'espèce humaine.

Une vision séculaire : interdépendances et polarisations géographiques

La croissance qui démarre vers 1820 en Europe repose sur une accumulation sans précédent de capital pour transformer des matières premières en biens manufacturés. Deux conditions

essentielles permettent d'enclencher le mouvement : la domestication d'une énergie nouvelle, le charbon, qui démultiplie la force des hommes et des animaux et l'accélération de la productivité agricole qui permet de libérer des bras. La propagation du processus s'effectue ensuite par une succession d'innovations qui stimulent la productivité et permettent la diffusion massive de nouveaux biens et services grâce aux baisses des coûts. De la révolution de l'éclairage au XIX^e et début du XX^e siècle analysée par Fouquet et Pearson (2012) à celle du microordinateur et du téléphone portable, le processus est le même.

Amorcé en Angleterre, le processus se diffuse rapidement en Europe de l'Ouest et aux quatre nouveaux pays où la population d'origine européenne devient rapidement majoritaire : Etats-Unis, Canada, Australie, Nouvelle-Zélande. Il se propage dès la seconde moitié du XIX^e siècle au Japon à la suite de la restauration Meiji de 1868. Jusqu'en 1950, les autres zones du monde sont soit partiellement entraînées (Russie, majorité des pays d'Amérique Latine), soit déstructurées par la puissance du processus qui s'accompagne d'une recrudescence des conquêtes coloniales de l'Europe. De 1820 à 1950, la croissance du PIB mondial par habitant s'élève d'un peu moins de 1% par an ce qui est une rupture majeure par rapport au passé. Les Etats-Unis et l'Europe de l'Ouest progressent plus vite que la moyenne, les Etats-Unis prenant un avantage décisif au XX^e siècle en échappant aux destructions massives des deux conflits mondiaux. Le Japon progresse comme la moyenne. D'autres régressent par rapport à la moyenne : l'Afrique, l'Inde et surtout la Chine dont l'économie semble se désintégrer tout au long de la période. D'après les estimations de Maddison, le produit par habitant chinois est inférieur en 1950 à ce qu'il était en 1820.

Tableau 2 : Croissance du PIB par habitant depuis 1820

	1820	1913	1950	1973	2010
Monde (\$/Hab)	670	1 510	2 110	4 100	10 886
Monde (%/an sur la période)		0,9%	0,9%	2,9%	2,7%
Positionnement des différents pays (100=moyenne monde)					
Europe de l'Ouest	185	230	217	281	279
Etats-Unis	188	351	452	407	434
Japon	100	92	91	279	311
Chine	90	37	21	20	69
Inde	80	45	29	21	31

Source : calculs des auteurs à partir de Maddison (2001) et données du FMI

L'année 1950 marque le tournant à partir duquel la polarisation de la croissance sur les pays les plus riches s'infléchit puis s'inverse. De 1950 à 1973, la croissance du PIB par tête mondial avoisine 3 % l'an. Le Japon et, à un moindre degré l'Europe, atteignent des croissances historiques leur permettant de reconstituer le capital détruit par le deuxième conflit mondial. Mais le fait majeur est qu'aucune zone du monde n'est plus en régime de stagnation ou de récession. L'Inde qui est l'ensemble géographique progressant le moins rapidement de 1950 à 1973 atteint une croissance du PIB par habitant de l'ordre de 1,5 % par an et l'Afrique de 2%. Des performances médiocres au regard de cette période qualifiée « d'âge d'or » par Maddison, mais extraordinairement élevées au regard des trends séculaires.

Le début des années soixante-dix est marqué par deux points de rupture : l'éclatement du système monétaire hérité de Bretton-Woods et le premier choc pétrolier. Le monde connaît en 1973 sa première récession depuis la guerre. Certains y voient le signal annonçant un changement durable du régime de croissance. Le fameux rapport du club de Rome sur les limites de la croissance provoque une résonance inattendue. Ces limites sont présentées d'une façon très comparable à Malthus dans son fameux Traité : la croissance va dorénavant être bornée par la rareté de ressources non renouvelables, le pétrole en premier lieu. Certains courants d'opinion commencent à vanter les bienfaits de la décroissance !

Pourtant, l'économie mondiale ne va pas changer de régime de croissance au seuil de la décennie 1970 : le rythme d'accroissement du produit par habitant est du même ordre de grandeur avant et après 1973, malgré le très fort ralentissement européen et le décrochement japonais à partir de 1990. En revanche, sa distribution géographique se déforme très rapidement. La croissance va se redéployer au profit de régions du monde à plus bas niveau de revenu initial, amorçant un correctif à la polarisation des richesses sur les pays occidentaux et le Japon qui fut sa caractéristique dominante de 1820 à 1950.

Une optique décennale : un déplacement de centre de gravité de l'économie mondiale

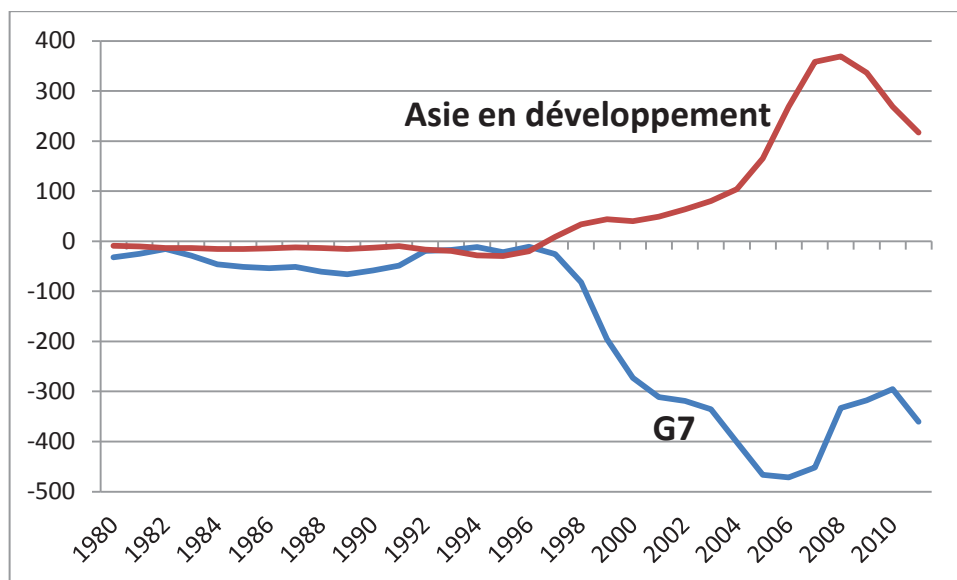
Opérant une accumulation de capital d'un rythme inédit, Chine, Inde, Brésil et quelques autres amorcent à partir de 1973 un rattrapage historique. Des forces nouvelles interviennent, expliquant la rapidité de ces redistributions. L'ouverture commerciale a pris une dimension nouvelle : en 1950, le poids des échanges de marchandises dans l'économie mondiale était inférieur à son niveau de 1913. Le ratio est multiplié par quatre entre 1950 et 2000. A la suite de la libéralisation des marchés, le capital financier devient totalement mobile. Les technologies de l'information facilitent l'acquisition de nouveaux savoirs-faires, la diffusion des innovations et l'interconnexion des marchés. Parti au démarrage de petits pays asiatiques, le mouvement se propage à la Chine continentale qui amorce son ouverture des marchés en 1979 avec le retour au pouvoir de Deng Xiaoping. Le mouvement se transmet ensuite à l'autre grand pays continent : l'Inde.

La propagation de cette dynamique aux autres régions du monde ne se fait pas sans heurts. L'Amérique Latine met une bonne décennie à s'ajuster à la nouvelle donne pétrolière avec la crise de la dette mexicaine qui ébranle tout le continent pendant la décennie quatre-vingt. L'Afrique peine encore davantage, avec un recul du produit moyen par habitant entre 1973 et 1998. La sortie de l'URSS de l'économie planifiée vers l'économie de marché s'opère dans les pires conditions. La désagrégation de l'Etat et l'application de recettes libérales naïvement transposées de l'université de Chicago provoquent une implosion de l'économie durant la décennie quatre-vingt-dix.

La première décennie du nouveau millénaire amplifie le mouvement de diffusion de la croissance mondiale dont le centre de gravité s'est déplacé vers la Chine et les pays émergents. L'Amérique Latine est sortie de ses difficultés dès le début de la décennie quatre-vingt-dix. La Russie et ses anciens satellites parviennent à enrayer leur spirale dépressive vers 1997-1998. A partir de 2001, l'Afrique sub-saharienne, dernière grande zone du monde antérieurement restée à l'écart du mouvement, voit sa croissance par habitant remonter très fortement. Surtout, le continent résiste au choc de la récession qui vient ébranler la croissance de l'économie mondiale en 2009.

A l'instar de celle de 1973, la récession de 2008-2009 traduit un double choc : prix des matières premières ; dérèglement financier. Symboliquement, le prix du pétrole atteint son pic en juillet 2008, deux mois avant la faillite de la banque d'affaire Lehman Brothers qui révèle au monde l'étendue de la contamination du système financier par le surendettement. Mais contrairement aux crises mexicaines des années quatre-vingt ou des crises asiatiques des années quatre-vingt-dix, ce n'est plus la périphérie qui est touchée, mais le cœur du système : Wall Street avec ses montagnes de subprimes, dettes gagées sur une hausse indéfinie des prix de l'immobilier. La récession est la plus marquée dans les vieux pays industrialisés, et surtout le redémarrage y est bien plus poussif : pour éviter un effondrement du système, la montagne de dettes privées a été reprise par les Etats aidés de leurs banques centrales. Le résultat en est un affaiblissement de la force de frappe des gouvernements lestés par les passifs repris au secteur privé. La croissance n'est repartie que très mollement dans ces pays, quand elle a rebondi dans les pays émergents et le monde en développement.

Figure 1 : Balance des paiements en milliards de dollars



Source : FMI

Au plan international, le coup de butoir de la récession de 2009 reflète les nouveaux rapports de force qui se sont installés depuis 1973. La crise de la dette interne s'est doublée d'un creusement inédit du déficit des balances des paiements courants. A partir de 2000, le G7 qui regroupait à l'origine les sept principales économies du monde a besoin d'entrées de capitaux qui proviennent massivement de l'Asie en développement pour financer sa croissance à crédit. Le choc de 2009 a réduit le déséquilibre mais ne l'a pas résorbé. De même, il a momentanément interrompu l'envolée des prix des matières premières, mais ne l'a nullement interrompu : sur l'ensemble de l'année 2011, le prix du pétrole atteint un nouveau record historique. Les économies émergentes ont réagi avec célérité à ces mouvements. Elles n'investissent pas seulement dans des obligations du Trésor américain ou le rachat d'entreprises occidentales ; elles bâtissent aussi des stratégies visant à sécuriser leurs approvisionnements futurs en énergie, en alimentation, en minerais. Car si la croissance peut buter sur le mur du surendettement, elle peut aussi heurter celui de la rareté ou de l'altération des ressources naturelles. Un retour à la situation de 1973 ? Examinons plus précisément

les impacts de cette croissance sans précédent historique sur le capital naturel. Trois types de limites peuvent enrayer le processus : l'épuisement de ressources non renouvelables ; la dégradation de ressources renouvelables par des pollutions ; l'altération de fonctions régulatrices essentielles du système naturel.

Croissance et ressources naturelles : les fonctions régulatrices du capital naturel

Commençons par le pétrole. Parmi les limites à la croissance identifiées par Meadows (1972), l'épuisement des ressources fossiles figure en bonne place. Le choc pétrolier intervenu l'année suivant la publication de son rapport sembla abonder dans son sens. Autre signal : la production de pétrole des Etats-Unis a plafonné puis amorcé un déclin dans les années soixante-dix, conformément à ce qu'avait anticipé dès 1956 le géophysicien Hubbert avec sa courbe en cloche figurant le fameux « pic pétrolier ». Quarante ans après, force est de constater que la rareté physique du pétrole n'a pas bloqué le régime de croissance. L'arithmétique un peu sommaire des chiffres sonne sans appel : en 1973, l'Agence internationale de l'énergie estimait les réserves prouvées de pétrole à 40 années de consommation ; en 2012, le chiffre est de... 40 années de consommation, nettement plus si on y ajoute les pétroles non conventionnels présents dans les schistes bitumineux.

Trois ajustements majeurs ont fait dans l'intervalle reculer le mur de la rareté : des gains d'efficacité : il fallait en 2010 deux fois moins de pétrole qu'en 1973 pour produire la même quantité de richesse dans le monde ; des effets de substitution : entre 1973 et 2010, la part du pétrole dans les énergies primaires est revenue d'un peu moins de moitié à un tiers ; des investissements accrus d'exploration et des progrès techniques (forages horizontaux et fracturation hydraulique) permettant d'extraire des hydrocarbures non conventionnels présents dans toutes sortes de sous-sols. La montée en régime des pays émergents décuple les moyens mis à l'œuvre dans cette course poursuite à la recherche des matières premières. Nul doute que sa prolongation repoussera la limite de la rareté des énergies fossiles. Suffisamment pour qu'une autre barrière, bien plus difficile à déplacer, vienne s'opposer à la poursuite de la croissance : le changement climatique, encore absent du débat sur les limites de la croissance en 1973.

Entre 1973 et 2012, la redistribution géographique de la croissance accélère les rejets de CO₂ dont l'accumulation dans l'atmosphère rejoint en fin de période les seuils considérés à haut risque par la communauté scientifique. Contrairement à une idée tenace, le renchérissement du pétrole consécutif à sa rareté n'a pas conduit à un freinage des émissions de gaz à effet de serre liées à l'énergie. Les gains d'efficacité générés à court terme ont été mangés à moyen terme par des substitutions vers d'autres énergies fossiles (gaz et surtout charbon depuis 2000) et par l'incitation à aller récupérer une part plus importante du stock de pétrole présent dans le sous-sol. Or, comme l'indique la communauté scientifique par des messages de plus en plus insistants, l'utilisation à des fins énergétiques de l'ensemble du stock de carbone présent dans le sous-sol constituerait, dans le cadre des technologies actuelles, un risque majeur pour la stabilité du climat. Exploiter les ressources fossiles au-delà d'un certain seuil altère la capacité de l'atmosphère à assurer la stabilité de notre climat. De la vision d'une limite physique résultant de la destruction d'un stock de ressources non renouvelables, nous sommes passés à celle de l'altération d'une capacité de régulation majeure du système naturel. Mais ce qui est à l'œuvre pour le système climatique l'est également pour d'autres fonctions de régulation du capital naturel.

A la suite des travaux de l'institut de la résilience de Stockholm, on peut identifier neuf frontières sur lesquelles les modes actuels de la croissance risquent de rebondir (tableau 3). Ces frontières ont été définies par rapport au risque d'irréversibilité introduit par la croissance des activités humaines sur les grandes fonctions de régulation du capital naturel. Dans le cas du système climatique ou de la couche d'ozone, cette limite ne peut être définie qu'au plan global. Ceci pose un problème récurrent dans la négociation climatique internationale : aucun acteur ne tire le moindre bénéfice particulier d'une action plus rapide ou plus coûteuse face au réchauffement. Dans le cas d'autres frontières comme la concentration atmosphérique d'aérosols, la biodiversité ou le cycle de l'eau douce, ces seuils peuvent se définir à différentes échelles géographiques, leur agrégation indiquant un risque d'irréversibilité au plan global en réponse au régime de croissance des activités humaines.

Tableau 3 : Frontières planétaires mises en jeu par la croissance mondiale

Système naturel	Variable de Contrôle	Frontière Proposée	Valeur Actuelle	Valeur Préindustrielle	Sources des valeurs
Echelle globale					
Changement climatique	Concentration Atmosphérique en CO ₂ (parties par millions, ppm)	< 350	387	280	IPCC (2007) ; NOAA (2009)
Acidification de l'Océan	Taux moyen en Aragonite (CaCO ₃)	> 2,75	2,9	3,44	Guinotte and Fabry (2008)
Destruction de l'Ozone	Epaisseur intégrée de la couche d'ozone (Dobson : 1DU = 10µm d'ozone)	> 276	283	290	Chipperfield et al. (2006)
Echelle globale et/ou régionale					
Accumulation atmosphérique d'aérosols	Concentration de particules sur une base régionale	ND	ND	ND	-
Cycle Biogéochimique (phosphore et Azote)	Flux de P atteignant l'océan (Mt P/an)	< 11	10,3	1	Mackenzie et al. (2002)
	Flux de N ₂ depuis l'atmosphère (Mt N ₂ /an)	< 35	121	0	Galloway et al. (2003, 2008)
Cycle de l'eau douce	Consommation humaine (Km ³ /an)	< 4 000	2 600	415	Gleick (2003) ; Shiklomanov and Rodda (2003)
Changement usage des terres	Evolution des superficies de culture (%)	< 15	11,68	5	Klein Goldewijk (2001); FAO (2008); Ramankutty et al. (2008)
Biodiversité	Taux d'extinction des espèces (extinctions/million espèces-an)	< 10	> 100	1	Pimm et al. (2006); Mace et al. (2005)
Pollution chimiques	A définir	ND	ND	ND	-

Source : Röckstrom (2009a)

Aide à la lecture : les trois premières frontières ne peuvent être définies qu'à l'échelle globale, les six suivantes combinent des seuils qui peuvent être définis à différentes échelles géographiques. Par exemple, la concentration de CO₂ à l'origine du changement climatique n'a de sens qu'à l'échelle planétaire alors que celle d'aérosols a aussi des impacts régionaux majeurs, au plan sanitaire (maladies respiratoires), environnemental (pluies acides détruisant les forêts) et climatique (formation des nuages et régime des moussons). Les frontières sont définies par rapport à des risques de changements irréversibles dans les fonctions régulatrices du capital naturel. Les variables retenues et les chiffreages suggérés doivent être considérés comme des propositions et des hypothèses de travail devant être affinées. Les différentes frontières ne sont pas indépendantes les unes des autres, par exemple l'acidification de l'océan est liée de multiples façons au cycle du carbone et au changement climatique.

Illustrons cette articulation entre différents échelons géographiques à partir de l'exemple des ressources agricoles. Dans l'approche classique de Malthus, la rareté de l'espace cultivable joue un

rôle potentiellement limitant sur la croissance de même nature que la frontière géologique pour le pétrole. Parmi les justificatifs à l'expansionnisme européen, la mise en valeur de nouvelles terres agricoles a ainsi longtemps figuré en bonne place, même si le commerce colonial ne joua qu'un rôle bien limité en la matière, ne fournissant aux métropoles que des biens de confort : le sucre fut le principal produit importé des colonies européennes, suivi du café, du thé et du cacao. La sécurité alimentaire de l'Europe reposa avant tout sur l'intensification des mises en valeur agricole permettant de démultiplier sur place la production par unité de surface. Il faut attendre les années soixante et le développement de la « révolution verte » pour qu'une intensification des systèmes vivriers à base de sélection génétique adaptée, d'utilisation d'intrants chimiques et d'extension de l'irrigation permette à des pays en développement devenus indépendants, de modifier la donne en faisant reculer de façon très significative la malnutrition dans le monde entre 1960 et 1990.

Ces progrès absolument inimaginables à l'époque de Malthus semblent néanmoins buter sur plusieurs types de frontières. Au plan économique, les gains sur la malnutrition plafonnent à partir de 1990, pour connaître un brusque retour en arrière avec l'envolée des prix agricoles internationaux de 2008 qui rationne de nombreux consommateurs à faible revenu. Comme dans le cas du pétrole, cette tension révèle l'existence de pressions croissantes sur les ressources agricoles. De nouvelles demandes émergent : demande en protéines animales, bien plus coûteuses en ressources naturelles, avec le déplacement de modes alimentaires consécutif à l'augmentation du niveau de vie dans les pays émergents d'Asie ; demande subsidiaire pour de la bioénergie à partir de 2000 du fait des programmes de soutien public aux biocarburants de première génération aux Etats-Unis et en Europe.

La tension sur les marchés agricoles renvoie aussi à des difficultés du côté de l'offre. Les modèles d'agricultures intensives peuvent perturber des systèmes de régulation naturels au-delà de certains seuils, comme par exemple le cycle de l'eau douce (épuisement des nappes, pollution des eaux de surface et souterraines, eutrophisation,...) ; l'extension des pratiques agricoles est l'un des premiers facteurs de réduction de la biodiversité dont elle subit en retour des effets négatifs (exemples classiques du rôle de la pollinisation naturelle pour les cultures ou des organismes vivants dans les sols pour leur fertilité) ; cette extension est également une menace pour le changement climatique tant du fait de l'extension des terres cultivées ou pâturées au détriment des forêts tropicales que par le développement de pratiques agricoles relâchant des gaz à effet de serre.

Face à toutes ces interactions complexes, le bon critère pour combiner développement agricole et reproduction du capital naturel est moins le degré d'intensification de l'agriculture que ses modalités : la généralisation d'une agriculture extensive exigerait bien trop d'hectares, au risque d'affecter des fonctions régulatrices majeures du capital naturel (biodiversité, eau, climat, ...) ; la systématisation des modes dominants de l'intensification agricole à base de génétique et de chimie altère d'une façon différente ces mêmes fonctions de régulation. La voie à trouver consiste à investir dans les complémentarités entre les différents éléments du capital naturel pour optimiser dans le temps le produit à l'hectare en renforçant la capacité de reconstitution des différentes composantes du capital naturel. Il s'agit de promouvoir une agriculture « écologiquement intensive », suivant la formule de Michel Griffon (2006).

Aussi bien pour l'énergie que pour les denrées agricoles, les limites à la croissance posées en termes de rareté physique des ressources naturelles ont été repoussées au cours des quatre dernières

décennies. Le renchérissement des cours sur les marchés mondiaux, puis le choc de la récession de 2009, ont rappelé les pressions qui continuent de s'exercer sur ces ressources. Ces contraintes ont déclenché des stratégies d'investissement visant à sécuriser les approvisionnements dans lesquels, les pays émergents occupent une nouvelle place pivot, à côté des pays développés. Ceci démultiplie les moyens engagés et a toutes les chances de prolonger l'usage de ces ressources au détriment de fonctions régulatrices essentielles du capital naturel telles que le climat, la biodiversité, le cycle de l'eau,...

L'enjeu de la croissance verte consiste à passer de la course poursuite pour la sécurité des approvisionnements en ressources non renouvelables, désormais engagée à l'échelle mondiale, à une autre course : celle visant le maintien des fonctions régulatrices du système naturel assurant la reproduction des ressources renouvelables, y-compris celles que l'homme a longtemps cru illimitées comme l'eau douce, l'air, la mer,.... Cet enjeu de la croissance verte renvoie au type d'accumulation du capital pratiqué pour accroître les richesses : les pays émergents peuvent-ils éviter de reproduire les étapes historiquement suivies par les pays occidentaux et le Japon ce qui démultiplierait les pressions sur le capital naturel ? Comment les vieux pays industrialisés peuvent-ils réorienter leurs modes de production et de consommation, compte tenu de la masse des infrastructures existantes ? Dans les deux cas, les transitions requises constituent-elles des relais de croissance où doivent-elles nous conduire à accepter moins de croissance au nom de la préservation du capital naturel ?

Pour appréhender ces questions avec rigueur, examinons maintenant comment les économistes intègrent la dimension du capital naturel dans l'analyse de la croissance.

2. Vers une fonction de production intégrant l'environnement

La représentation standard de la théorie économique analyse la croissance comme une combinaison du capital humain et du capital productif avec comme produits joints ou fatals la détérioration du capital naturel et de ses fonctions régulatrices. Les réponses des économistes à la rupture du début des années soixante dix et du fameux « halte à la croissance », préconisé par le club de Rome, ont surtout consisté à montrer le rôle du progrès technique permettant de dépasser ou de repousser les limites de la rareté des ressources naturelles. Dans cette section, nous proposons une représentation consistant à intégrer non seulement la pollution mais également le capital naturel comme facteur de production. Il convient alors d'appréhender le capital naturel comme source de croissance si nous sommes capables de le renouveler et de le faire fructifier. Le lecteur trouvera dans l'annexe technique le détail de la formalisation et les difficultés qu'elle doit résoudre.

Les sources de croissance dans la représentation standard de la production

Du point de vue des théories standards de la croissance, les économistes sont globalement et schématiquement d'accord sur le rôle de deux éléments essentiels : le capital humain et le capital productif.

Le capital humain (H) représente le travail en termes de contribution à la production. Cette notion recouvre aussi bien des aspects purement démographiques (natalité, allongement de la durée de vie, immigration) que des aspects de productivité du travail en termes de qualification (éducation). Dans les théories de la croissance avec capital humain, l'important est alors l'augmentation de la force de travail en quantité ou en qualité. Dans ce cas dernier cas, c'est l'accumulation, a priori sans limite, des connaissances qui est au centre de la croissance. En développant le niveau d'éducation nous améliorons donc sans limite l'ensemble des capacités de production de l'économie. C'est un des mythes que l'on prête volontiers à l'économie du numérique en oubliant un peu vite la nécessaire production de biens réels qui accompagne cette croissance.

Le second élément correspond à l'augmentation du capital productif ou capital physique (K). Le capital productif rassemble l'ensemble des investissements, machines, outils, infrastructures et intrants (ou inputs) autres que le travail participant à la production de richesse. Une augmentation du capital productif passe par un effort d'investissement qui permet d'élargir le stock ou les performances du capital immobilisé dans l'économie. Pour la croissance, au même titre que la force de travail, l'important est donc l'augmentation du capital physique en quantité ou en qualité.

Dans une représentation simplifiée du processus de production, la combinaison de ces deux facteurs de production (capital/travail) est représentée par une fonction de production représentant l'ensemble des combinaisons possibles entre les facteurs et expliquant le niveau de production (Y) d'une économie : $Y = F(K,H)$. Sur cette base, l'innovation, les connaissances et le progrès technique permettent de faire progresser la productivité des facteurs soit de manière isolée soit pour l'ensemble de la fonction de production, dans ce cas un facteur multiplicatif complète la représentation, $Y = A F(K,H)$. On peut alors considérer, comme dans les modèles classiques de croissance, l'existence d'externalités globales prises en compte dans le facteur multiplicatif A . Ce facteur intègre soit un progrès technique, soit le niveau moyen de capital humain, $A(H_M)$, soit le niveau moyen de capital physique $A(K_M)$. Nous obtenons ainsi une fonction de production à rendement croissant et donc une croissance potentielle de l'économie. Dans ces systèmes, seule compte la capacité à augmenter les facteurs de production autrement dit l'accumulation de capital physique, l'accumulation de capital humain ou le facteur multiplicatif sans prendre en compte les éventuels effets environnementaux.

Un grand nombre de modèles de croissance a alors été imaginé. Qu'ils s'agissent d'une croissance exogène liée à un progrès technique venu du ciel comme dans le modèle de Solow (1958) ou d'une croissance endogène liée au capital humain (Lucas (1988), Rebelo (1991)), au capital physique (Romer (1990)) ou encore aux investissements publics dans l'éducation ou enfin dans la recherche et développement (Barro (1996)). L'ensemble de ces approches s'interroge en définitive sur les éléments constitutifs de la fonction de production.

En réponse au Club de Rome, des auteurs tels que Dasgupta et Heal (1974, 1979), Solow (1974) et Stiglitz (1974) ont proposé de prendre en compte des effets de progrès technique ou de substitution entre capital physique et les ressources épuisables (R) : $Y = F(K,R,H)$. En introduisant dans la fonction de production une ressource épuisable, ils démontrent que les limites de la croissance portent moins sur l'épuisement des ressources que sur la capacité soit du progrès technique soit de la substitution entre les facteurs de production à assurer la croissance.

Cette approche fondée sur le progrès technique et de multiples observations historiques permettent de dépasser le pessimisme des auteurs classiques sur les potentiels de croissance à long terme. La vision simple de la rente ricardienne souligne un effet de rendement décroissant dans la production agricole au fur et à mesure que sont mises en culture des terres moins productives. En effet, cette rente représente la différence entre le coût de production d'une terre fertile et le coût de production d'une terre moins fertile. En substituant peu à peu la terre par du capital physique (intrants chimiques, mécanisation, irrigation) et humain (agronomie, génétique), l'agriculture semble pouvoir échapper à la limite physique des rendements de la terre.

Dans les approches avec progrès technique, il est possible d'obtenir une croissance infinie même dans le cadre d'une économie dont le développement repose sur une ressource épuisable. En effet, si nous considérons que le progrès technique permet à chaque instant de compenser l'épuisement de la ressource alors une croissance infinie est réalisable. Intuitivement, si nous utilisons 10 litres d'essence pour effectuer 100 kilomètres, et que nos réserves d'essence sont de 100 litres alors sans progrès technique nous pouvons espérer un déplacement maximum de 1000 kilomètres. En introduisant un progrès technique nous permettant d'effectuer 500 kilomètres avec toujours 10 litres, nous pouvons parcourir 5000 kilomètres. Enfin, si à chaque instant nous améliorons nos performances de consommation alors il n'est pas impossible d'effectuer n'importe quelle distance avec la dernière goutte d'essence : les progrès de l'intelligence humaine auront trouvé des substituts parfaits pour assurer notre mobilité sans essence. Nous pouvons ainsi, sans trop de difficultés, imaginer une croissance infinie dans un monde fini !

L'analyse historique conduite dans la partie I a rappelé qu'au delà d'une limitation de la croissance sur la base de l'épuisement des ressources, il faut nous tourner vers les externalités. Si le progrès technique, les substitutions entre les facteurs de production peuvent nous laisser croire que nous pouvons contourner l'épuisement des ressources naturelles, il reste les limites de la capacité de charge de la planète. Il y a sans doute plus à craindre des dommages aux conditions de reproduction des ressources, des dérèglements des systèmes de régulation ou d'une perte de biodiversité que de l'épuisement potentiel des ressources. Comment intégrer les pollutions dans le raisonnement ?

L'introduction de la pollution dans la fonction de production

Si la production d'un bien engendre une pollution alors, à technique de production inchangée, une baisse de la pollution s'accompagne d'une baisse de la production et tout ce passe comme si la pollution était un élément constitutif de la production. Une approche, de type Copland et Taylor (1994), Stokey (1998) ou encore Jovet, Michel, Rotillon (2005), permet d'illustrer ceci très simplement. Considérons notre fonction de production standard, en introduisant un indice d'utilisation de la technologie, z , compris entre 0 et 1 ; $Y = zAF(K, H)$ et admettons que cette production contribue à une pollution notée E . Nous pouvons alors définir une intensité de pollution par rapport à la production. On note $I(z) = E/AF(K, H)$. Il est alors relativement simple de substituer notre indice technologique entre d'un côté la production Y et de l'autre l'intensité de la pollution. Nous obtenons alors une fonction de production intégrant directement la pollution comme facteur de production $Y = AV(K, H, E)$. Dans cette première étape, nous ne percevons plus la pollution comme une simple conséquence de l'activité de production mais bien comme un facteur contribuant à la

production. Ceci résulte du fait qu'il y a une complémentarité entre la pollution et les autres facteurs de production mis en œuvre.

Ceci implique qu'une part de la production liée aux facteurs classiques de la production revient en définitive à la pollution. Dans notre cas stylisé, nous observons ainsi une baisse des poids respectifs du capital physique et du capital humain dans la production compensée par la prise en compte de l'environnement. Cette baisse engendre une diminution des revenus qui doivent être amputés des coûts de la pollution. En effet, si la pollution est considérée comme un facteur de production, alors les productivités des deux autres facteurs sont en fait surévaluées pour un niveau donné de production. Les productivités de ces facteurs, et donc leurs rémunérations, doivent être corrigées (Brechet et Jouvét (2009)).

Cette approche est a priori orthogonale à la vision de la « *croissance verte* », qui consisterait à « *promouvoir la croissance et le développement tout en réduisant la pollution et les émissions de gaz à effet de serre, en limitant le plus possible la production de déchets et le gaspillage des ressources naturelles, en préservant la biodiversité et en renforçant la sécurité énergétique* » (OCDE 2011). Elle a néanmoins le mérite de souligner qu'une partie des productivités prêtées aux facteurs classiques de production provient en définitive de la dégradation de l'environnement. Mais elle continue de définir la croissance verte par défaut. Il faut être plus sobre, plus respectueux, faire attention à notre environnement...

Tentons maintenant de considérer l'environnement comme un facteur de production. Il ne s'agit plus dès lors de penser le capital naturel en termes de limitation ou de protection, via des taxes ou des réglementations, mais en termes d'expansion.

Le capital naturel comme facteur de production : le berger et la tonte des moutons

Imaginons le cas simple d'un berger vivant de sa capacité à produire de la laine en tondant des moutons et en lavant la laine brute. Admettons que notre berger est relativement performant à la tonte artisanale avec 10 tontes et 5 toisons propres à l'heure. Le propriétaire décide de faire une expérience en demandant au berger de tondre et laver les toisons des moutons sans utiliser d'eau. Comme c'est bien plus difficile, notre berger arrive à tondre toujours 10 moutons mais ne peut nettoyer que 2 toisons à l'heure. Dans ce cas, la productivité de la ressource en eau correspond aux trois toisons manquantes. Une partie de la création de valeur est donc imputable à l'eau !

Si cette eau devient inutilisable à la suite d'une pollution, la productivité du berger chute. Le paradoxe est donc que la pollution est un facteur de production comme le montre le modèle de Stokey mais qu'elle produit ses propres limites sur les conditions même de la reproduction des facteurs de production. C'est cette rétroaction qu'il nous faut représenter.

De même que le capital productif ou le capital humain, le capital naturel recouvre un ensemble très large de composants allant des ressources naturelles épuisables ou renouvelables à l'ensemble des services que rend l'environnement. Les aspects en terme de ressources ne posent que peu de difficultés d'appréhension qu'il s'agisse de ressources épuisables telles que le pétrole, le charbon, le gaz ou encore l'uranium ou de ressources renouvelables telles que la forêt, les ressources agricoles et halieutiques, la biodiversité (définie en terme de génome) ou encore l'eau. Nous avons

généralement l'impression de pouvoir les concevoir sans trop d'effort. Il est à noter que l'utilisation des ressources exige le plus souvent une immobilisation de capital physique, mais dans le cas des ressources renouvelables cela nécessite également l'existence de services de régulation naturels qui permettent leur reproduction. La détérioration de ces services risque en effet de provoquer la raréfaction, voire la disparition de biens antérieurement considérés comme « libres », c'est-à-dire disponible en quantités infinies : l'eau, l'air, la stabilité du climat, la biodiversité,...

Lorsque nous nous intéressons aux différents services rendus par la nature, la palette à tendance à s'élargir avec des services de production (alimentation, ressources énergétiques, production d'eau, ressources pharmaceutiques, ressources génétiques ou encore ressources ornementales), des services de régulation (qualité de l'air, érosion, purification de l'eau, régulation climatique, amortissement des effets des aléas climatiques), des services primaires (formation des sols, photosynthèse, cycle de l'eau, cycles des nutriments essentiels à la vie) ou encore des services culturels participant à la créativité, l'inspiration, aux valeurs éducatives ainsi qu'à un certain nombre d'activités récréatives allant de la contemplation d'un paysage aux activités sportives de plein air. De manière rétroactive une détérioration de ces différents services peut impacter négativement nos capacités de production directement ou indirectement. L'apparition d'un certain nombre de maladies liées, par exemple à la pollution atmosphérique, peut dégrader le capital humain engendrant ainsi un coût non négligeable pour l'ensemble de l'économie, de même pour la dégradation d'éléments naturels constitutifs du capital productif par exemple la raréfaction des ressources en bois, en biodiversité ou la dégradation des nappes phréatiques.

Il apparaît ainsi que le capital naturel joue un rôle non nul dans la productivité de nos deux facteurs de production habituellement considérés. Dans ce cas, il est logique de considérer qu'une partie de la création de la valeur soit imputable au capital environnemental.

Les modèles de croissance exogène ou endogène accordent en définitive un rôle essentiel au paramètre global, A , de la fonction de production et tentent de lui donner une forme. Si nous admettons que les conditions de reproduction du capital humain et du capital physique dépendent en partie de l'état de l'environnement alors le facteur multiplicatif de la fonction de production doit dépendre de la qualité globale de notre environnement (Q), *i.e.* $A = A(Q)$. Ainsi, la fonction de production intégrant l'environnement dépend non seulement de la pollution émise lors du processus de production mais également de l'accumulation de cette pollution, P , modifiant les conditions dans lesquelles la production est réalisée. En considérant, la qualité de l'environnement comme une fonction décroissante du stock de pollution P , il apparaît que le flux de pollution émit à chaque instant vient augmenter le stock en dégradant les conditions de la production elle-même. La modélisation développée en annexe montre qu'à partir d'un certain niveau, cette rétroaction conduit à une production nulle, c'est-à-dire à la disparition de l'économie. La qualité de l'environnement devient un élément constitutif de la croissance et nous devons imaginer un modèle réussissant à faire le lien entre pollution comme à la fois un facteur de production et une cause de limitation de cette même croissance.

Ces aspects facteurs de production doivent nous faire réfléchir non seulement sur la répartition des richesses entre les différents facteurs de production, mais également sur les conditions de croissance de la production. Investir dans la qualité environnementale n'implique pas seulement une baisse du

rôle de la pollution dans la production mais également une amélioration de l'ensemble des conditions de production et donc des conditions de croissance.

Tableau 4 : Les formalisations de la fonction de production

Forme de la fonction	Prise en compte des externalités	Auteurs
$Y = AF(K,H)$	Progrès technique exogène	Solow(1956)
$Y=AF(K,H,R)$	Epuisement des ressources	Solow(1974) , Dasgupta et Heal (1974) , Stiglitz (1974)
$Y = A(X) F(K,H), X= K, H$	Progrès technique endogène sur la base du capital humain (H) ou physique (K)	Romer (1990), Lucas (1988), Rebelo(1991), Barreau (1996)
$Y = F(K,H,E)$	Pollution dans la production	Stokey (1998), Copland et Taylors (1994), Jouvét, Michel et Rotillon (2005)
$Y = A(Q) F(K,H,E)$	Pollution et qualité de l'environnement dans la production	Notre approche

Source : Auteurs.

Comment cela se passe-t-il sous l'angle de la rémunération des facteurs ?

Capital naturel et rémunération des facteurs de production : qui paye l'eau utilisée pour la tonte ?

Revenons au propriétaire des moutons qui rémunère le berger en fonction de sa capacité à produire une laine propre. Le berger reçoit une rémunération horaire équivalente à la laine produite en une heure soit l'équivalent de deux ou cinq toisons suivant que le nettoyage s'opère à sec ou à l'aide de l'eau. Tant que l'accès à l'eau est gratuit, il ne se pose pas de question distributive : propriétaire et berger ont l'un et l'autre intérêt à puiser sur ce stock naturel pour accroître respectivement profit et salaire. Supposons maintenant que la ressource en eau se raréfiant, il faille payer l'eau pour un montant équivalant à la moitié du salaire horaire du berger : qui doit régler l'addition ? A contrario, investir dans la quantité d'eau peut conduire à augmenter l'ensemble de la production : qui va alors en bénéficier ? Ce sont là les questions clefs pour la mise en œuvre de la croissance verte.

L'un des principes fondamentaux de l'économie est que chaque facteur de production reçoive une part proportionnelle de la richesse créée au titre de sa contribution à la richesse totale, soit une « juste part » de la création de la valeur. Chaque facteur de production pouvant se décliner de manière plus ou moins fine, rien ni personne n'est a priori oublié. Le capital humain allant du salarié sans aucune qualification reconnue au cadre supérieur bardé de diplômes et le capital productif allant du simple marteau à la centrale nucléaire. Dans ce monde simplifié, les salariés reçoivent la part du capital humain et les différents propriétaires du capital productif, la part de ce dernier dans la création de la valeur. Tous les individus consomment et épargnent en fonction de leur revenu et de leur préférence entre les différents biens. Cette économie théorique fonctionne parfaitement bien et les augmentations des différents facteurs de production constituent la source de la

croissance. Il ne reste donc plus qu'à se mettre d'accord sur la véritable part de chaque facteur dans la création de la richesse autrement dit sur l'ensemble des paramètres de la fonction de production...!

L'introduction du capital naturel dans le système de production vient donc modifier en profondeur la rémunération des facteurs classiques de production et leur combinaison dans la fonction de production. A côté du salaire et du profit qui permettent la reproduction du travail et du capital vient s'ajouter la rente environnementale nécessaire à la reproduction du capital naturel. Cette rente doit être prélevée sur les revenus existants. Si le capital est source de pollution, comme l'utilisation du charbon dans une centrale électrique, il semble normal et logique que le prélèvement de valeur s'effectue sur la rémunération du capital. Si c'est la combinaison des facteurs travail et capital qui est source de pollution alors le prélèvement doit s'effectuer proportionnellement à la participation de chaque facteur dans le processus de production. Dans les deux cas, la répartition initiale des richesses entre facteurs de production est modifiée car on leur prêtait une part de la productivité qui est en réalité attribuable au capital naturel.

L'exemple de la tarification des émissions de CO₂ en Europe

L'exemple européen des quotas de CO₂ est, à ce titre, frappant. En décidant la mise en œuvre d'un marché de permis d'émission dans le cadre d'une politique de changement climatique, l'Europe a fait entrer directement les émissions de CO₂ dans la fonction de production. En effet, les permis jouent le rôle d'un facteur de production au même titre que le capital ou le travail et ne sont pas de simples actifs financiers. Pour produire, une firme soumise à cette réglementation a besoin de capital, de travail et de capital naturel sous forme de ressources énergétiques et de quotas de CO₂. Nous sommes donc concrètement passés d'une fonction à deux facteurs de production à une fonction à trois facteurs.

La valeur globale des quotas de CO₂ est assimilable à une rente, apparue au moment où la totalité des émissions de l'industrie européenne a été plafonnée : émettre deux milliards de tonnes de CO₂ (ordre de grandeur approximatif du plafond d'émission de 2005 à 2012), était gratuit avant l'introduction du système de plafonnement d'échange de permis. Si on a un prix moyen de 15 euros la tonne, ces émissions ont désormais une valeur marchande de 30 milliards d'euros. Ces 30 milliards sont la rente qui représente la valeur que les européens accordent à la stabilité du climat, l'un des systèmes de régulation majeur conditionnant la reproduction du capital naturel. Voyons les choix opérés en matière de répartition de cette rente carbone.

Le fait de prendre en considération ce troisième facteur de production ne préjuge pas *a priori* un sens de redistribution des richesses. Durant les deux premières périodes du marché, la grande majorité des quotas a été distribuée gratuitement aux entreprises. Ce type de choix a permis d'éviter la difficile question de la part du revenu, salaire ou profit, qu'il fallait amputer pour financer la reproduction du capital naturel. Comme souvent, l'absence d'arbitrage s'est faite au détriment des finances publiques européennes qui ont renoncé à des recettes consistantes. L'option a-t-elle été judicieuse pour la croissance ? Ristourner la valeur de la rente carbone aux entreprises est une subvention qui pourrait être intéressante si ces dernières l'utilisaient pour investir massivement dans l'économie sobre en carbone. Songeons à la masse d'investissement en jeu, tant

au niveau de la production que de la distribution de l'énergie. Ce type de résultat n'ayant pas été atteint, la plupart des gouvernements européens ont continué à subventionner par ailleurs le déploiement d'énergies renouvelables et le choix a été fait de mettre la majorité des quotas de CO₂ aux enchères pour la troisième période.

A partir du moment où l'autorité publique perçoit la valeur de la rente carbone, ce qui est parfaitement légitime compte tenu du caractère de bien public de l'atmosphère, les impacts distributifs de la rente carbone doivent être examinés avec soin. Si le paiement des quotas de CO₂ par les entreprises s'effectue à taux de profit inchangé, tout se passe comme si les propriétaires du capital productif étaient propriétaires de l'environnement², comme si le propriétaire des moutons était détenteur de l'eau et le bénéficiaire de la rente ricardienne de la fertilité de la terre ! Ce choix serait celui d'une croissance verte que l'on peut qualifier de capitaliste, dans laquelle le salarié et le consommateur doivent supporter tout le poids de l'ajustement. Si les détenteurs du capital productif sont entrepreneurs, cette option peut générer une nouvelle accumulation de capital très bénéfique pour la croissance verte. Mais il y a fort à parier qu'en l'absence de contreponds suffisants du côté du travail et des consommateurs, la dynamique ne soit rapidement bloquée par des coûts sociaux croissants.

Si nous considérons que le capital naturel interfère avec l'ensemble du système productif, alors une partie du profit doit être également rognée par la rente carbone. Dans ce cas de figure, il est logique de rogner le salaire et le profit au prorata de leur contribution antérieure à la production. S'ils veulent retrouver leurs rémunérations antérieures, les détenteurs de travail et de capital n'auront d'autres moyens à court terme que de reporter la facture sur les consommateurs, possibilité qui dépendra principalement de la forme des marchés de biens et services correspondants. Ce choix est socialement plus facilement acceptable. Est-il favorable à la croissance verte ? Tout dépend de l'incitation à investir et des réponses des entreprises en la matière. Si le prix du carbone est à un niveau suffisant, les détenteurs de capital auront la perspective de retrouver le niveau de taux de profit moyen de l'économie en investissant dans les moyens de production et de distribution énergétique sobre en carbone. L'effet est très favorable à une croissance verte plus équilibrée. A contrario, le risque est que la baisse du taux de profit détourne les capitaux de ces secteurs, provoquant soit un recul de l'investissement soit sa fuite vers des zones géographiques où il n'y a pas de prix du carbone. Pour éviter des coûts sociaux à court terme, on risque alors de sacrifier la croissance et le long terme.

De l'exemple du CO₂ à sa généralisation : une typologie des croissances vertes

Supposons maintenant qu'on soit capable de tarifier l'ensemble des composants du capital naturel dont la reproduction est désormais assurée grâce à une rente environnementale. Le passage d'une fonction de production de deux à trois facteurs associés à trois revenus, le salaire, le profit et la rente, nous permet d'esquisser les contours de plusieurs croissances vertes. On peut schématiquement en distinguer trois modèles qui s'opposent tous à la croissance verte de « paille » dont nous commencerons par rappeler les principales caractéristiques.

² Dans la limite du plafond d'émission

Si on maintient la quasi gratuité du capital naturel, ce qui pour l'instant semble la norme, nous sommes en présence d'une forme de capitalisme vert de complaisance soit de type privé soit de type étatique. Mettre une écotaxe de quelques centimes sur les produits électroménagers n'est pas de nature à changer les comportements de consommation ou de production mais permet d'afficher une prise de conscience des problèmes environnementaux de la planète. Il s'agit ici d'une croissance verte « paillette ». Nous introduisons de petites taxes un peu partout au nom de l'environnement mais en prenant garde à ce qu'aucune d'entre elles ne soit de nature à perturber trop fortement les comportements de production et de consommation. Simultanément, on en appelle au civisme des citoyens qu'on informe mieux des questions environnementales et au volontarisme des entrepreneurs et investisseurs qui doivent être « socialement responsables ». Ce type de compromis est facile à trouver dans la société : personne ne souhaite voir augmenter le prix des biens et services qu'il consomme. De même, peu d'investisseurs souhaitent voir rogner le rendement attendu du capital productif accumulé pour cause de coûts environnementaux. En ne changeant pas les parts relative de l'ensemble des facteurs de production, en n'introduisant pas de l'environnement dans le système productif, ces compromis n'imprimeront pas de dynamique nouvelle à la croissance.

Si nous considérons le cas d'une valorisation du capital naturel au détriment du travail, nous sommes alors dans le cas du capitalisme vert, de marché ou d'Etat. La rémunération du capital naturel est prise directement sur la productivité du travail. Il appartient alors aux salariés de tenter d'augmenter leur productivité s'ils veulent échapper à une dégradation de leur rémunération ou à une orientation encore plus importante de la répartition des richesses vers le capital. Un autre trait de ce capitalisme consiste à faire croire que le capital productif seul se montre vertueux en terme d'environnement (le solaire, l'éolien, la voiture électrique,...) alors que le facteur travail, tel qu'il est développé actuellement, se trouve dans une forme d'impasse et qu'il lui appartient d'accepter de se réformer et de s'adapter à la nouvelle donne environnementale. Le coût de l'adaptation est loin d'être neutre et la mise en œuvre d'un nouveau capital productif risque d'être élevé du côté du travail si nous avons en mémoire la fin du textile ou la fin de la sidérurgie. Si de nouveaux emplois sont créés, combien seront amenés à disparaître, le bilan sera-t-il positif ? La question se pose dans la mesure où un capitalisme vert ne change pas les rapports sociaux, mais allonge l'espérance de vie de ceux existants par l'imposition d'une rente environnementale réglée *in fine* par le travail. Les coûts environnementaux de la croissance risquent donc d'être transférés sur des coûts sociaux.

A l'opposé, imaginer une valorisation du capital naturel au détriment du capital productif consiste à considérer un modèle de croissance post-capitaliste dans lequel le capital productif s'ajuste au capital naturel. Dans ce cas les ajustements de productivité ne portent que sur le capital physique. La croissance passe alors par le développement du capital humain et la préservation, la réparation ou le développement du capital naturel. Ceci implique de réajuster fortement le rendement du capital productif pour financer le capital naturel, autrement dit, conduit à considérer le capital naturel comme un investissement rentable. Ceci nécessite l'obtention d'une rentabilité du capital naturel même dans le court terme. Cette perspective apparaît assez irréaliste. Pour valoriser le capital naturel, il faut en effet souvent commencer par des investissements importants en capital physique ou humain. La production des énergies renouvelables ou les gains d'efficacité dans les bâtiments ou les réseaux exigent au démarrage des investissements capitalistes qui ne seront jamais réalisés si le rendement initial du capital physique est trop fortement dégradé. Par ailleurs, les gains considérables de productivité pouvant être générés par l'agriculture écologiquement intensive exigent des investissements importants en connaissance. C'est la raison pour laquelle cette seconde

voie risque de conduire rapidement à un épuisement de la croissance, voire à la décroissance, par trop forte réduction des rendements du capital productif.

Entre les deux voies précédemment tracées, apparaît celle d'une croissance verte où la rémunération du capital naturel s'effectue par ré-affectation des revenus du travail et du capital au prorata de leurs contributions initiales à la pollution. La prise en compte de l'environnement dans la fonction de production doit conduire à une plus grande attention aux coûts d'opportunité. Autrement dit, au fait qu'un développement au prix d'une destruction de l'environnement est source de surcoûts pouvant être évités avec une gestion plus respectueuse du capital naturel. Ces effets bénéfiques peuvent faciliter les modalités de la nouvelle distribution des revenus entre travail et capital qui peut revêtir des volets plus ou moins sociaux, notamment suivant les filets de sécurité utilisés pour protéger les plus faibles. Mais une chose est certaine : on ne verra pas la croissance sans un effort d'épargne pesant à la fois sur les revenus du travail et du capital pour assurer une rente d'un montant suffisant pour redresser la performance du capital naturel en restaurant en particulier ses grandes fonctions régulatrices. Il ne faut surtout pas donner l'illusion qu'avec la croissance verte on « rase gratis » : c'est exactement l'inverse puisque l'effort d'accumulation requis est, au moins au démarrage, plus important. Voyons maintenant comment on peut s'approcher de cette croissance d'un genre nouveau à partir des instruments dont nous disposons dans le monde réel.

3. La mise en œuvre de la croissance verte

Mettre en œuvre la croissance verte consiste à redéployer l'effort d'investissement en intégrant le capital naturel parmi les facteurs de production. Cet investissement a un coût initial dont les retours dépendent du type d'innovations générées et de la diffusion de nouveaux biens et services en résultant. Nous nous intéressons maintenant aux mécanismes susceptibles de déclencher la transition vers cette croissance d'un nouveau type. En première approche, nous avons identifié quatre leviers dont la combinaison pourrait servir de catalyseur.

Un élargissement de la notion d'efficacité

L'un des avantages supposés du marché est de générer de l'efficacité dans l'utilisation des ressources. Et de fait la liste est longue des gains incroyables de productivité ayant permis la diffusion de nouveaux biens et service grâce à la chute des prix. Songeons par exemple au service d'éclairage dont le coût pour les ménages a été divisé par 3000 en deux siècles au Royaume-Uni (Fouquet, 2011).

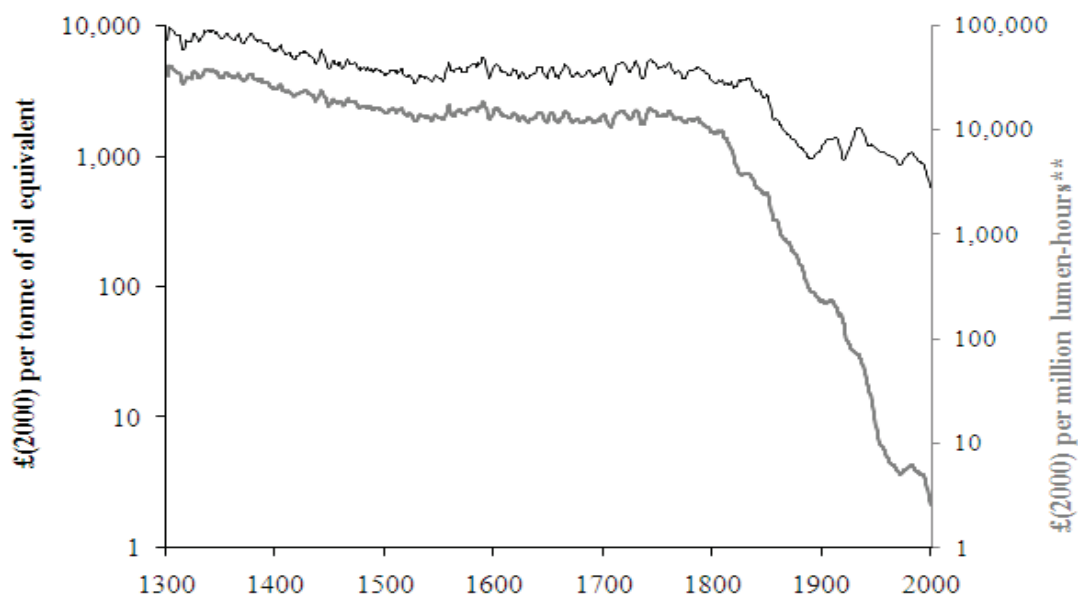
Notre société est-elle pour autant devenue efficace ? La *lean production*, mot d'ordre de l'organisation industrielle mise au point par Toyota, permet d'optimiser le travail le long des chaînes de production. Mais pourquoi s'escrimer à valoriser chaque minute de travail à l'intérieur de l'usine quand des cohortes de chômeurs ne trouvent plus de travail à l'extérieur ? L'industrialisation des chaînes logistiques aboutit à une invraisemblable abondance de produits alimentaires dans nos supermarchés, en provenance de toutes origines géographiques et disponibles en toutes saisons.

Quelle efficacité reflète cette abondance quand plus de 40 % des produits sont gaspillés et qu'une partie de ceux consommés génère de nouvelles pathologies liées à la surconsommation comme l'obésité ou les maladies cardiovasculaires ? La compétition sur les marchés de l'automobile conduit les constructeurs à des progrès constants d'efficacité et de sécurité : en moyenne, une voiture de milieu de gamme européenne peut parcourir aujourd'hui deux fois plus de kilomètres qu'il y a trente ans avec la même quantité d'essence. Où est l'efficacité en termes de mobilité quand toujours plus de véhicules brûlent cette essence en pure perte, immobilisés par la congestion du trafic résultant du trop plein d'engins ?

La transition vers la croissance verte consiste en premier lieu à élargir la notion même d'efficacité. Les travaux conduits au Wuppertal Institut en Allemagne explorent depuis deux décennies les voies d'un tel élargissement. Ils aboutissent à l'idée simple qu'investir sur l'efficacité de l'ensemble des ressources permettrait à nos sociétés de consommer autant de biens et services en divisant par cinq l'utilisation des ressources non renouvelables ou polluantes (Von Weizsacker, 2009). L'élargissement de la notion d'efficacité provoque en effet un triple déplacement dans le fonctionnement de l'économie.

Il rappelle que l'optimisation de l'utilité repose moins sur la quantité des biens et services consommés que sur leur aptitude à rendre les services demandés. Les deux variables sont loin d'être équivalentes dans le long terme. Prenons le cas de l'éclairage dont la diffusion massive a constitué une révolution majeure pour l'organisation de nos sociétés. Comme le montrent Nordhaus (1996) et Fouquet (2011), ce sont les ruptures technologiques à l'aval qui ont permis les bonds en avant de la productivité rendant possible sa diffusion à très large échelle : lampe à pétrole puis au gaz de ville supplantant l'antique chandelle, ampoule à incandescence qui mit plus de quarante ans à s'imposer face au gaz, et enfin ampoules basse consommation. Avec la croissance verte, on passe d'une économie de l'offre de biens et services dont il faudrait gaver le consommateur à une économie de la fonctionnalité dans laquelle on investit dans l'efficacité des usages.

Graphique 1: Prix du service éclairage et de l'énergie utilisée (Royaume Uni, £ constantes)



Source : Fouquet (2011) (reproduit avec l'autorisation de International Association for Energy Economics)

De cette économie de la fonctionnalité dérive naturellement le concept d'économie circulaire dans laquelle la matière première utilisée pour produire certains biens et services est recyclée pour en produire d'autres. Certains pilotes de l'économie circulaire, comme celui de Kalunborg au Danemark, reposent sur l'utilisation de simples complémentarités entre industries lourdes qui généralisent le principe de la cogénération. Les enjeux de l'économie circulaire pour la croissance verte sont nettement plus larges. Ils concernent la généralisation de produits dont la conception et le coût devraient intégrer dès le démarrage la réutilisation à 100 % des matières premières en fin de vie. Un autre volet essentiel est le développement à grande échelle du biogaz qui permet de recycler en énergie tous les sous-produits et déchets issus des biens agricoles et alimentaires.

Un troisième volet de la gestion efficace des ressources consiste à utiliser avec sagacité ce qu'on appelle « l'effet rebond ». Cet effet est généralement présenté comme négatif car il peut manger une partie des économies de ressources naturelles attendues grâce aux progrès d'efficacité. Si l'élasticité de la demande des biens considérés est supérieure à l'unité, on obtiendra même une augmentation de la consommation de cette ressource : Jevons le montra dès le XIX^e siècle dans son fameux essai sur le rôle moteur du charbon dans l'industrialisation du Royaume Uni. Comme le rappellent Ryan et Campell (2012), les gains d'efficacité énergétique peuvent avoir de multiples impacts bénéfiques. L'une des formes courantes de pauvreté énergétique résulte par exemple des performances dégradées des logements occupés par les classes sociales défavorisées contraintes de rationner leurs consommations. Améliorer ces performances est un bon moyen de permettre à ces ménages d'accéder à la couverture de leurs besoins énergétiques de base. Au plan global, ces gains d'efficacité sont l'une des conditions nécessaires pour élargir l'accès à l'énergie dans un monde où près d'un milliard et demi d'habitants sont privés d'électricité et où la précarité énergétique a recommencé à progresser dans les pays riches. C'est une priorité de la croissance verte que d'y contribuer à grande échelle. Comment alors éviter que l'effet rebond soit détourné de ce type d'usage pour alimenter consommations superfétatoires et gaspillages de ressources ? En tarifiant correctement les ressources rares, en commençant par les énergies fossiles dont le prix doit à la fois refléter le caractère épuisable et les risques environnementaux liés à leur usage.

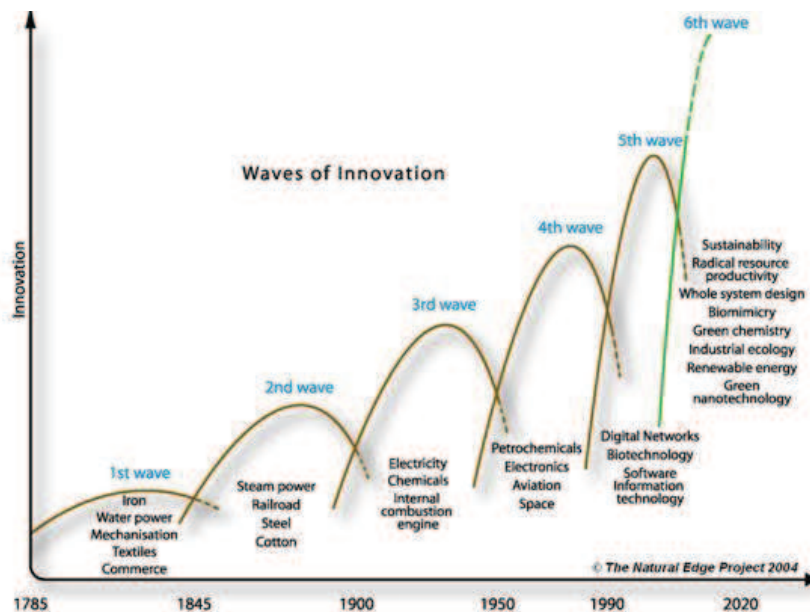
La transition énergétique, motrice de la croissance verte

Chacune des grandes périodes de croissance décrites dans la première section a été sous-tendue par la domestication de certaines énergies rendant possible la diffusion à grande échelle de nouveaux biens et services : charbon et production de vapeur avec le chemin de fer et la sidérurgie, pétrole et moteur à combustion interne, électricité, éclairage et multiples procédés industriels... Ces vagues de 30 à 50 ans s'enchaînent les unes aux autres, rappelant les cycles longs de croissance décrits par Kondratiev.

De vague en vague, le système énergétique s'est détaché d'une situation initiale où la biomasse était la source dominante en accroissant chaque fois le recours aux sources fossiles. La part des fossiles a culminé au seuil des années soixante-dix : en 1973, pétrole, charbon et gaz représentaient 80 % de l'énergie primaire utilisée dans le monde. Quarante ans après, la part du pétrole a bien reculé de près de la moitié à un tiers. Mais la part des fossiles est restée de 80 % en raison de la remontée de l'usage du gaz et du charbon. Notre addiction à l'égard de l'énergie fossile a cessé de croître, mais n'a pas baissé. La prochaine vague d'innovations générée depuis le système énergétique sera celle de la diversification des sources et des modes de production et de distribution de l'énergie nécessaires

pour réduire notre dépendance à l'égard des fossiles. A cause du changement climatique, cette transition devra se faire rapidement : il faut en quarante ans être capable d'inverser la proportion 80-20 en développant des technologies de capture et stockage du carbone permettant d'utiliser après 2050 les 20 % d'énergie fossile résiduelle sans pratiquement plus rejeter de CO₂ dans l'atmosphère. Economiquement, cela n'est envisageable que si le prix des énergies reflète à la fois la rareté géologique des fossiles et leur impact déstabilisant sur le système climatique.

Figure 2: Cycles de croissance et innovations clefs



Source : Von Weizsäcker (2009).

Le modèle économique standard de gestion d'une ressource non renouvelable est la tarification de la rareté via une rente qui s'ajoute au prix de la ressource à mesure que l'on mord dans son stock fini. Les marchés classiques de matières premières tarifient, de façon certes un peu chaotique, la rente de rareté ricardienne associée au caractère non renouvelable des énergies fossiles : chacun peut constater que le prix du pétrole est bien supérieur à son coût de production et de distribution en raison des écarts considérables de productivité entre les différents gisements. Mais ces marchés fonctionnent de façon très imparfaite. Le premier levier pour tarifier correctement les énergies fossiles est par conséquent d'améliorer le fonctionnement des marchés énergétiques.

La financiarisation des marchés énergétiques est souvent pointée du doigt, comme étant responsable des mouvements en yo-yo qui rendent illisibles les cours. Echappant à la plupart des régulations, les marchés au comptant s'avèrent pourtant souvent bien plus opaques que les marchés à terme. C'est sur eux que doit prioritairement porter l'effort de régulation qui requiert la mobilisation d'une information sur les conditions de l'offre et de la demande physique souvent volontairement tenue opaque. Une autre entorse à la tarification de la rareté des énergies fossiles est la pratique de subventions à objectifs sociaux (prix de détails de l'essence en Iran ou en Indonésie) ou économiques (subvention du charbon en Allemagne ou de la tourbe en Irlande). L'AIE estime à plus de 409 milliards de dollars en 2010 ce type de subvention dans le monde, ce qui représente environ deux fois l'ensemble des soutiens publics au développement des énergies

renouvelables. La bonne information sur la rareté des énergies fossiles exige que ces subventions soient supprimées ou substituées par d'autres leviers d'intervention. La mise sur pieds de fonds souverain destinés à réallouer la rente pétrolière et gazière vers des usages économiquement et socialement utiles à long terme est une voie permettant d'agir dans cette direction. Leur développement dans un certains nombres de pays pétroliers peut constituer l'un des leviers du financement de la croissance verte.

Mais une deuxième rareté doit être prise en considération : celle de la capacité de l'atmosphère à absorber les rejets de gaz à effet de serre. Parmi les sept « frontières planétaires » identifiées dans la première section, le changement climatique joue un rôle spécifique. Il est le système dont l'altération risque d'avoir le plus d'impact sur les autres systèmes régulateurs naturels : biodiversité, cycle de l'eau, usage des terres. Si on prend en compte le risque climatique, le rythme et les modalités de la transition énergétique doivent être totalement modifiés. Le stock d'énergies fossiles dans le sous-sol recèle en effet bien plus de carbone que ne peut en absorber l'atmosphère. Fonder la transition énergétique sur la seule rente ricardienne apparaissant sur les marchés énergétiques classiques conduit à prolonger l'extraction du stock. Il faut donc encadrer la transition énergétique à l'intérieur d'une mutation plus large vers une économie sobre en carbone. Un deuxième prix doit dès lors être introduit et devenir rapidement directeur : le prix du droit d'émettre des gaz à effet de serre dans l'atmosphère que nous appellerons le prix ou la valeur carbone (Delbosc & De Perthuis, 2012).

Depuis la signature de la convention climat au sommet de Rio en 1992, l'introduction d'un prix du carbone dans la vie économique a fait l'objet de multiples discussions dans le cadre de la négociation internationale et a conduit à la mise au point de nombreux pilotes : mécanismes économiques du protocole de Kyoto, instauration de taxes carbone dans les pays d'Europe du Nord, marchés de quotas en Europe, dans certains Etats américains, en Australie et Nouvelle Zélande, et bientôt en Corée et en Chine (Jouvet & De Perthuis, 2011). Le prototype le plus achevé, le système européen d'échange de quotas fournit trois enseignements majeurs sur l'introduction dans une économie d'un prix pour valoriser le capital naturel :

- l'introduction de la valeur carbone modifie les rendements relatifs des différentes activités en conduisant à une orientation différente des outils de production. En Europe, le prix du carbone a provoqué des réductions d'émission de l'ordre du milliard de tonnes au cours des deux premières phases du marché (de 2005 à 2012). Les rentabilités respectives du charbon, du gaz et de la biomasse renouvelable pour produire de l'électricité sont en effet radicalement modifiées dès que la valeur carbone atteint un certain niveau.

- pour produire son plein effet, la valeur carbone doit modifier les anticipations de long terme des entreprises qui investissent dans des infrastructures de production ou de distribution en place pour plusieurs décennies. Ceci pose un problème de crédibilité de l'autorité publique sur le long terme dans un environnement où l'horizon politique du décideur a tendance à se raccourcir, particulièrement dans les contextes de crises. C'est la raison pour laquelle la mise en œuvre de politiques climatiques ambitieuses appelle à des innovations dans la gouvernance publique tant au plan national qu'international.

- L'apparition du prix du carbone dans une économie pose immédiatement une question en termes de distribution des revenus. En France, l'introduction d'une tarification du carbone sous la forme de la « contribution climat-énergie » en 2009 a buté sur un problème de répartition et la totalité du débat public s'est focalisé sur une question : qui va payer et qui va profiter ? Sur le marché européen,

la règle de l'allocation gratuite consistant à transférer aux entreprises la rente créée par le prix du carbone a conduit nombre d'acteurs à passer plus de temps à négocier leur allocation qu'à chercher des voies innovantes de réduction d'émission. Le passage aux enchères en troisième phase explicite les enjeux de redistribution entre pays et entre acteurs. Au plan international, les discussions aux Nations Unies portent essentiellement sur ces volets distributifs. Dans le conclave de la négociation climatique, les décideurs ne parlent guère du climat et de la planète : ils discutent gros sous !

Pour installer la tarification du carbone dans l'économie, et faire de la valeur carbone la variable directrice de la transition énergétique, il faut par conséquent maîtriser ses effets distributifs. La leçon dépasse le cadre strict du changement climatique : qu'il s'agisse du climat, de la biodiversité, du cycle de l'eau, de la couche d'ozone ou de tout autre composante du capital naturel, la mise en œuvre de la croissance verte implique de traiter des questions complexes de distribution.

De questions nouvelles de répartition et d'équité

L'intégration de la valeur du capital naturel dans la vie économique modifie la répartition préexistante des revenus, ce qui pose des questions d'équité. Les arbitrages en la matière peuvent être explicites ou implicites mais ne peuvent masquer une réalité économique de base : il y a des perdants et des gagnants. Il faut intégrer ces volets distributifs pour réussir le passage à la croissance verte comme l'illustrent trois exemples pris à l'échelle internationale, nationale et dans le domaine de l'action pour la protection de la biodiversité.

Au plan international, la difficulté de mise en place d'une régulation globale des émissions de gaz à effet de serre renvoie à une question de répartition assez facile à représenter. Une tarification uniforme du carbone de 20 dollars la tonne avec une répartition égalitaire (par habitant) des droits à émettre aboutirait à des transferts massifs de revenu depuis les pays industrialisés vers les pays en développement : un flux global de l'ordre de 200 milliards de dollars par an, deux fois la totalité de l'aide publique au développement (De Perthuis, 2011). Avec une contribution de 93 milliards, les Etats-Unis seraient le premier perdant tandis que l'Inde serait le premier bénéficiaire avec un gain de 110 milliards. Un tel dispositif est plébiscité par les pays en développement qui seraient prêts à signer immédiatement un tel accord. A l'opposée, les pays riches sont favorables à une distribution des droits à émettre reflétant les niveaux historiques suivant une formule dite du « droit du grand-père » qui a été retenue dans le cadre du protocole de Kyoto. Les prochaines étapes de la négociation consistent à rechercher d'ici 2015 une formule de compromis qui permette d'intégrer les pays émergents dans un système d'engagement commun. En l'absence d'accord global, des prix différents du carbone émergeront, reflétant les conditions spécifiques des différentes régions s'engageant dans des politiques climatiques. La question clef en matière d'équité et d'efficacité sera alors le type de lien pouvant rattacher ces différents sous-ensembles.

A contrario, le protocole de Montréal, signé en 1987, est parvenu en deux décennies à éradiquer les rejets des gaz fréon à l'origine de la destruction de la couche d'ozone. Sa réussite a reposé sur l'instauration d'une norme interdisant l'usage de ces gaz, couplée à un mécanisme subventionnel pour faciliter la reconversion des usines situées dans les pays en développement. Deux types de transferts ont permis la réussite spectaculaire de cette action conduite à l'échelle internationale : un transfert financier explicite vers les pays du Sud ; un transfert implicite en faveur de l'entreprise américaine Dupont de Nemours qui après avoir participé au lobbying général mettant en doute les

dangers inhérents à l'utilisation des gaz fréon est devenue l'un des plus chauds supporters de leur interdiction. L'entreprise ayant été la première à mettre au point une technologie de substitution a été la grande bénéficiaire de cette nouvelle régulation.

Les effets distributifs des actions en faveur de l'environnement se retrouvent à l'intérieur de chaque pays. En France, il existe toute une batterie d'instruments d'intervention de l'Etat dont les impacts distributifs sont mal connus. Citons quelques exemples : les ménages investissant pour améliorer l'efficacité énergétique de leur logement bénéficient de déductions fiscales, parfois très généreuses. Propriétaires de leur logement et assujettis à l'imposition, ils auraient souvent les moyens de faire ces investissements en l'absence des mesures. Comment mesurer l'efficacité réelle de ce type de dispositif, tant sous l'angle de l'efficacité que de l'équité ? Autre exemple : l'adoption progressive de normes thermiques ambitieuses est plébiscitée par les trois grands groupes de BTP français. Il n'y a aucune raison de mettre en doute leur engagement en faveur de l'environnement. Mais la norme ne risque-t-elle pas d'accentuer le déséquilibre des forces au sein de la filière entre les trois majors et la cohorte des petites et moyennes entreprises ? Une autre évaluation reste à faire : celle des impacts distributifs des tarifs de rachat de l'électricité renouvelable dont bénéficient les ménages auto-producteurs et qui doivent normalement être répercutés sur l'ensemble des clients via un mécanisme de péréquation.

Outre la mise à plat de l'ensemble des dispositifs existant en faveur de l'environnement, la mise en œuvre de la croissance verte implique dans chaque pays des arbitrages explicites dans deux domaines : le prix de l'énergie fossile payé par les ménages et les reconversions professionnelles. Le phénomène dit de « pauvreté énergétique » touche environ 15 à 20 % des ménages en Europe occidentale et augmente rapidement depuis 2008. Pour engager la transition énergétique avec une adhésion sociale, il faut coupler le renchérissement des énergies fossiles avec des leviers ciblés sur ces ménages. A court terme, plusieurs voies peuvent être étudiées, de la tarification croissante en fonction des consommations par tête de l'électricité et du gaz (modèle californien) à des compensations ciblées lors du verdissement de la fiscalité (s'opposant à la technique du « chèque vert » indifférencié). Sur le front de l'emploi, il ne fait guère de doute que la croissance verte est à la fois créatrice de nouveaux emplois et destructrices d'anciens dans les activités prédatrices de capital naturel ne parvenant pas à s'adapter. Les coûts de la transition peuvent s'avérer très lourds socialement en l'absence d'actions volontaristes de reconversion permettant d'assurer la fluidité du marché du travail.

Il est un domaine dans lequel le subjectif semble parfois prendre le dessus dans la prise de décision : la protection de la biodiversité. C'est presque par affection qu'il nous faudrait protéger l'ours polaire, le tigre du Bengale ou les espèces menacées d'oiseaux migrateurs. Sans évoquer le cas du panda si cher à une grande organisation environnementale ! En réalité, ce n'est pas l'ours ou le tigre qui importe, mais la dégradation de l'écosystème qui lui sert d'habitat et à laquelle il est bien difficile de donner une valeur. Contrairement au changement climatique pour lequel le CO₂ est devenu l'étalon d'une métrique universelle, il est en effet impossible de se mettre d'accord sur une unité commune de biodiversité et encore moins de lui affecter un prix. Nos sociétés affichent pourtant une valeur très élevée pour la biodiversité dans certaines circonstances : la compagnie BP l'a expérimenté à ses dépens lors de l'accident sur sa plateforme Deepwater dans le Golf du Mexique dont les impacts sur la biodiversité marine ont rapidement fait oublier l'existence de onze victimes humaines. Mais en dehors de ces situations exceptionnelles, les enjeux de répartition liés à la protection de la biodiversité restent méconnus.

Les atteintes à la biodiversité sont multiformes, comme les actions de conservation engagées. Le vecteur le plus important à l'échelle du globe résulte des changements d'usage des sols consécutifs à l'extension de l'agriculture et de l'élevage (OECD 2012). La pression qui en résulte sur les milieux naturels riches en biodiversités n'est nullement le résultat d'une volonté des agriculteurs ou des éleveurs de détruire la nature. Elle résulte de la croissance de la demande de produits alimentaires provenant de la démographie et des changements du mode d'alimentation. Le premier investissement de conservation de la diversité des espèces consiste donc à mettre en place les incitations économiques rendant plus intéressante l'utilisation de la biodiversité pour la production agricole que sa destruction. Cela ouvre de nouveaux champs à la recherche agronomique et pose une question de répartition entre les différents groupes sociaux qui sont en compétition pour l'usage de ces sols. On le voit dans les pays développés à forte densité de population où l'expansion périurbaine mord de façon croissante sur des terres agricoles (la forêt et les milieux humides étant généralement mieux préservés). Mais c'est sur les fronts de la déforestation tropicale que cette question est la plus exacerbée. La réussite de la négociation internationale sur l'arrêt de la déforestation dépend de la capacité des projets à faire la preuve sur le terrain qu'on peut rendre économiquement plus intéressant la valorisation de la biodiversité, en intégrant en particulier les savoirs faire des communautés locales, pour accroître l'offre agricole et alimentaire. Autre illustration : l'édiction du nouveau code forestier brésilien qui est probablement la décision politique la plus importante en la matière dans le monde. Elle donne lieu à un arbitrage complexe que la présidente Rousseff doit rendre, face à un parlement sensible à l'influence des *ruralistas*, partisans de renforcer le poids du Brésil parmi les grands exportateurs agro-alimentaires, quitte à sacrifier quelques dizaines de millions d'hectares de forêt amazonienne et les communautés qu'ils font vivre.

Les leviers du financement

En théorie, à partir du moment où la valeur du capital naturel est correctement intégrée à la fonction de production, les acteurs économiques réagissent spontanément au changement des rendements économiques en redéployant leurs investissements. Dans la pratique, la mise en œuvre de la croissance verte implique une révision de la grille d'évaluation des risques utilisée au sein du système financier. Cette grille doit être élargie par une meilleure prise en compte du capital naturel, et son horizon temporel doit être allongé.

Les financements bancaires. Contrairement à une idée reçue, la déréglementation des marchés financiers n'a nullement réduit le rôle des banques dans le financement des économies. Le premier levier à actionner pour le financement de la croissance verte est par conséquent bancaire. Le renforcement des règles prudentielles s'applique aux banques indépendamment de la nature des financements déployés. Il risque en conséquence de tarir les financements destinés au verdissement de la croissance. Pour mobiliser les ressources nécessaires aux plus faibles taux d'intérêt possibles, il convient de mettre en place des dispositifs favorisant la rentabilité de cette catégorie de financements. Donnons deux exemples : la rénovation des parcs immobiliers et le financement international de projets.

Dans tous les systèmes bancaires du monde, le financement du logement et de l'immobilier est le premier moteur de la distribution du crédit. De la faillite de la Kreditanstalt à Vienne en 1931, à la

crise des subprimes en 2008, ce sont du reste les défaillances dans ce domaine qui précipitent les crises bancaires. Or l'un des investissements les plus nécessaires à la transition énergétique consiste à convertir les parcs immobiliers : à l'heure actuelle à l'origine de 25 à 30 % des émissions de CO₂ ces parcs peuvent devenir neutres ou même exportateurs nets d'énergie. Si on accepte d'étaler la transition sur plus de 100 ans, il suffit de s'attaquer aux constructions neuves en fixant des normes thermiques ambitieuses et en les faisant respecter par l'offre et la demande additionnelles de logements. Le problème est alors de financer un surcoût de l'ordre de 10 à 20 % par logement neuf sans faire baisser l'activité ce qui se produira mécaniquement en l'absence d'incitations économiques adéquates. L'intégration de la rénovation du parc ancien accroît la complexité car les coûts de mise à niveau sont supérieurs et varient d'un immeuble à l'autre. Dans les deux cas, le système bancaire ne peut assurer spontanément ce type de financement dont les retours sur investissement se comptent souvent en décennies. D'où la nécessité de trouver les bons leviers pour abaisser le taux d'intérêt sur ce type de prêts. L'une des innovations intéressantes en la matière est conduite au Royaume Uni dans le cadre de la *Green Investment Bank*, nouvelle banque publique dont l'un des premiers objectifs est de faciliter la rénovation énergétique des logements en gageant les prêts sur les économies futures d'énergie et d'émissions de CO₂.

Les infrastructures énergétiques sont l'un des principaux segments de l'activité de financement de projets des banques internationales. Le « verdissement » de cette activité peut être en premier lieu facilité par l'utilisation de standards. Les « principes de l'Equateur » édictés en collaboration avec la Banque Mondiale ont ouvert la voie en 2003. La *Climate Bonds Initiative* tente de mettre en place un tel standard pour l'ensemble des émissions d'obligations censées financer la transition vers une économie bas carbone. Dans les deux cas, il est difficile d'évaluer si ces standards permettent de réduire le coût des financements verts en attirant plus de capitaux. Un levier autrement plus important, est la possibilité introduite dans le sillage du protocole de Kyoto de valoriser directement sur un marché de permis les réductions d'émission obtenues grâce aux projets. Lorsque le prix du CO₂ atteint 15 dollars la tonne, ces recettes peuvent représenter jusqu'à 20 % des revenus des projets d'efficacité énergétique ou d'énergie renouvelable, en accroissant fortement leurs rendements financiers. Renforcer la tarification du carbone permettrait de démultiplier l'effet de levier.

Les investissements de conservation et de compensation. Judicieusement utilisée, la valeur carbone pourrait également contribuer aux investissements nécessaires à la conservation de la biodiversité. Face au risque d'extinction de la biodiversité, les premières mesures prises ont été d'ordre réglementaire : la constitution de zones naturelles protégées, sous l'égide des pouvoirs publics (par exemple les espaces Natura 2000 en Europe). Relativement efficaces dans les pays développés, ces méthodes restent virtuelles dans nombre de pays en développement. Elles doivent être combinées à des instruments incitant les populations locales à valoriser les services que peut apporter la préservation des écosystèmes.

La protection de la forêt tropicale est l'un des moyens les plus sûrs d'y parvenir en évitant simultanément de rejeter de l'ordre de 6 à 8 milliards de tonne de CO₂ par an. Si on parvenait à donner une valeur de 15 dollars à chaque tonne d'émission évitée, on atteindrait une somme de l'ordre de 100 milliards, soit le montant que les pays industrialisés se sont engagés à transférer vers les pays du Sud à la conférence de Copenhague. Ici encore, la valeur carbone pourrait provoquer un

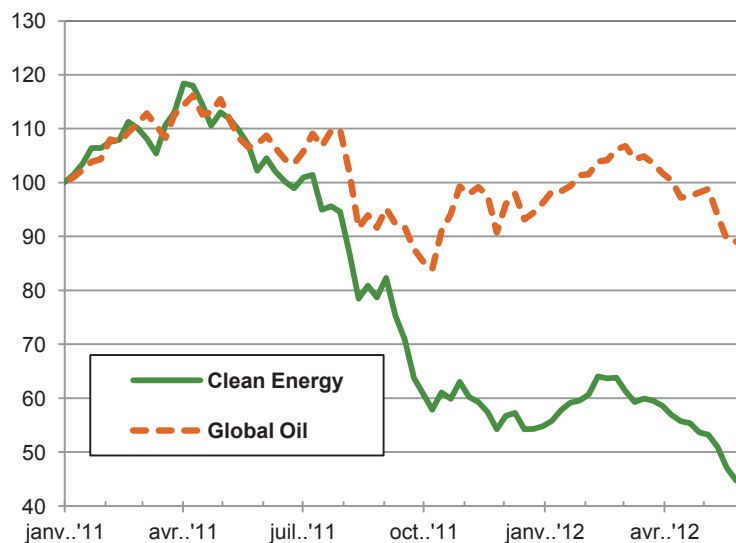
effet de levier majeur, relayant les efforts effectués à bien plus petite échelle par la Banque Mondiale et le gouvernement norvégien. C'est devenu un enjeu majeur de la négociation climatique.

Une autre voie pour investir dans la biodiversité est de mettre en place des systèmes de compensation prenant comme étalon une unité standard de biodiversité. Ces mécanismes introduits avec le développement des *Mitigation Banks* dans les années quatre-vingts aux Etats-Unis ont attiré dans le monde des investissements de l'ordre 3 à 4 milliards de dollars. En France, la Caisse des Dépôts a lancé en 2010 un programme de compensation permettant de donner un début d'application à l'obligation de compenser les atteintes à la biodiversité résultant d'une loi de 1976 !

Les investisseurs de long terme. Parmi les acteurs susceptibles de contribuer le plus à la mutation du système financier, une mention doit être faite aux investisseurs de long terme : fonds souverains, fonds de pension, compagnies d'assurance vie,... Ces acteurs ont en commun de mobiliser d'importants actifs avec une perspective de rentabilité à long terme et des contraintes étalées dans le temps du côté du passif. Certains, à l'image des fonds pétroliers norvégiens, ont déjà engagé une stratégie d'allocation du portefeuille explicitement tournée vers la transition énergétique et l'investissement dans la biodiversité.

Pris ensemble, ces acteurs ont un certain poids : s'ils déplaçaient leurs capitaux vers les entreprises les plus innovantes en matière de croissance verte, nul doute que l'échelle des rendements financiers entre valeurs boursières en serait bousculée. Malgré le volontarisme de certains, on en est encore assez loin. En témoigne par exemple l'évolution des cours boursiers à New York qui ont entre janvier 2011 et mai 2012 accordé une surcote de 40 % aux entreprises pétrolières sur celle engagées dans les énergies renouvelables. La réduction du risque climatique est encore bien mal valorisée à Wall Street au regard des bénéfices immédiats apportés par les gaz de schiste !

**Graphique 2: rendements boursiers comparés des entreprises énergétiques
(Indices Standard & Poor's – Monde)**



Source : New Energy (reproduit avec l'autorisation de Energy Intelligence)

Les financements publics. Impossible d'aborder les questions de financement sans évoquer le rôle des Etats. Au plus fort de l'euphorie régnant lors de la formation de la bulle spéculative, il était de bon ton de minimiser le rôle de ces acteurs ringards. La mise en route de la croissance verte appelle pourtant un redéploiement des financements publics dans le domaine des infrastructures et de la R & D.

Le mode d'organisation de l'espace urbain et rural est modelé très longtemps à l'avance par les choix en matière d'infrastructures collectives, notamment les infrastructures de transport. Même si les utilisateurs et le capital privé peuvent contribuer au financement de certains ouvrages, le rôle des Etats reste dans tous les cas déterminant. La croissance verte appelle en la matière des arbitrages nouveaux, souvent difficiles à prendre. Dans des pays comme le Brésil ou l'Indonésie, l'ouverture de nouvelles voies de communication dans les forêts primaires est un vecteur qui démultiplie la pression sur les écosystèmes mais peut apporter d'autres bénéfices à court terme. Faire les bons choix implique de donner une valeur suffisante aux services rendus par ces écosystèmes et requiert un volontarisme politique certain. En France, plusieurs commissions ont successivement abaissé le taux d'actualisation utilisé par les pouvoirs publics et incorporé une valeur du carbone croissant dans le temps pour modifier les choix d'investissement public. Cela n'a pas encore permis la relance des investissements en faveur du fret ferroviaire dont la nécessité fait par ailleurs l'objet d'un large consensus.

Les Etats sont aussi attendus en matière de soutien à l'investissement immatériel sous forme de soutien à la R & D. La croissance verte requiert en effet une accélération des innovations pour mettre en œuvre une conception élargie de l'efficacité. Par beaucoup de côté, elle est bien plus technique que l'ancienne croissance. Dans les contextes européens, peu de pays ont les moyens d'accroître leur effort en la matière en dehors de l'Allemagne qui suit résolument cette voie depuis dix ans en matière d'efficacité énergétique. En France, un renforcement des soutiens publics à la R & D pourrait aller de paire avec un verdissement de la fiscalité. Les simulations commandées par le groupe de travail sur les transitions vers l'économie sobre en carbone révèlent en effet que la forme la plus appropriée de recyclage d'une taxe carbone serait d'en affecter deux tiers à la réduction des charges et un tiers à la stimulation de la R & D (Centre d'Analyse Stratégique, 2011). D'après les simulations conduites à l'aide du modèle macroéconomique du Trésor, cela provoquerait des créations nettes d'emploi dès la seconde année atteignant de l'ordre de 100 000 personnes d'ici 2020. Reste à conduire les travaux pratiques pour vérifier la pertinence de la simulation !

Conclusion

Notre analyse consiste pour l'essentiel à montrer qu'il est possible même à court terme d'activer les leviers d'une croissance verte. Les analyses historiques, théoriques et pratiques conduisent à repenser nos modes de production en incluant les gains engendrés par l'environnement dans nos choix productifs. Les tentatives de maintenir de la croissance sur la base des progrès techniques en seule réponse à l'épuisement des ressources ou à la pollution ne conduisent en fait qu'à une dégradation accélérée des fonctions de régulation de l'environnement et mettent en danger les conditions même de renouvellement des facteurs classiques de production. C'est la raison pour laquelle la transition énergétique doit intégrer dès à présent la valeur carbone pour protéger la capacité naturelle de régulation du climat.

Dans nos économies contemporaines, sans attendre un changement complet des comportements ou une tarification généralisée du capital naturel, nous avons la possibilité d'impulser une dynamique de croissance verte. Ceci passe essentiellement par l'intégration graduelle de la valeur de l'environnement dans nos décisions et la prise en compte des phénomènes de redistribution en résultant. Il n'y a pas a priori un antagonisme inéluctable entre efficacité et équité. Trouver la juste rémunération des facteurs de production (efficacité économique) peut conduire à la mise en œuvre d'une politique de redistribution (équité sociale).

Si nous pouvons, déjà, percevoir quelques conditions d'une croissance verte, il nous reste à étudier au sein des secteurs de production les possibilités et orientations réelles à prendre pour que cette croissance soit la plus profitable à court, moyen et long terme. Pour y parvenir, il faut identifier les innovations techniques et d'organisation permettant des gains d'efficacité sur l'ensemble des ressources et construire les modes de financement permettant de les diffuser le plus rapidement possible.

Bibliographie

- Acemoglu, D. (2009), *Introduction to Modern Economic Growth*, Princeton University Press.
- Bairoch, P. et Levy-Leboyer, M. (1981), *Disparities in Economic Development since the Industrial Revolution*, MacMillan, London.
- Barro, R. (1996), *Determinants of Economic Growth: A Cross-Country Empirical Study*.
- Brechet, Th. et Jouvét, P. A. (2009), *Why environmental management may yield no-regret pollution abatement options*, Ecological Economic.
- Centre d'Analyse Stratégique (2011), *Trajectoires 2020-2050 vers une économie sobre en carbone*, rapport du comité présidé par De Perthuis, C. Paris.
- Copeland, B. R. et Taylor, M. C. (1994), *North-south trade and the environment*, Quaterly Journal of Economics.
- Dasgupta et Heal, 1974, *The optimal Depletion of Exhaustible Resources*, Review of Economics Studies, 41, pp 1-28.
- Delbosq, A. et De Perthuis, C. (2012) *Et si le changement climatique nous aidait à sortir de la crise ?*, Le Cavalier Bleu, Paris.
- De Perthuis, C. (2011), *Et pour quelques degrés de plus*, 2^e édition, Pearson, Paris (également disponible en anglais sous le titre : *Economic Choices in a Warming World*, Cambridge University Press).
- Fouquet, R. (2011), *Divergences in long run trends in the prices of energy and energy services*, Review of Environmental Economics and Policy 5 (2).
- Fouquet, R. et Pearson, P. (2012) *Long Run Trends in the Efficiency Cost and Uptake of Lighting Services: Implications for Current Policies*, Economics of Energy & Environmental Policy, IAEE, Vol1 N°1.
- Griffon, M. (2006), *Nourrir la planète*, Odile Jacob, Paris.
- Hallegatte, S., Heal, G., Fay, M. et Treguer, D. (2011), *From Growth to Green Growth, A Framework*, Policy Research Working Paper N°5872, Banque Mondiale.
- Hallegatte, S. et Fay, M. (sous la direction de) (2012), *Inclusive Green Growth: The Pathway to Sustainable Development*, Banque Mondiale.
- Jouvét, P.A., De Perthuis, C. et alii (2011), *Climate Economics in Progress 2011*, Ouvrage collectif de la Chaire Economie du Climat, Economica, Paris.
- Jouvét, P. A., Michel, P. et Rotillon, G. (2005), *Optimal growth with pollution: How to use pollution permits*, Journal of Economic Dynamics and Control.

- Lucas, R. E. (1988) *On the Mechanics of Economic Development*, Journal of Monetary Economics, 22, 3–42.
- Maddison, A. (2001), *The World Economy, A Millennial Perspective*, OECD Development Center.
- Meadows, D.H., Meadows D. L. et Randers, J. (1972), *The Limits to Growth*, Universe Books, New York.
- OECD (2011), *Vers une croissance verte*, OECD, Paris.
- OECD (2012), *Environmental Outlook to 2050*, Paris.
- Nordhaus, W.D. (1996), *Do Real Output and Real Wages Capture Reality? The History of Lighting Suggests Not*, In “The Economics of New Goods”, Chicago University Press, Chicago.
- Rebelo, S. T. (1991) *Long-Run Policy Analysis and Long-Run Growth*, Journal of Political Economy, 99(3), 500–521.
- Rockström et al. (2009a), *Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity*, Ecology & Society, **14** (2): 32, Supplementary information p19.
- Rockström et al. (2009b), *A Safe Operating Space for Humanity*, Nature, Vol 461, September 2009
- Romer, P. (1990) Endogenous Technological Change, Journal of Political Economy,
- Ryan, L. and Campell, N. (2012), *Spreading the Net: The Multiple Benefits of Energy Efficiency Improvements*, IEA, Insights Series, Paris.
- Solow, R. (1956), *A contribution to the theory of economic growth*, Quaterly Journal of Economics.
- Solow, R. (1974), *Intergenerational equity and Exhaustible Resources*, Review of Economics Studies, 41, pp 29-45.
- Stiglitz, J. (1974), *Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths*, The Review of Economic Studies, Vol. 41, Symposium on the Economics of Exhaustible Resources (1974), pp. 123-137.
- Stokey, N. L. (1998), *Are there limits to growth?* International Economic Review 39, 1-31.
- Von Weizsacker, E.U. et alii (2009), *Factor Five: Transforming the Global Economy through 80% Improvements in Resource Productivity*, Earthscan, London.

Annexe technique

Nous modélisons ici l'ensemble des interactions entre environnement (qualité de l'environnement, émissions, stock de pollution) et la production. Ceci nous permet de souligner 1) la part des productivités des facteurs capital physique et capital humain revenant aux émissions, 2) le rôle de la qualité de l'environnement dans la production et 3) les effets cumulatifs de la pollution.

A1. Les technologies

La fonction de production à la période t s'écrit

$$Y_t = B_t F(K_t, H_t)$$

avec K_t le capital physique et H_t le capital humain. En faisant un mixte entre les modèles de croissance endogène classiques, $A(Q_t)$ et une technologie à la Stokey (1998), nous avons

$$B_t = zA(Q_t)$$

avec Q_t la qualité de l'environnement, $A'(Q_t) > 0$, $A(0) = 0$ et z un indice d'utilisation de la technologie, z compris entre 0 et 1. La pollution par unité de production est une fonction croissante de z . La fonction de production est alors définie par,

$$Y_t = z A(Q_t) F(K_t, H_t)$$

Nous pouvons définir un indice de pollution comme le ratio entre émissions et production,

$$I(z) = E_t / A(Q_t) F(K_t, H_t)$$

On suppose $I(\cdot)$ est une fonction bijective croissante, convexe et vérifiant $I(0)=0$, $I'(\cdot) > 0$ et $I''(\cdot) > 0$.

Remarque si $z < 1$ alors le modèle est équivalent à une fonction de production à trois facteurs intégrant le flux de pollution E_t . Nous obtenons cette fonction en éliminant z entre les équations précédentes.

$$Y_t = I^{-1}(E_t / (A(Q_t) F(K_t, H_t))) A(Q_t) F(K_t, H_t) = G(K_t, H_t, E_t, Q_t).$$

Remarque : E_t peut s'interpréter comme étant un niveau d'extraction d'une ressource épuisable (type hydrocarbure) ou inclure l'utilisation de ressources épuisables polluantes si nous avons un lien univoque entre la ressource et les émissions. Dans ce cas, il suffit de remplacer le niveau d'extraction par la relation avec E_t et nous obtenons une fonction de production à trois facteurs sans faire de détour par une fonction incluant directement une ressource épuisable.

Un indice de la qualité de l'environnement à la date t peut être défini en fonction de la qualité de l'environnement sans pollution, Q_0 et du stock de pollution accumulée jusqu'à cette date, P_t . Le stock de pollution à la date t est donné par une combinaison entre les stocks passés accumulés, P_{t-1} , et le flux d'émission, E_t . Ceci nous permet de considérer la rétroaction du flux de pollution sur la qualité de l'environnement et donc sur les possibilités de production, $Q_t = Q(P_t, E_t)$.

Dans ce cas, la production devient,

$$Y_t = A(Q_t(P_t, E_t)) F(K, H, E)$$

Nous pouvons alors raisonner aussi bien en termes de pollution que de qualité de l'environnement. Mais investir dans la dépollution revient à diminuer les facteurs limitant de la croissance alors qu'investir dans la qualité de l'environnement permet d'accroître la croissance potentielle.

A2. Le cas Cobb-Douglas

$$\text{Fonction de production : } Y_t = A_t K_t^\alpha H_t^\beta,$$

$$\text{Indice de pollution : } I(z) = z^{1+\gamma}$$

En substituant z entre les deux relations nous obtenons :

$$Y_t = A_t^{\gamma/1+\gamma} K_t^{\alpha\gamma/1+\gamma} H_t^{\beta\gamma/1+\gamma} E_t^{1/1+\gamma}$$

En considérant que la qualité de l'environnement est une fonction $A(Q_t) = A(Q(P_t)) = (Q_0/P_t)^\theta$ et que $P_t = P_0^{(1-\lambda)t} E_t^\mu$, avec λ une taux naturel d'absorption de la pollution compris entre 0 et 1, et μ la part du flux d'émission contribuant à l'augmentation du stock de pollution, nous obtenons alors

$$Y_t = Q_0^{\theta\gamma/1+\gamma} P_0^{-\theta(1-\lambda)t/1+\gamma} K_t^{\alpha\gamma/1+\gamma} H_t^{\beta\gamma/1+\gamma} E_t^{(1-\theta\mu\gamma)t/1+\gamma}.$$

Donc si on laisse croître la pollution la qualité de l'environnement tend vers zéro et les possibilités de production également, $A(0) = 0$. Nous obtenons ainsi une description complète de la production prenant en compte l'ensemble des interactions avec l'environnement.

Série Information et Débats

n° 15 • Juin 2012

n° 15 • Juin 2012

La croissance verte : de l'intention à la mise en œuvre
par Pierre-André Jovet et Christian de Perthuis

n° 14 • Mars 2012

Marché européen des quotas de CO₂ : les enjeux du passage à la phase 3
par Christian de Perthuis et Raphaël Trotignon

n° 13 • Janvier 2012

Emissions de gaz à effet de serre et politique agricole commune : quel ticket gagnant ?
par Benjamin Dequiedt

n° 12 • Novembre 2011

Conférence climatique de Durban : l'enjeu de la mesure des flux de carbone forestier
par Gabriela Simonet

n° 11 • Septembre 2011

Towards low-carbon mobility: tackling road transport emissions
par Rémi Russo et Virginie Boutueil

n° 10 • Août 2011

Carbon markets regulation: the case for a CO₂ Central Bank
par Christian de Perthuis

n° 9 • Avril 2011

Twenty years of carbon taxation in Europe: some lessons learned
par Jeremy Elbeze et Christian de Perthuis

n° 8 • Octobre 2010

Cancun: Year One of the Post-Copenhagen Era
par Henri Casella, Anaïs Delbosc et Christian de Perthuis

Nous contacter :

Chaire Economie du Climat - Palais Brongniart (4^e étage)
28 Place de la Bourse, 75 002 Paris
Tel : +33 (0)1 73 01 93 42
Fax : +33 (0)1 73 01 93 28
Email : contact@chaireeconomieduclimat.org

Directeur de la publication : Christian de Perthuis
Les opinions exposées ici n'engagent que les auteurs. Ceux-ci assument la responsabilité de toute erreur ou omission

La Chaire Economie du Climat est une initiative de CDC Climat et de l'Université Paris-Dauphine

