

**LE POINT SUR L'ÉNERGIE****DES FAITS POUR LA POLITIQUE ÉNERGETIQUE DE DEMAIN****Entrevoir l'avenir**

**En 2050, la Terre abritera plus de 9 milliards d'habitants. La performance économique mondiale aura au moins doublé par rapport à aujourd'hui. La Chine et l'Inde devraient évincer l'Europe et les Etats-Unis des premiers rangs des espaces économiques, mais c'est en Afrique que la population va croître le plus vite. Quelles sont les conséquences de cette évolution en termes d'approvisionnement énergétique, d'émissions de CO<sub>2</sub> et de réserves de matières premières? Le PSI et le Conseil mondial de l'énergie (CME) se sont penchés sur la question.\***

Le développement économique n'a pas été des plus roses en Europe et aux Etats-Unis, ces dernières années, et il s'est ralenti dans certains pays émergents. Mais cela ne devrait pas durer. Les prévisions à long terme donnent une croissance économique mondiale d'environ 3% ou plus par an, supérieure à la moyenne dans les pays aujourd'hui en développement et émergents.

L'évolution de la demande, de l'utilisation des différentes sources d'énergie, des émissions de CO<sub>2</sub> et de l'accès à l'approvisionnement en électricité, va dépendre des conditions cadre économiques. Si l'on mise avant tout sur les forces du marché, l'économie connaîtra une plus forte croissance, ce qui permettra de fournir de l'électricité à une bonne partie des 1,3 milliards de personnes qui n'y ont pas accès aujourd'hui.

Revers de la médaille: une utilisation plus importante du charbon, du gaz et du pétrole, et des émissions nettement plus élevées de CO<sub>2</sub>. Seule une politique climatique internationale coordonnée, qui fixe des balises, pourrait permettre aux énergies renouvelables de percer rapidement. Idem pour la séquestration de CO<sub>2</sub>. Quant à l'amélioration rapide de l'efficacité énergétique, elle n'est possible que moyennant un soutien politique et des investissements en recherche et développement.

Différents intérêts doivent être pris en compte: pour les pays moins développés, une croissance économique rapide aura la priorité. Alors que les pays où le niveau de vie est élevé peuvent aujourd'hui déjà se permettre d'encourager des technologies écologiques et de soutenir des pays pauvres sur la voie du développement durable.

\* L'étude complète peut-être téléchargée sous forme de rapport du Conseil mondial de l'énergie sur <http://www.worldenergy.org/publications/>.

**AVEC ANNEXE****Contenu:**

- 2 Croissance: **Marché ou régulation?**
- 3 Conséquences: **Objectifs climatiques: encore réalisables?**
- 4 Entretien avec Christoph Frei: **«Les scénarios mettent à nu certains mythes dans le domaine de l'énergie»**

# Marché ou régulation?

**L'an 2050 est encore très loin. Et personne ne sait comment le monde s'approvisionnera alors en énergie. Il vaut néanmoins la peine de jeter un coup d'œil vers l'avenir: à quoi pourrait ressembler un développement, dont le plus de gens possible profiteraient?**

Pour répondre à cette question, le PSI a esquissé deux scénarios (voir tableau 1) en partenariat avec le Conseil mondial de l'énergie (CME). Ces derniers calculent l'impact possible de différents objectifs de développement et conditions cadre sur l'approvisionnement énergétique mondial d'ici 2050. Le premier scénario «Jazz» est orienté marché: dans le monde entier, les priorités sont la croissance économique et un accès bon marché à l'énergie. Alors que dans le second scénario «Symphonie», les gouvernements et les organisations internationales misent davantage sur une politique coordonnée et sur la régulation. Des instruments sont censés garantir la sécurité de l'accès à l'énergie et prévenir les dommages environnementaux, comme un prix international des émissions de CO<sub>2</sub>, mais aussi l'encouragement de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables. Conséquence des standards écologiques de haut niveau: la diminution de l'attrait des sources d'énergie fossiles non conven-

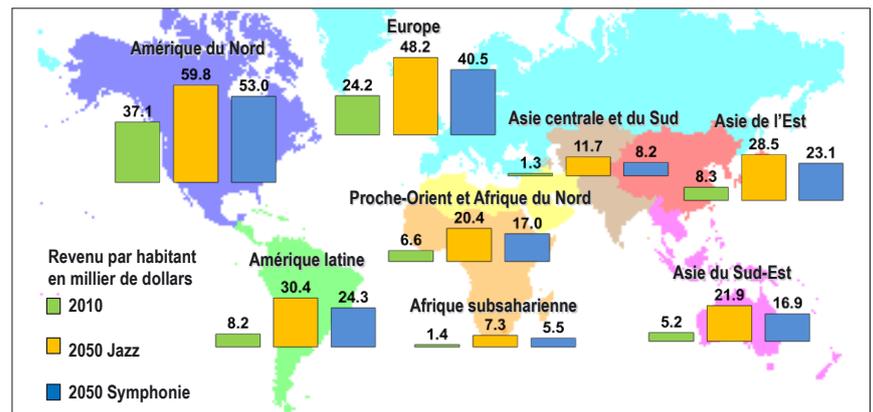
tionnelles, comme les gaz de schiste et les sables bitumeux.

## Croissance de la population et de l'économie

Dans le scénario «Jazz», qui ne prévoit pas de mesures de régulation, la croissance économique est plus rapide. L'augmentation des revenus entraîne un ralentissement de la croissance démographique. Les différences entre les régions sont frappantes (voir illustration 1): alors que d'ici 2050, dans le meilleur des cas, le revenu par habitant double en Europe et en Amérique du Nord, dans d'autres régions, comme l'Asie centrale, il est presque dix fois plus haut qu'aujourd'hui. Mais c'est en Europe et en Amérique du Nord que le niveau de

vie reste le plus élevé, et de loin. Et c'est en Afrique subsaharienne que la situation est la moins bonne: la région connaît une croissance économique, mais la population passe de 860 millions d'individus en 2010 à 1,6 milliards («Jazz»), respectivement à 2 milliards («Symphonie»).

Les différences entre les deux scénarios sont plus importantes dans les pays en développement qu'en Amérique du Nord et dans l'UE. En termes de revenu par habitant, les pays en développement profitent davantage de l'ouverture internationale des marchés dans le premier scénario. Ce qui devrait leur permettre aussi de s'adapter au réchauffement climatiques et autres dommages environnementaux.



**Illustration 1:** Développement économique d'ici 2050, en fonction du produit intérieur brut (PIB) par habitant.

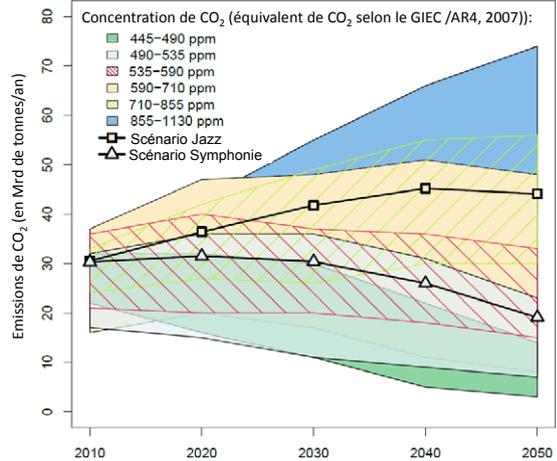
	Scénario «Jazz»: futur orienté marché	Scénario «Symphonie»: futur orienté régulation
<b>Objectifs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Accès avantageux à l'énergie via les marchés libres</li> <li>Haut revenu</li> </ul> → Dommages environnementaux: surtout adaptation	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sécurité de l'accès à l'énergie</li> <li>Régulation ciblée (Etat et organisations internationales)</li> </ul> → Dommages environnementaux: surtout mesures préventives
<b>Croissance économique</b> (produit intérieur brut PIB)	<b>Priorité à la croissance du PIB</b> (moyenne annuelle: 3,5% d'ici 2050)	<b>Croissance moindre du PIB</b> (moyenne annuelle: 3,1% d'ici 2050)
<b>Population</b>	<b>Augmentation</b> (8,7 milliards en 2050)	<b>Augmentation plus forte</b> (9,3 milliards en 2050)
<b>Politique climatique</b>	<b>Evolution lente des marchés du CO<sub>2</sub></b> (prix du CO <sub>2</sub> en 2050: 23–45 \$/tCO <sub>2</sub> )	<b>Pilotage gouvernemental rapide</b> (prix du CO <sub>2</sub> en 2050: 70–80 \$/tCO <sub>2</sub> )
<b>Efficacité/intensité énergétique</b>	<b>Efficacité: amélioration selon critères économiques</b>	<b>Efficacité et mesures d'économie: encouragement public</b>
<b>Ressources non conventionnelles</b> (gaz et pétroles de schiste, sables bitumeux)	<b>Ouverture des marchés.</b> Forte incitation à l'utilisation, augmentation de la consommation	<b>Régulation</b> (consommation d'eau, accès au marché). Peu d'incitation, diminution de la consommation
<b>Energies renouvelables</b>	<b>Encouragement limité.</b> Seules les technologies économiquement viables s'imposent	<b>Encouragement public sélectif</b>
<b>Energies non renouvelables</b>	<b>Encouragement limité:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>CCS modulé en fonction du marché, installations pilotes dès 2030</li> <li>Certaines centrales nucléaires en construction ne sont pas mises en service</li> </ul>	<b>Encouragement public:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>CCS disponible dès 2020</li> <li>Energie nucléaire, gros hydraulique</li> </ul>

**Tableau 1:** comparaison des deux scénarios. CCS: Carbone Capture and Storage (captage et stockage du carbone).

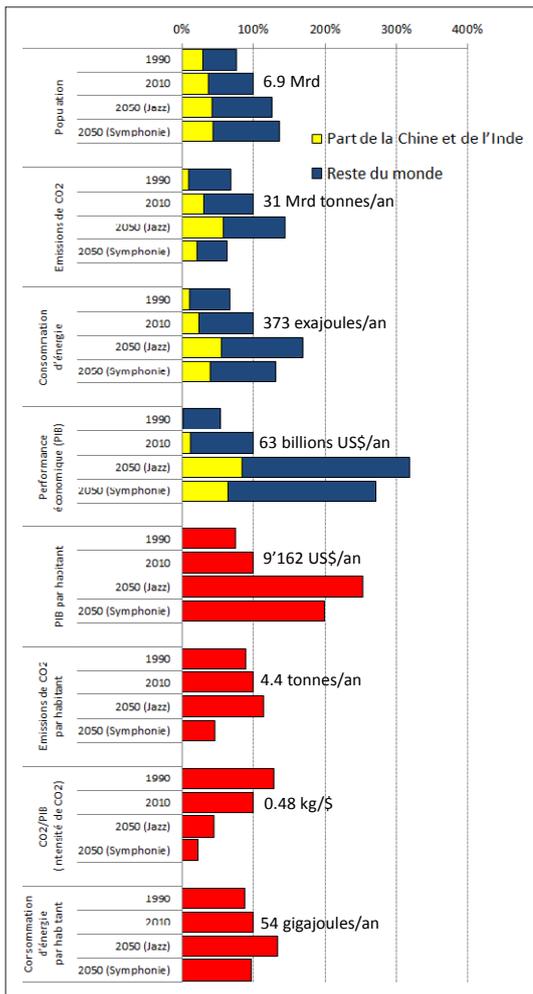
# Objectifs climatiques: encore réalisables?

**Jusqu'ici, l'élévation du niveau de vie s'est toujours traduite par une augmentation de la consommation d'énergie. En dépit d'une utilisation plus efficace de l'énergie, la consommation mondiale continuera d'augmenter. Nos choix en matière de sources d'énergie et de technologies joueront un rôle décisif.**

Dans le scénario orienté marché, on mise dans toutes les régions sur les sources d'énergie les moins chères, en fonction du prix du marché – notamment pétrole, charbon et gaz naturel. Sur l'ensemble de l'approvisionnement énergétique, la part des sources d'énergie fossiles représente environ 80% en 2050, ce qui correspond peu ou prou au taux actuel. Les mesures de régulation et de protection du climat dans le scénario «Symphonie» réduisent cette part à tout juste 60%. Si dans les deux scénarios, les transports continuent à dépendre du pétrole, la production d'électricité présente de grandes différences (voir page 5).



**Illustration 3:** Evolution des émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2050 dans les deux scénarios, avec en arrière-plan les zones de concentration à long terme de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Ces zones résultent des scénarios d'émissions du GIEC. Exemple: les émissions du scénario «Jazz» évoluent au milieu de la zone hachurée en vert, ce qui donne une concentration de CO<sub>2</sub> de 710–855 ppm. Selon les dernières connaissances du GIEC, une concentration de 800 ppm correspond à un réchauffement de 2.0 à 3.7 °C à la fin du siècle.



**Illustration 2:** Evolution de différents paramètres dans les deux scénarios, de 1990 à 2050.

## L'efficacité énergétique ne suffit pas

La consommation mondiale d'énergie augmente (voir illustration 2), même si la tendance vers une meilleure efficacité énergétique se poursuit, voire se renforce dans le cas du scénario orienté régulation. Cette évolution est due à la croissance économique et démographique mondiale. Mais les mesures de régulation dans le scénario «Symphonie» ont un impact: la consommation d'énergie par habitant baisse légèrement comparé à aujourd'hui, alors que dans le scénario orienté marché, elle augmente d'un tiers d'ici 2050. Si l'on compare le développement des pays industrialisés actuels avec celui des pays émergents et en développement, le déplacement des centres de gravité vers l'Asie et l'Afrique apparaît clairement. D'où l'importance d'une politique internationale coordonnée.

## Conséquences pour le climat

En matière d'émissions de CO<sub>2</sub>, les différences sont importantes. Dans le scénario orienté marché, elles sont presque 50% plus élevées qu'aujourd'hui. Une politique climatique efficace dans le scénario

orienté régulation fait diminuer les émissions de 40% par rapport à aujourd'hui. Dans le premier scénario, les émissions par habitant augmentent de 15%, alors qu'elles diminuent pratiquement de moitié dans le second. Cette évolution positive est due à une utilisation beaucoup plus soutenue de technologies non émettrices de CO<sub>2</sub>, à l'introduction de la séquestration géologique du CO<sub>2</sub> lors de la production d'électricité, mais aussi à une moins forte augmentation de la consommation énergétique.

Les conséquences pour le climat sont en rapport. L'illustration 3 montre l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> dans les deux scénarios, ainsi que la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (conséquence de différents scénarios d'émissions du GIEC). Dans le scénario «Jazz» orienté marché, l'objectif d'un réchauffement global ne dépassant pas 2 °C à la fin de ce siècle ne pourra vraisemblablement pas être atteint. Avec la politique de protection du climat «Symphonie», on est en revanche sur la bonne voie. C'est ce qui ressort des dernières connaissances du GIEC.

## «Les scénarios mettent à nu certains mythes dans le domaine de l'énergie»

### Quelles sont les principales conclusions des nouveaux scénarios énergétiques du PSI et du Conseil mondial de l'énergie?

Ces scénarios mettent à nu certains mythes dans le domaine de l'énergie. D'abord, celui d'une baisse à venir de la demande en combustibles et en carburants fossiles: elle n'a pas lieu. Deuxièmement, le monde n'atteint pas son objectif de diminuer de moitié d'ici 2050 les émissions globales de gaz à effet de serre par rapport à 1990. Dans les deux scénarios du CME, les émissions sont deux, voire quatre fois supérieures par rapport à cet objectif. Et la troisième, c'est que d'ici 2050, nous ne réussissons pas à éliminer la pauvreté énergétique.

### Où voyez-vous les plus grandes incertitudes en matière d'approvisionnement énergétique?

Les scénarios sous-estiment l'influence des innovations, susceptibles de modifier fondamentalement l'environnement énergétique. Notamment dans les domaines des accumulateurs d'énergie et du CCS, où des percées auraient des conséquences importantes.

### Qu'est-ce qui distingue des autres les scénarios énergétiques du CME?

Avec ses 3000 organisations membres dans 100 pays, le Conseil mondial de l'énergie a un accès unique aux signaux de développement. De là, nous développons des scénarios «bottom-up», en nous demandant ce qui est plausible et faisable en fonction des meilleures informations. Les autres scénarios travaillent sur une base top-bottom, ou avec des feuilles de route, où l'on se demande comment aller de A à B. Deuxièmement, le modèle PSI-CME est fondé sur une philosophie «open source» unique. Le modèle de calcul des scénarios est mis à disposition de tiers. La troisième différence concerne les résultats: pour le bouquet technologique, ils sont similaires à ceux d'autres organisations. Mais pour l'efficacité énergétique, nous sommes moins optimistes, en raison de l'évolution des 20 dernières années. Les gains d'efficacité étaient plus importants au cours des années 1990 qu'au début de la décennie 2000–2010.

### «Les émissions de CO<sub>2</sub> doivent avoir un prix»

mement, le modèle PSI-CME est fondé sur une philosophie «open source» unique. Le modèle de calcul des scénarios est mis à disposition de tiers. La troisième différence concerne les résultats: pour le bouquet technologique, ils sont similaires à ceux d'autres organisations. Mais pour l'efficacité énergétique, nous sommes moins optimistes, en raison de l'évolution des 20 dernières années. Les gains d'efficacité étaient plus importants au cours des années 1990 qu'au début de la décennie 2000–2010.

### Si vous pouviez choisir la manière dont évoluera le monde, votre préférence irait-elle au scénario orienté marché, ou au scénario orienté régulation?

Dans le scénario «Jazz», les décisions sont prises de manière décentralisée, alors que les dispositions orchestrées ont la priorité dans «Symphonie». Des deux côtés, il y a des forces et des faiblesses. L'exemple du gaz de schiste montre l'une des forces d'un environnement «Jazz», sous la forme d'une percée d'innovation. De l'autre côté, avec une base «Symphonie», la Chine réduit fortement sa pauvreté. Nous devons tirer les leçons des deux constellations, et nous demander quels sont les moyens qui permettent d'atteindre au mieux tel ou tel objectif.

### «La demande en carburants fossiles augmentera»

### Comment gérer les coûts externes qui ne sont pas pris en compte dans ces scénarios, par exemple les coûts possibles du changement climatique, ou encore ceux des maladies dues aux émissions de polluants?

Toute forme de distorsion du marché – les coûts externes, comme les subventions – entraîne un gaspillage. Il serait important d'éliminer les subventions existantes, mais c'est politiquement difficile lorsqu'elles ont été introduites pour limiter la pauvreté. Tenir compte des coûts externes est tout aussi important. Les émissions de CO<sub>2</sub> doivent s'ac-



**Dr. Christoph Frei** est secrétaire général du Conseil mondial de l'énergie (CME), un réseau mondial et indépendant, qui représente l'ensemble des acteurs dans le domaine de l'énergie. Avant de prendre ses fonctions au CME, il a été directeur Énergie du Forum économique mondial (WEF) et membre du Conseil exécutif du WEF (2001–2009). Christoph Frei est docteur de l'EPF en économétrie et en électrotechnique depuis 2001.

compagner d'un signal lié au prix. Ces deux mesures doivent viser une plus grande efficacité énergétique et une meilleure utilisation des ressources.

### Le Conseil mondial de l'énergie va-t-il poursuivre cette analyse de scénario? Avec quels points forts?

Oui, certainement. Nous sommes fiers de notre collaboration avec le PSI: le CME contribue avec son réseau unique, et le PSI par le biais de ses chercheurs de haut niveau. De nouvelles questions émergent sans cesse. Comme celle de l'impact de certaines percées dans les domaines du stockage de l'énergie et du CCS. Avec les élargissements que j'ai cités, mais aussi avec de nouveaux partenariats et de nouvelles questions, l'avenir de l'analyse de scénarios s'annonce palpitant.

L'interview complète: [www.psi.ch/info/energie-spiegel](http://www.psi.ch/info/energie-spiegel)

### Impressum

**Le point sur l'énergie** est une publication du PSI sur l'évaluation globale des systèmes énergétiques (projet GaBE). Auteurs: Martin Densing, Hal Turton, Evangelos Panos et Kathrin Volkart.

ISSN: 1661-5131

**Tirage:** 15 000 ex. en allemand, 4000 ex. en français, 800 ex. en anglais  
Anciens numéros disponibles en Pdf (D, F, E): <http://gabe.web.psi.ch/>

#### Responsable du contenu:

Paul Scherrer Institut  
Stefan Hirschberg  
5232 Villigen PSI, Suisse  
Tél. +41 056 310 29 56  
[stefan.hirschberg@psi.ch](mailto:stefan.hirschberg@psi.ch)  
[www.psi.ch/GaBE](http://www.psi.ch/GaBE)

**Rédaction:** Christian Bauer

**Distribution et souscriptions:**  
[energiespiegel@psi.ch](mailto:energiespiegel@psi.ch)

**Traduction:** Catherine Riva

**Layout:** Paul Scherrer Institut

**Analyses des systèmes énergétiques au PSI:** L'objectif des analyses des systèmes énergétiques au Paul Scherrer Institut à Villigen est l'appréciation globale et détaillée des systèmes énergétiques d'aujourd'hui et de demain. On considère en particulier des critères de santé publique, d'écologie et d'économie. Sur la base des Analyses de Cycle de Vie (LCA), des modèles d'économie énergétique, des analyses des risques, des modèles de dispersion des substances nocives et, enfin, d'une analyse multi-critères il est possible de comparer différents scénarios énergétiques, afin d'offrir une base pour des décisions politiques.

#### Collaborations avec:

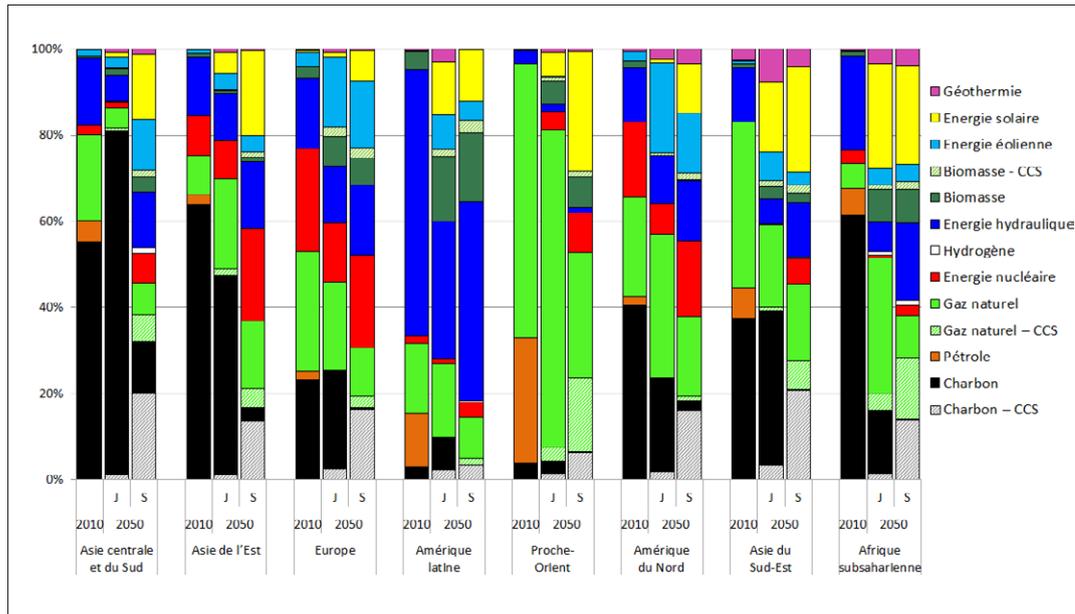
ETH Zürich; EPF Lausanne; Empa; Office fédéral de l'énergie (OFEN); swisselectric research; World Energy Council (WEC); Massachusetts Institute of Technology (MIT); Union Européenne (EU); Agence Internationale pour l'Énergie (IEA); Organisation pour la Coopération et le Développement Économique (OECD)

# L'électricité: une clé pour la réduction du CO<sub>2</sub>

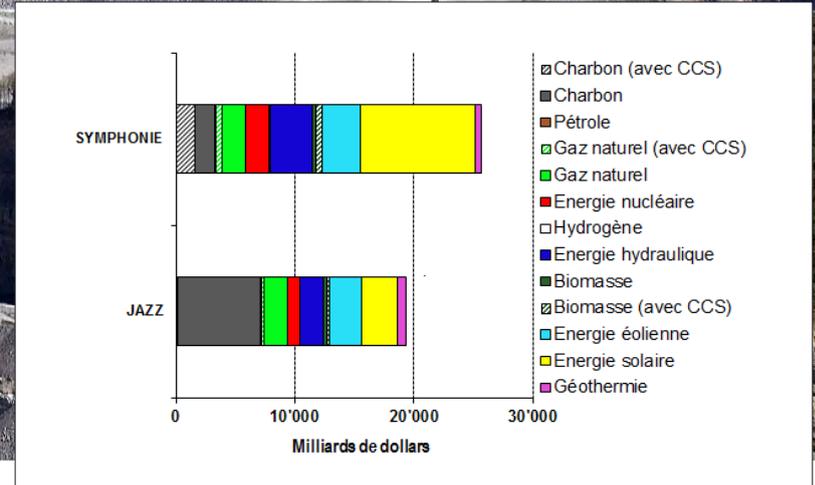
La Suisse a la chance de pouvoir produire beaucoup d'électricité grâce à l'énergie hydraulique. Ce n'est pas le cas de nombreux pays, où on brûle du charbon et du gaz naturel. Conséquences: des émissions de polluants et un impact négatif sur le climat.

La manière dont l'électricité sera produite à l'avenir dépendra largement d'orientations politiques (voir illustration 4): dans le scénario «Jazz», orienté marché, les coûts de production sont déterminants et doivent être aussi bas que possible. Dans le souci d'éviter les risques financiers, les grands projets (centrales nucléaires et hydrauliques) n'ont guère la cote. L'augmentation de la demande d'électricité est surtout couverte par le charbon et le

gaz naturel en Asie, en Afrique et au Proche-Orient. Les énergies renouvelables ne sont exploitées que là où elles sont concurrentielles sans subventions: l'énergie solaire au Proche-Orient, en Afrique ou dans le Sud de l'Asie, et l'énergie éolienne en Europe et en Amérique du Nord.



**Illustration 4:** production d'électricité par source d'énergie entre 2010 et 2050, dans les différentes régions du monde, pour les deux scénarios. «J»: scénario «Jazz» orienté marché; «S»: scénario «Symphonie» orienté régulation.



**Illustration 5:** investissements au niveau mondial d'ici 2050 dans la production d'électricité par source d'énergie, en milliards de dollars.

## Soutien aux énergies renouvelables

Avec une politique internationale du climat, d'autres coûts et d'autres facteurs entrent en jeu, comme de faibles émissions de CO<sub>2</sub> et une moindre dépendance à l'égard des sources d'énergie importées. Pour atteindre ces objectifs, les énergies renouvelables bénéficient de soutiens financiers dans le scénario «Symphonie». L'Etat assume les risques liés aux gros investissements dans l'hydraulique et le nucléaire. En même temps, des conditions cadre sont créées pour que la séquestration du CO<sub>2</sub> (captage et stockage du carbone CCS) puisse s'imposer. Résultat: dans de nombreuses régions, un bouquet énergétique propre, avec une part nettement plus importante d'énergie solaire, éolienne, hydraulique et nucléaire. La part de gaz naturel, de charbon et de pétrole baisse partout dans le

monde, passant des 70% actuels à moins de 40%. L'exploitation des centrales à charbon ne se fait plus, pour ainsi dire, sans séquestration de CO<sub>2</sub>.

Pareille transformation coûte cher. Au cours des prochaines décennies, le secteur de l'électricité nécessitera de toute façon des investissements importants. Mais dans le scénario «Symphonie», avec politique de protection du climat, les investissements sont un tiers plus élevés (voir illustration 5), même si la consommation d'électricité est inférieure de 10% en 2050. Les montants supplémentaires sont surtout investis dans les installations solaires, et dans les centrales nucléaires et hydrauliques. D'ici 2050, de nouvelles centrales doivent être construites, avec une puissance de 17'000 GW pour «Symphonie», et de tout juste 14'000 GW pour «Jazz».

# Assez d'énergie pour tous?

A peine concevable dans nos pays industrialisés, une vie sans accès à l'électricité est toujours le quotidien de 1,3 milliards de personnes, soit d'un être humain sur cinq. Cette situation est souvent liée à la pauvreté, mais aussi au manque d'infrastructure.

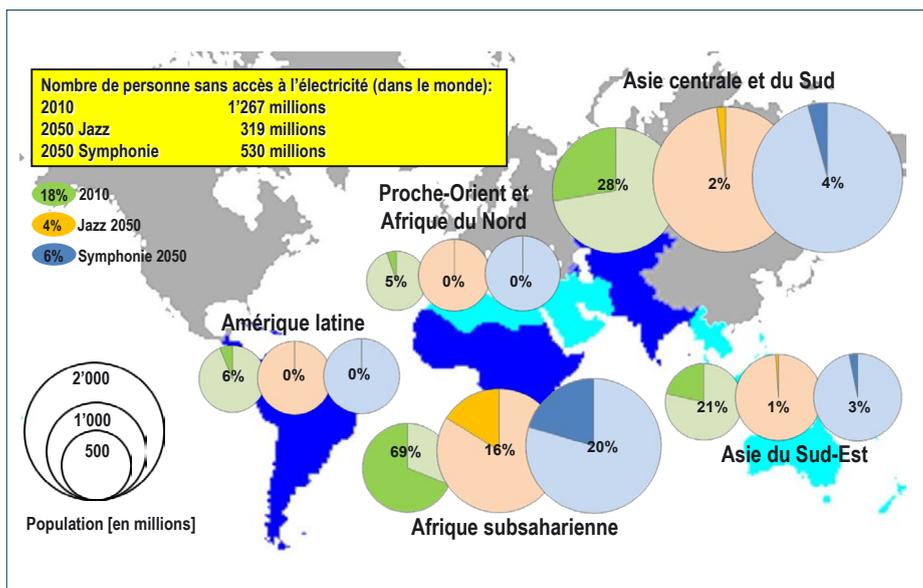
En Afrique subsaharienne, une grande partie de la population doit s'en sortir aujourd'hui sans électricité (voir illustration 6). C'est aussi le cas en Asie. Ces personnes sont obligées, le plus souvent, d'utiliser du bois ou du fumier pour cuisiner. Résultat: une mauvaise qualité de l'air dans les habitats, qui entraîne des atteintes sérieuses à la santé.

L'élévation du niveau de vie et la stabilité sociale sont la clé pour améliorer cette situation. D'ici 2050, le nombre de personnes n'ayant pas accès à l'électricité diminuera notablement. Mais davantage dans le scénario orienté marché, où il devrait s'abaisser à 300 millions. Une évolution surtout due à l'élévation rapide du niveau de vie et à l'urbanisation.

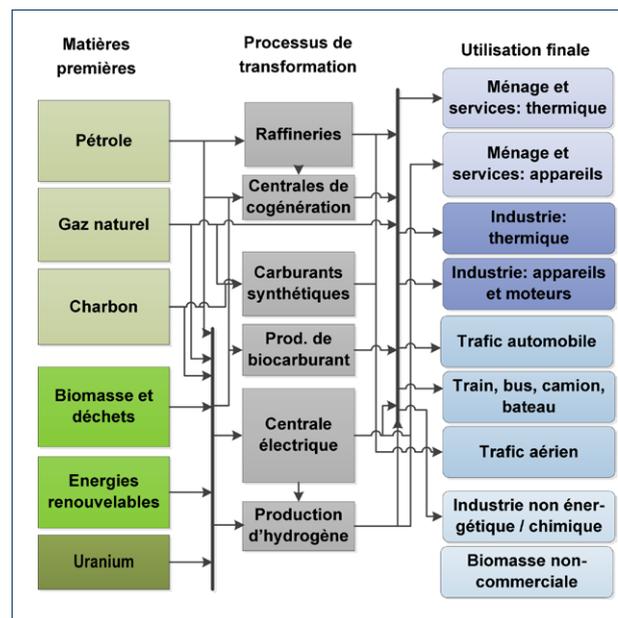
Dans le scénario «Symphonie», plus de 500 millions de personnes restent privées d'électricité. Les Etats s'efforcent de mettre à disposition l'infrastructure, mais les ressources financières font souvent défaut.

Le PSI a utilisé un modèle «MARKAL» pour ses **calculs de scénario**. Cet instrument d'optimisation calcule chaque fois la composition la plus avantageuse de l'approvisionnement énergétique, dans 15 régions du monde et dans des conditions cadre prédéfinies. Ce cadre diffère dans les scénarios «Jazz» et «Symphonie». Pour les besoins énergétiques donnés, le modèle choisit la combinaison optimale parmi quelque 400 technologies (p. ex. centrales, chauffages, véhicules) dans chaque région. Ce choix se fait en tenant compte de la consommation de l'industrie, des transports et des ménages (voir illustration 7). Les résultats dépendent des coûts des technologies et des sources d'énergie, mais aussi du moment où elles peuvent être utilisées, ainsi que de l'évolution à venir de la population et de l'économie. Les futurs progrès technologiques sont pris en considération, par exemple l'augmentation du rendement des centrales. L'évolution des coûts des centrales, du charbon, du gaz et du pétrole est également incluse. Le calcul intègre aussi les coûts des émissions de CO<sub>2</sub> et les différentes possibilités d'utilisation des énergies renouvelables selon les régions. Ces scénarios ne sont pas des pronostics, mais fournissent des réponses de type «Si... alors...».

Le PSI continue à développer ce modèle de scénario avec le Conseil mondial de l'énergie (CME) en mode «open source». Il sera mis à disposition des quelque 3000 membres du CME. Afin de garantir une transparence complète.



**Illustration 6:** part de la population n'ayant pas accès à l'électricité dans les différentes régions, en 2010 et en 2050, dans les deux scénarios. La taille des cercles et proportionnelle à celle de la population.



**Illustration 7:** structure schématique du modèle «MARKAL» utilisé pour le calcul des scénarios énergétiques.