



CONSEIL FRANÇAIS DE L'ÉNERGIE
WORLD ENERGY COUNCIL

Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050

Mise en musique des futurs de l'énergie

Partenaire du projet Paul Scherrer Institute (PSI), Suisse

CONSEIL MONDIAL DE L'ÉNERGIE
WORLD ENERGY COUNCIL



Administrateurs du Conseil Mondial de l'Énergie

Pierre Gadonneix

Président

Marie-Jose Nadeau

Présidente élue

Younghoon David Kim

Co-président élu

Leonhard Birnbaum

Vice-président

Europe

Hwan-eik Cho

Vice-président

Congrès 2013, Daegu

Arup Roy Choudhury

Vice-président

Asie Pacifique / Asie du Sud

José da Costa Carvalho Neto

Président

Comité des Programmes

Jean-Marie Dauger

Président

Comité de la Communication

Kevin Meyers

Vice-président

Amérique du Nord

Abubakar Sambo

Vice-président

Afrique

Brian A. Statham

Président

Comité des Études

José Antonio Vargas Lleras

Vice-président

Amérique latine / Caraïbes

Graham Ward, CBE

Vice-président

Finance

Wu Xinxiong

Vice-président

Asie

Taha M. Zatari

Vice-président

Chargé du Moyen-Orient et des
pays du Golfe

Christoph Frei

Secrétaire Général

Les Scénarios Mondiaux de l'Énergie à
l'horizon 2050 - Mise en musique des futurs
de l'énergie
Copyright © 2013 Conseil Mondial de l'Énergie
et Conseil Français de l'Énergie

Tous droits réservés. Tout ou partie de cette
publication peut être utilisée ou reproduite
à condition que la mention suivante soit
intégrée dans chaque copie ou diffusion :
« Avec l'autorisation du Conseil Français de
l'Énergie, Paris, www.wec-france.org »

Directeur de publication :

Jean Eudes Moncomble, Secrétaire général

Publié en 2013 par :

Conseil Français de l'Énergie
12 rue de Saint-Quentin
75010 Paris - France

Enregistré en Angleterre et
au pays de Galles
No. 4184478
VAT Reg. No. GB 123 3802 48
Registered Office
Regency House
1-4 Warwick Street,
London W1B 5LT
ISBN: 978 0 946121 32 8

Scénarios Mondiaux de l'Énergie à l'horizon 2050

L'approche du Conseil Mondial de l'Énergie pour mettre en musique les futurs de l'énergie

L'approche du CME

Les scénarios représentent des visions alternatives de l'avenir qui permettent d'explorer les implications de différentes hypothèses et de déterminer la robustesse d'évolutions potentielles. Si les scénarios les plus fréquents sont normatifs, le Conseil Mondial de l'Énergie a adopté une approche différente : une approche exploratoire. Dans ce contexte, « normatif » signifie que les scénarios sont utilisés pour guider le monde vers un objectif précis, par exemple une concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Avec les scénarios exploratoires Jazz et Symphonie, au contraire, le CME propose aux décideurs un outil neutre, basé sur des faits, qui leur permet de mesurer les impacts potentiels de leurs choix sur l'avenir.

Plutôt que de dire aux décideurs politiques et aux dirigeants de l'industrie de l'énergie ce qu'ils doivent faire pour atteindre un objectif précis, les scénarios du Conseil Mondial de l'Énergie leur permettent de tester les hypothèses-clés sur qu'il faut poser pour construire l'énergie de demain. Les investisseurs peuvent utiliser cet outil pour évaluer quels seront demain les domaines les plus dynamiques et ceux qui changeront vraiment la donne.

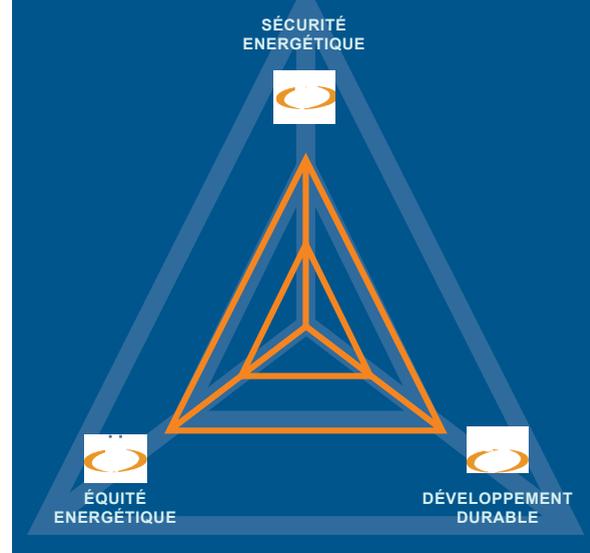
Ces scénarios pourraient donc modifier la manière de faire des choix des décideurs en leur permettant de comprendre l'impact réel à long terme de leurs actions.

Cette approche ne peut être mise en œuvre avec succès que grâce à un réseau comme le Conseil Mondial de l'Énergie, impartial et diversifié. Plus de 60 experts venant de plus de 28 pays ont contribué à la construction des scénarios du CME sur une période de plus de trois ans.

Évaluer le trilemme énergétique

Ces scénarios sont conçus pour aider différents partenaires à faire face au « trilemme énergétique » : équilibrer **respect de l'environnement, sécurité énergétique et équité énergétique**, en présentant différentes options politiques.

Chaque option politique a ses coûts propres. Le coût d'un scénario par rapport à un autre ne doit pas être évalué uniquement en termes d'investissements financiers nécessaires ou d'impact sur la croissance du produit intérieur brut (PIB) ; les avantages environnementaux globaux et les coûts d'adaptation au changement climatique économisés doivent aussi être pris en compte. Cela signifie qu'un scénario n'est pas intrinsèquement meilleur que l'autre. Il convient d'adopter une perspective plus large pour évaluer les implications globales de chacun des scénarios.



Les 10 messages-clés des scénarios énergétiques mondiaux

1	La complexité du système énergétique va s'accroître d'ici 2050.
2	L'efficacité énergétique est cruciale pour résorber l'avance de la demande sur l'offre.
3	Le bouquet énergétique de 2050 restera majoritairement fossile.
4	Les priorités régionales diffèrent : il n'y a pas de solution « taille unique » au trilemme énergétique.
5	Ce sera un vrai défi pour l'économie mondiale d'atteindre l'objectif de 450 ppm sans prix du carbone inacceptable.
6	Un futur « bas carbone » ne dépend pas que des énergies renouvelables : le captage, l'utilisation et le stockage du carbone et le comportement des consommateurs doivent contribuer au changement.
7	Le captage et stockage du carbone, l'énergie solaire et le stockage de l'énergie sont les incertitudes majeures d'ici 2050.
8	Répondre au trilemme énergétique implique des choix difficiles.
9	Les marchés énergétiques exigent des investissements et une intégration régionale pour bénéficier à tous les consommateurs.
10	La politique énergétique doit garantir le fonctionnement des marchés de l'énergie et du carbone.

Mettre en musique les futurs de l'énergie jusqu'en 2050

Le CME a construit deux scénarios caractérisés par des aspects qui, chacun à leur manière, décriront beaucoup de régions du monde en 2050. Dans le cadre de cet exercice, les éléments des deux scénarios sont généralisés, comme s'ils pouvaient s'appliquer au monde entier (un monde

imaginaire) : le scénario Jazz se concentre sur les consommateurs et le scénario Symphonie sur les électeurs. Si ces deux scénarios sont d'inspiration musicale, ils sont de nature complètement différente.

JAZZ

Le scénario Jazz est focalisé sur l'équité énergétique et donne la priorité, en s'appuyant sur la croissance économique, à l'accès individuel à l'énergie à un prix abordable.



*Le **Jazz** est un style musical caractérisé par sa structure rythmique forte mais flexible, avec des solos et des improvisations basées sur des thèmes et des accords simples. Les musiciens de jazz sont libres de prendre l'initiative et d'improviser ; souvent d'autres membres du groupe les suivent.*

SYMPHONIE

Le scénario Symphonie est focalisé sur les enjeux environnementaux grâce à de bonnes pratiques et des politiques internationales coordonnées.



*Une **Symphonie** est un morceau de musique complexe dont la structure est fixe et qui est écrite pour un orchestre symphonique. L'orchestre est composé d'un chef et d'environ 80 musiciens qui ont chacun un rôle précis et une partition à suivre.*

Aperçu des scénarios du CME

L'histoire de Jazz et Symphonie

JAZZ

Un monde tourné vers le consommateur, focalisé sur l'accès à l'énergie, le prix et la qualité de l'offre en utilisant les meilleures sources d'énergie disponibles



Des stratégies de libre échange conduisent à une augmentation des exportations



Des stratégies nationalistes aboutissent à une baisse des échanges extérieurs

Les énergies renouvelables et bas carbone se développent en fonction du marché



Les sources d'énergie sont en concurrence en fonction de leur prix et de leur disponibilité



Certaines énergies renouvelables ou bas carbone sont vigoureusement soutenues par les gouvernements



Certaines sources d'énergie sont subventionnées et encouragées par les gouvernements



SYMPHONIE

Un monde où il existe un consensus politique sur l'environnement et la sécurité par des politiques et des pratiques adaptées



JAZZ

En l'absence d'un consensus international, les marchés du carbone ont une croissance plus lente, à partir d'initiatives régionales, nationales et locales



Croissance du PIB plus élevée



A cause de la plus grande convergence entre les pays, plus de compétition et moins de contraintes environnementales



Les principaux acteurs sont les multinationales, les entreprises multinationales, les banques, les sociétés de capital-risque et les consommateurs attentifs aux prix



Les technologies sont choisies sur des marchés compétitifs

SYMPHONIE

Le marché du carbone est « top-down », fondé sur un accord international qui définit des engagements et des allocations

Croissance du PIB moins élevée



A cause de la plus faible convergence entre les pays, plus de contraintes environnementales et une croissance plus intensive en capital



Les principaux acteurs sont les gouvernements, le secteur public et les entreprises privées, les ONG et les électeurs sensibles à l'environnement



Les gouvernements choisissent les technologies retenues

Les conclusions des scénarios du CME

Mettre en musique les futurs de l'énergie

Le paysage énergétique en 2050

Le paysage énergétique que nous prévoyons pour 2050 sera très différent de celui d'aujourd'hui. Répondre à la demande à venir sera un défi majeur. La population mondiale va passer d'environ 7 milliards en 2014 à environ 8,7 milliards dans le scénario Jazz et 9,4 milliards dans le scénario Symphonie en 2050, ce qui correspond à des augmentations respectives de 26 % et 36 %. Le PIB par habitant

va lui aussi augmenter, passant d'un peu plus de 9 000 US\$2010 en moyenne en 2010 à environ 23 000 US\$2010 dans le scénario Jazz et environ 18 000 US\$2010 dans le scénario Symphonie en 2050. Cela représente des augmentations respectives de 153 % et 100 %. La mobilité va également augmenter, le nombre de voitures passant de 124 pour 1 000 habitants en 2010 à 244 dans Jazz et à 193 dans Symphonie en 2050. Ces chiffres correspondent à des augmentations de 98 % et 57 %, respectivement.

La vision du CME sur la croissance économique globale d'ici 2050

Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)

Croissance du PIB, taux de croissance annuel moyen (TCAM) en pourcentage, au taux de change du marché (%PPA)						
	1990–2000	2000–2010	2010–2020	2020–2030	2030–2040	2040–2050
JAZZ	2.9 (3.2)	2.8 (3.5)	3.2	3.1	2.9	2.6
SYMPHONIE			2.8	2.6	2.5	2.2

« Nous vivons une époque d'incertitude sans précédent pour le secteur énergétique. La demande en énergie va continuer de croître. La pression pour développer et transformer le système énergétique est immense. »

Ce que Jazz et Symphonie peuvent offrir

Les scénarios Jazz et Symphonie offrent de nombreux messages-clés. Par exemple, une coopération internationale accrue, notamment par des politiques coordonnées internationalement et par une confiance accrue dans les mécanismes du marché, est essentielle pour atteindre les objectifs environnementaux, de sécurité et d'équité énergétiques. Jazz et

Symphonie peuvent contribuer à faire progresser le débat sur la meilleure méthode pour atteindre ces objectifs, en tenant compte de nombreuses options politiques. Les scénarios énergétiques mondiaux pour 2050 du CME aideront à renforcer le débat sur la mise en oeuvre la plus efficace de la collaboration entre toutes les parties prenantes concernées du secteur de l'énergie.

« Aucun scénario n'utilise de « baguette magique » pour modifier radicalement l'avenir. Les deux scénarios sont exploratoires et montrent la diversité des réponses possibles au trilemme énergétique. »

Des histoires aux chiffres

Les hypothèses quantitatives des scénarios du Conseil Mondial de l'Énergie

Les scénarios du CME ont été quantifiés selon les chiffres suivants qui ont joué comme des contraintes dans les deux modèles.

JAZZ
2050

SYMPHONIE
2050

JAZZ
2050

SYMPHONIE
2050

Hausse du PIB
(TCAM, PPA)

3,5%



3,1%



Politique
climatique



Limitée
(et plus diversifiée)

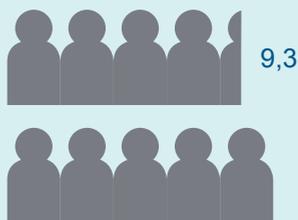
Plus forte
(avec une convergence globale)

Population (en milliards)

8,7



9,3



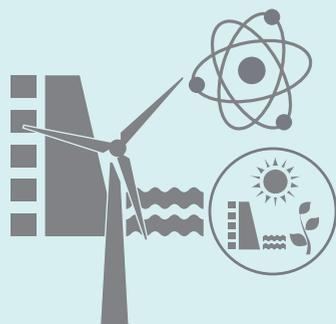
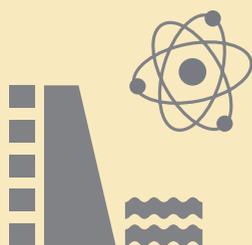
Ressources



Meilleur accès aux
ressources non
conventionnelles
(particulièrement le gaz)

Ressources non
conventionnelles plus coûteuses
(moins de compétition, de
régulation, d'eau)

Soutien technologique



Limité ; choix énergétique
basé sur le libre marché
– nucléaire limité, CUSC,
grandes centrales
hydroélectriques

Soutien du gouvernement
pour le nucléaire, les
grandes centrales
hydroélectriques, CUSC et
les énergies renouvelables

Innovation technologique



Poursuite du développement des
centrales à cycle combiné,
des énergies décentralisées
(photovoltaïque), de l'éolien,
des véhicules à essence et
électriques



Des programmes ciblés
de R&D, particulièrement
des démonstrations CUSC,
nucléaire, modules solaires
photovoltaïque (SPV)

Efficacité



Augmente



Augmente plus
fortement

La complexité du système énergétique va s'accroître d'ici 2050.

L'offre totale d'énergie primaire

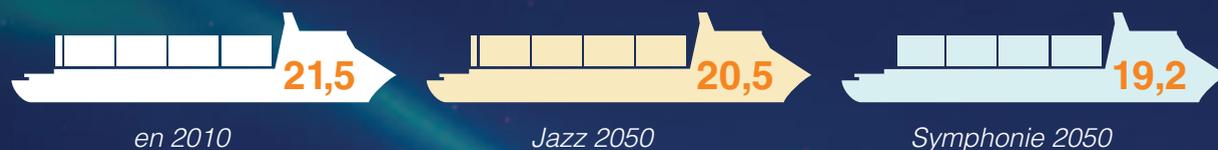
Le CME estime que l'offre totale d'énergie primaire (égale à la consommation) va passer de 546 ExaJoules (152 000 TWh) en 2010 à 879 ExaJoules (244 000 TWh) dans le scénario Jazz et à 696 ExaJoules (193 000 TWh) dans le scénario Symphonie en 2050. Cela correspond à une augmentation de 61 % dans Jazz et 27 % dans Symphonie. A titre de comparaison, de 1990 à 2010 (période qui représente plus de la moitié du temps couvert par l'étude des scénarios), la consommation mondiale d'énergie primaire a augmenté d'environ 45 % ; on prévoit que la hausse va se poursuivre mais à un rythme plus faible que pendant les décennies passées. Répondre à la demande au niveau mondial et régional sera un vrai défi. Il n'y a pas de solution globale à la question de l'offre énergétique : c'est en traitant individuellement chaque élément du défi que l'on atteindra l'objectif global d'une offre énergétique respectueuse de l'environnement, abordable et sûre pour tous.

+61% **+27%**
dans le scénario dans le scénario
Jazz en 2050 **Symphonie en 2050**

Croissance estimée globale de l'offre d'énergie primaire mondiale (égale à la consommation)



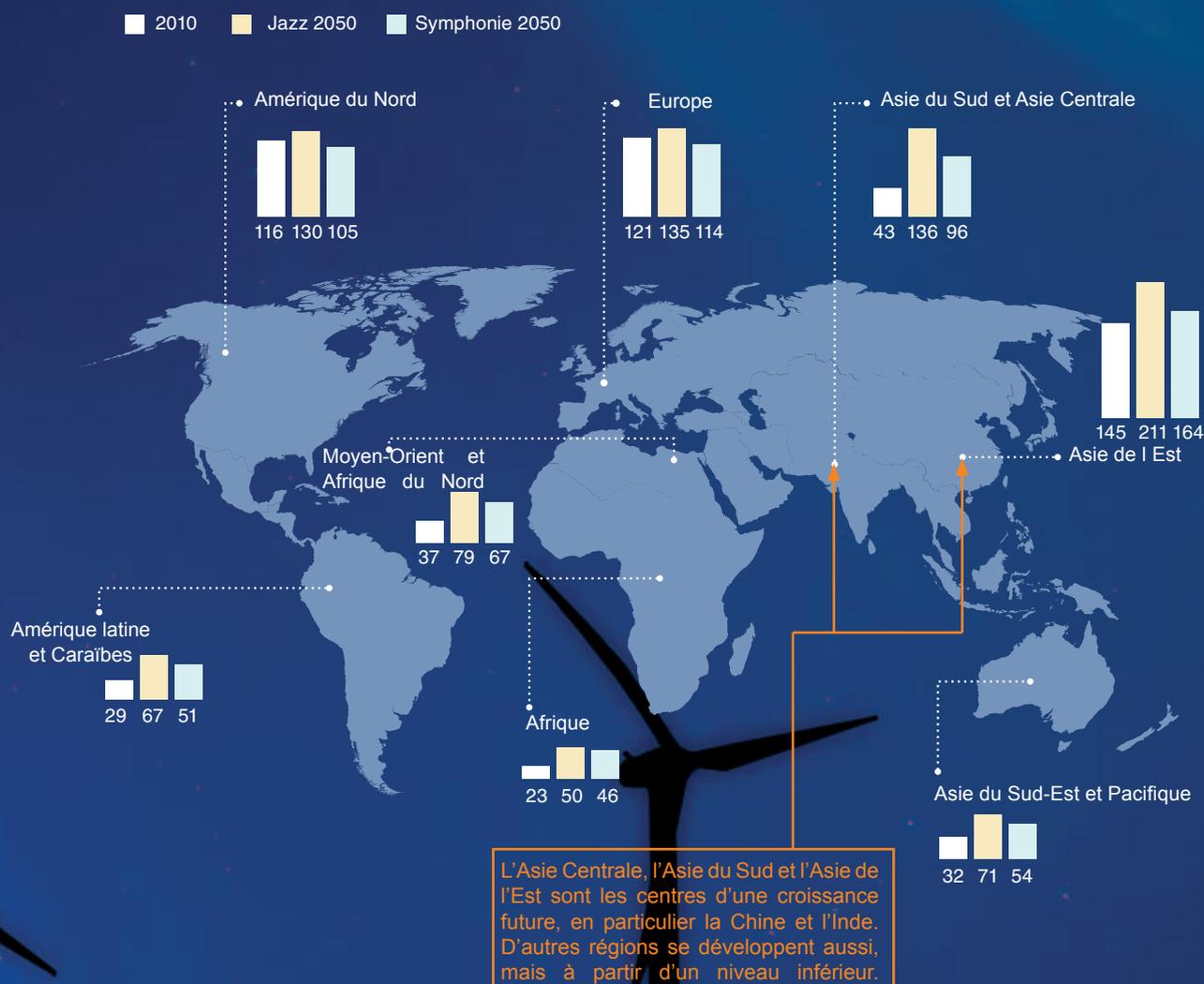
Part des importations nettes de l'approvisionnement en énergie primaire (%) (pour les régions du monde agrégées)



Source : Conseil Mondial de l'Énergie

Note : La part des importations nettes de l'approvisionnement en énergie primaire est définie comme la somme des importations nettes de ces régions du monde agrégées, qui sont des importateurs nets, divisée par l'offre mondiale d'énergie primaire totale.

Approvisionnement total en énergie primaire par région (unité : EJ/an)



L'efficacité énergétique est cruciale pour résorber l'avance de la demande sur l'offre.

L'efficacité énergétique

L'**efficacité énergétique** va augmenter significativement dans les deux scénarios : l'intensité énergétique primaire, mesurée par la consommation d'énergie par unité de PIB, va décroître de 50 % et de 53 % respectivement dans Jazz et Symphonie d'ici 2050. Quand on s'intéresse à la consommation d'énergie primaire par unité de PIB, pour la même création de valeur, seule la moitié de l'énergie sera nécessaire en 2050. C'est le cas dans les deux scénarios, même si la consommation d'énergie primaire est plus élevée en 2050 dans Jazz que dans Symphonie. Les scénarios énergétiques mondiaux du CME montrent que l'efficacité énergétique et la conservation de l'énergie sont absolument cruciales pour répondre à une demande qui devance l'offre : les deux scénarios nécessitent une modification des priorités du consommateur et ont des implications en termes de coût dans toute l'industrie. Des capitaux seront donc indispensables pour financer les investissements initiaux nécessaires aux mesures d'efficacité énergétique avant qu'elles ne deviennent rentables.

L'intensité énergétique va baisser de

-50%

**dans le scénario Jazz
d'ici 2050**

-53%

**dans le scénario Symphonie
d'ici 2050**



**L'intensité énergétique primaire
(MegaJoules / \$2010 aux taux de change du marché)**



en 2010



Jazz 2050



Symphonie 2050

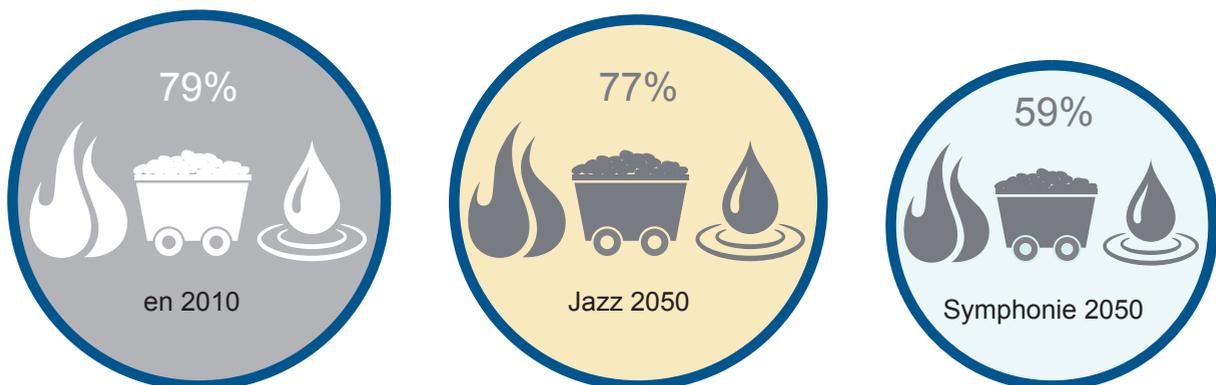
Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)

Le bouquet énergétique de 2050 restera majoritairement fossile.

Le futur bouquet énergétique primaire

Le **futur bouquet énergétique primaire** en 2050 montre que ce sont les énergies renouvelables qui connaîtront les taux de croissance les plus élevés. En termes absolus, les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) resteront dominantes jusqu'en 2050. La part des énergies fossiles en 2050 sera de 77 % dans le scénario Jazz et de 59 % dans le scénario Symphonie, comparé à 79 % en 2010. La part des énergies renouvelables va s'accroître d'environ 15 % en 2010 jusqu'à presque 20 % dans Jazz en 2050 et à près de 30 % dans Symphonie. L'énergie nucléaire représentera environ 4 % de l'offre d'énergie primaire mondiale dans Jazz en 2050 et 1 % dans Symphonie, à comparer à 6 % en 2010.

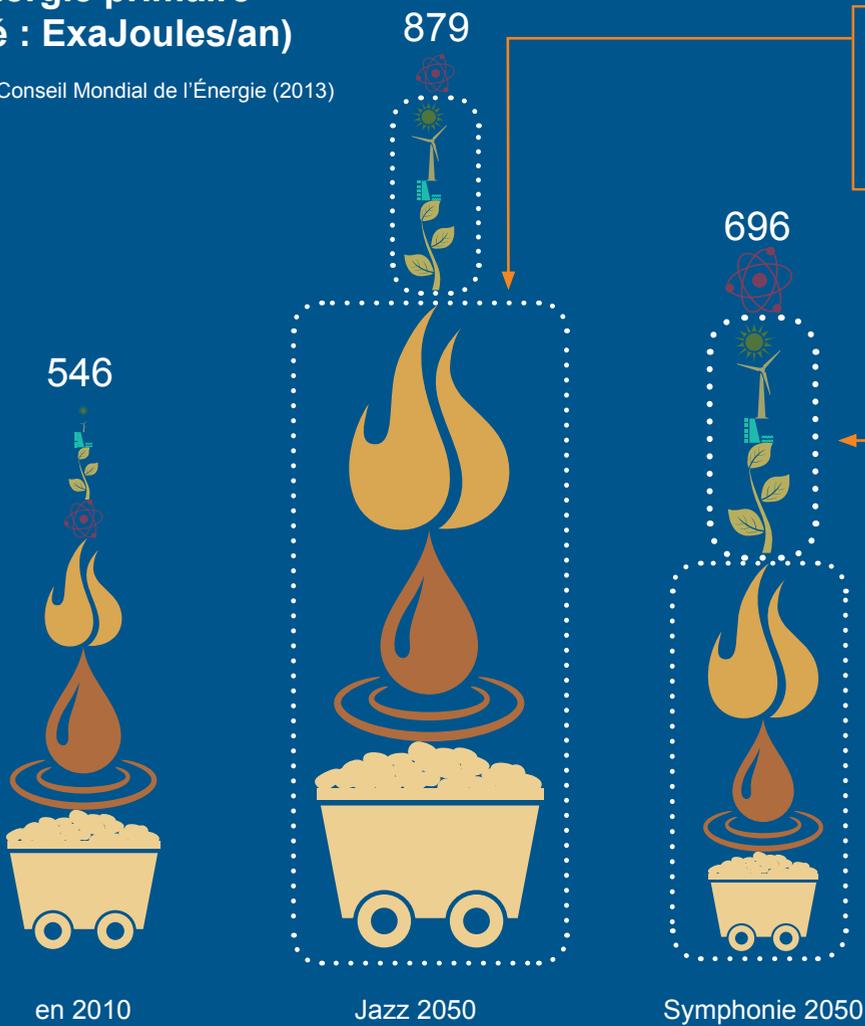
Les énergies fossiles vont rester dominantes jusqu'en 2050
(part des énergies fossiles)





Approvisionnement total en énergie primaire (unité : ExaJoules/an)

Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)



Dans le scénario Jazz, le développement futur dépendra des combustibles fossiles alors que dans le scénario Symphonie, il sera alimentée par des énergies renouvelables.

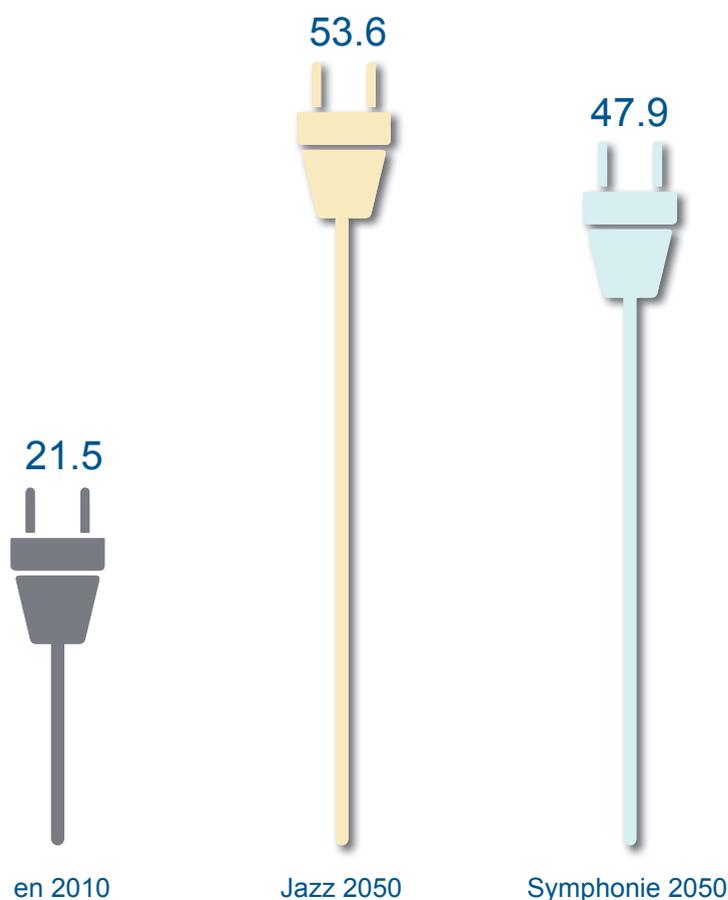
La production mondiale d'électricité va augmenter de 123 % à 150 % d'ici 2050.

La production mondiale d'électricité

La production mondiale d'électricité va augmenter d'ici 2050. En 2010, la production était de 21,5 milliards de MWh. Dans Jazz, on prévoit une augmentation de 150 % : 53,6 milliards de MWh en 2050. Dans Symphonie, l'augmentation est d'environ 123 %, à 47,9 milliards de MWh, toujours en 2050. La simple augmentation de la production d'électricité nécessaire pour répondre à la demande future conduira à des changements gigantesques dans le **bouquet de production électrique** en 2050.

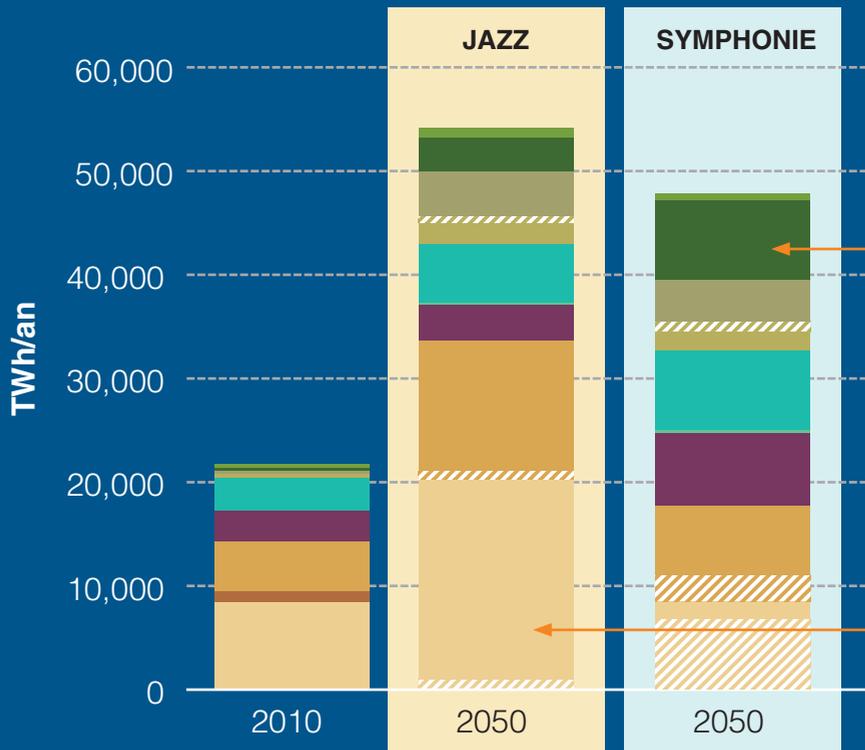
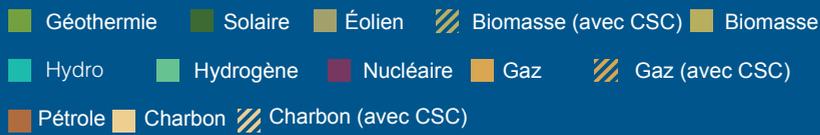
Production mondiale d'électricité (en milliards de MWh)

Source : Conseil Mondial de l'Énergie





PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ PAR TYPE D'ÉNERGIE



Les technologies qui auront le plus d'impact sont le solaire et le CSC.

Les technologies qui auront le plus d'impact sont les centrales à cycle combiné à haut rendement et les centrales électriques au charbon.

Entre 19 000 et 26 000 milliards de dollars seront nécessaires en investissement pour la production électrique mondiale d'ici 2050.

Les besoins en investissements pour la production électrique future

De gigantesques investissements en production d'électricité seront nécessaires pour faire face à la demande. Le CME estime que le montant total des investissements nécessaires sera compris entre 19 000 milliards de dollars dans Jazz et 26 000 milliards de dollars dans Symphonie (dollars de 2010) ; ces chiffres représentent le montant des investissements cumulés non actualisés de 2010 à 2050. Selon le scénario, une part de 46 % dans Jazz ou de 70 % dans Symphonie sera investie dans la production d'électricité renouvelable. Les investissements les plus importants sont destinés au solaire photovoltaïque, à l'hydroélectricité et à l'énergie éolienne. Le travail du CME montre clairement que la disponibilité des capitaux pour ces investissements est l'un des points cruciaux qui modèlera le paysage énergétique de 2050.

Part des investissements dans la production d'électricité renouvelable



Les besoins en investissements dans la production d'électricité (2010-2050, milliards de \$ 2010, non actualisés)

● JAZZ 2050

● SYMPHONIE 2050

Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)



Le niveau global d'accès à l'énergie va augmenter. L'Afrique fait face à des défis majeurs pour accroître l'accès à l'électricité.

L'accès à l'énergie

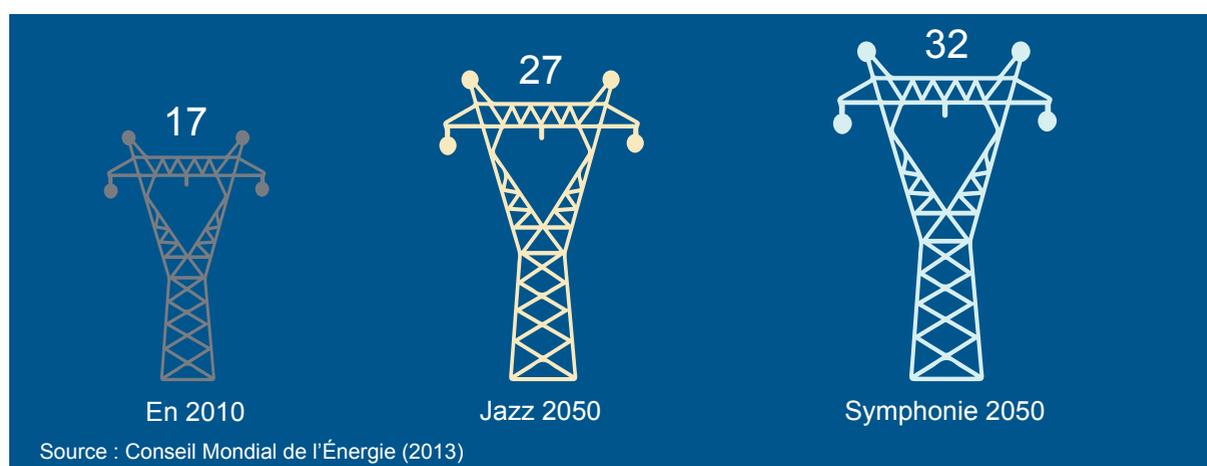
Le **taux d'électrification** mesurée par la part de l'électricité dans le bouquet d'énergies finales accroît considérablement d'ici 2050. Dans Jazz, ce taux sera de presque 30 % en 2050, dans Symphonie, il sera légèrement supérieur à 30 % alors qu'il était de 17 % en 2010.

En 2050, la consommation d'électricité par tête augmente de 111 % dans Jazz et de 78 % dans Symphonie.

L'accès à l'électricité, mesuré par la part de la population connectée au réseau électrique, augmentera dans les deux scénarios : l'accès à l'énergie en sera amélioré. Si, en 2010, 1,267 milliard de personnes étaient sans accès à l'électricité, en 2050, ce chiffre tombe à 319 millions dans Jazz et à 530 millions dans Symphonie.

Électrification

(part de l'électricité dans la consommation énergétique finale) (%)



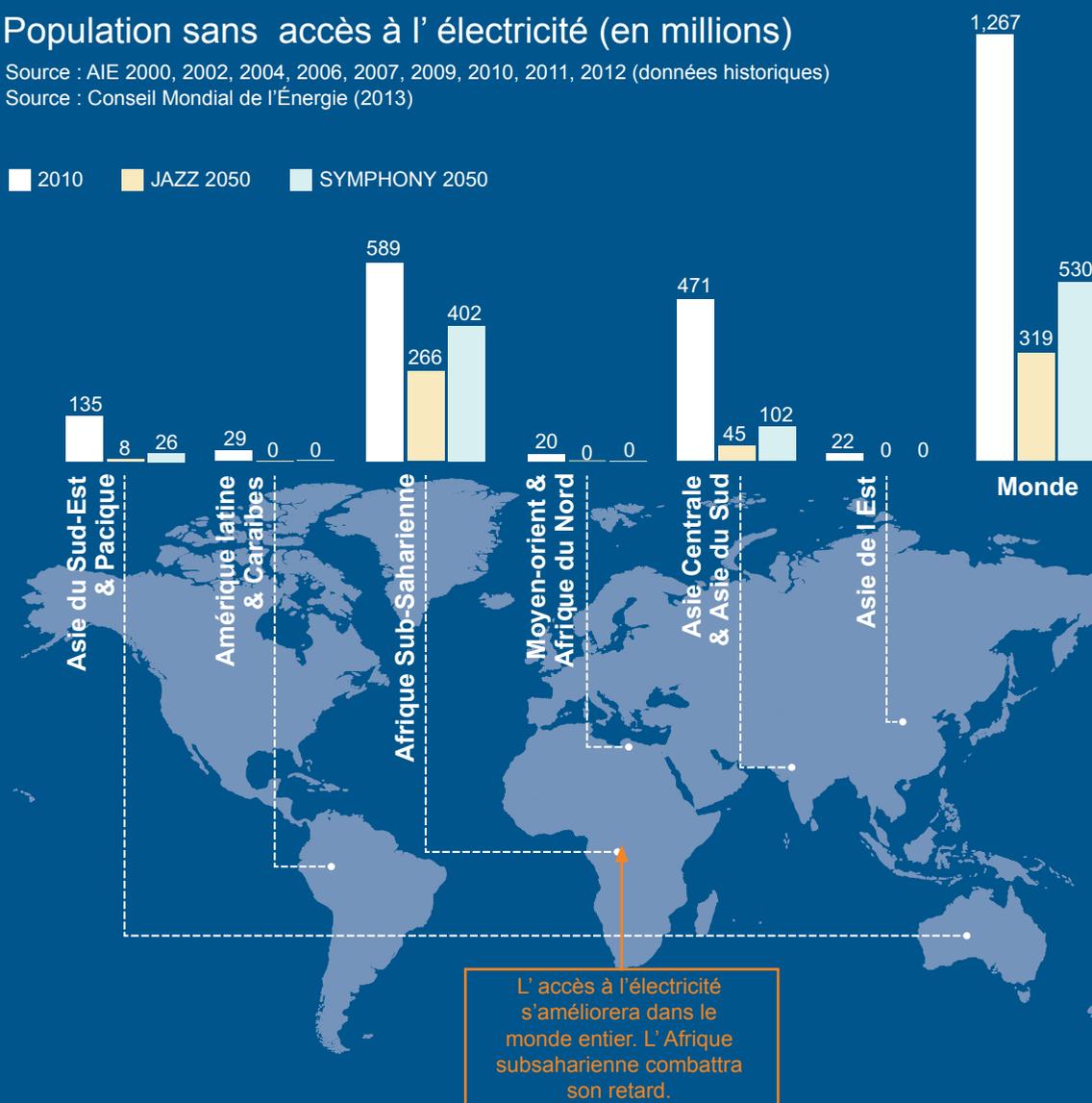
¹ L'estimation de 1,267 milliard de personnes sans accès à l'électricité en 2010 diffère de celle de la Banque Mondiale qui est de 1,2 milliard de personnes : cela provient « d'écarts sur un nombre relativement limité de pays (Pakistan, Indonésie, Afrique du Sud, Thaïlande et Gabon) pour lesquels l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) utilise des données gouvernementales qui décomptent généralement plus de personnes sans accès alors que la Banque Mondiale s'appuie sur des estimations provenant de différentes enquêtes » (Banque Mondiale, 2013).



Population sans accès à l'électricité (en millions)

Source : AIE 2000, 2002, 2004, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2012 (données historiques)
 Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)

■ 2010 ■ JAZZ 2050 ■ SYMPHONY 2050



Les priorités régionales diffèrent : il n'y a pas de solution « taille unique » au trilemme énergétique.

Les évolutions régionales

La croissance économique va se déplacer des pays développés vers les pays en développement et en transition, particulièrement en Asie. Des huit régions considérées dans l'étude sur les scénarios, l'Asie est celle qui connaîtra la croissance économique la plus élevée. D'ici 2050, près de la moitié de la croissance économique (mesurée par le PIB) aura lieu en Asie et dans ses trois sous-régions - l'Asie centrale et du Sud, l'Asie de l'Est, l'Asie du Sud-Est et Pacifique - à la fois pour Jazz et pour Symphonie. Cela signifie que la part de l'Asie dans la consommation mondiale d'énergie primaire va s'accroître de 40 % en 2010 à 48 % (Jazz) et 45 % (Symphonie). À titre de comparaison, d'ici 2050, l'Europe et l'Amérique du Nord (Mexique inclus) représenteront environ 30 % de la consommation totale d'énergie primaire dans Jazz et 31 % dans Symphonie ; en 2010, cette part était de 44 %.

L'Afrique, Moyen-Orient compris, comptera pour 15 % dans Jazz et 16 % dans Symphonie, à comparer à 11 % en 2010.

L'Amérique latine et les Caraïbes représenteront 8 % dans Jazz et 7 % dans Symphonie ; elles représentaient 5 % en 2010.

PIB par tête (\$2010 aux taux de change du marché)

Source : Conseil Mondial de l'Énergie

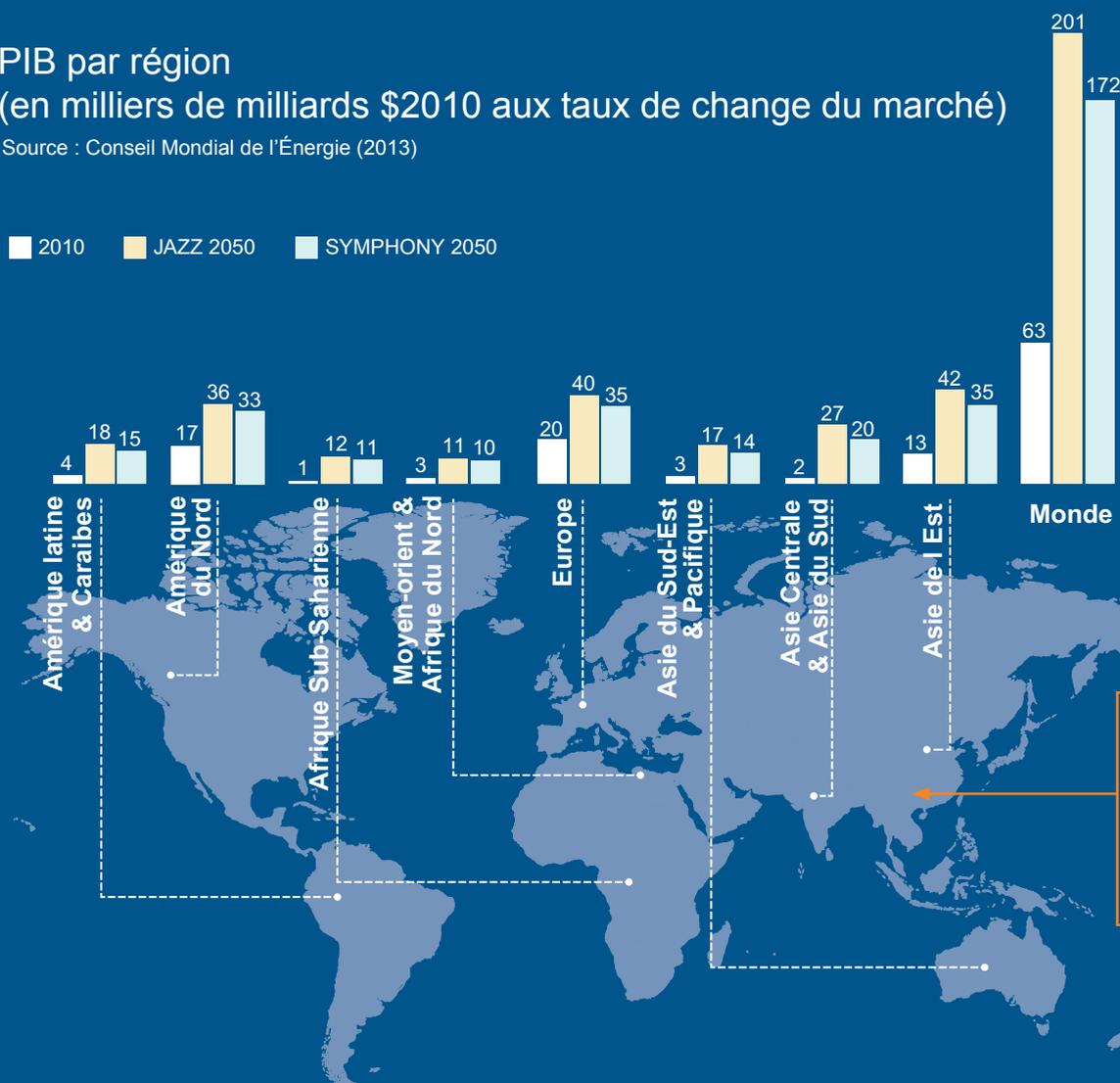




PIB par région (en milliers de milliards \$2010 aux taux de change du marché)

Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)

■ 2010 ■ JAZZ 2050 ■ SYMPHONY 2050



La croissance est importante dans toutes les régions, mais le développement économique de l'Asie sera démultiplié.

Ce sera un vrai défi pour l'économie mondiale d'atteindre l'objectif de 450 ppm sans prix du carbone inacceptable.

Les conséquences pour le climat

Le CME a analysé les conséquences des scénarios Jazz et Symphonie sur le changement climatique. Il a aussi évalué les conséquences potentielles de ces scénarios sur le climat en utilisant le travail du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

Scénario Jazz

Dans Jazz, on fait l'hypothèse que les négociations sur le changement climatique et les objectifs des missions ne seront pas menés à terme. Sans engagements internationaux, les régions, les pays les états ou les collectivités locales prennent leurs propres initiatives de développement durable. Le marché international du carbone croît lentement, fondé sur des initiatives régionales, nationales ou locales, qui tentent d'améliorer l'efficacité et la liquidité du marché. Les technologies bas carbone innovantes et viables commercialement (solaire, éolien, valorisation des déchets,...)

se développent, les plus grandes réductions d'émissions de CO₂ viennent de la substitution du gaz naturel au pétrole et au charbon pour des raisons strictement économiques.

Scénario Symphonie

Dans Symphonie, les pays vont au-delà de Doha et parviennent à négocier un traité global : tous les pays sont en effet prêts à accepter des engagements et à faire des concessions. Le changement climatique est en haut de l'agenda, dans le cadre d'initiatives internationales sur le changement climatique. Les technologies bas carbone sont encouragées malgré l'absence de viabilité commerciale au début de leur développement.

Le marché du carbone est construit sur la base d'un accord international avec des engagements et des allocations. Dans la première période du

L'engagement du CME pour le changement climatique

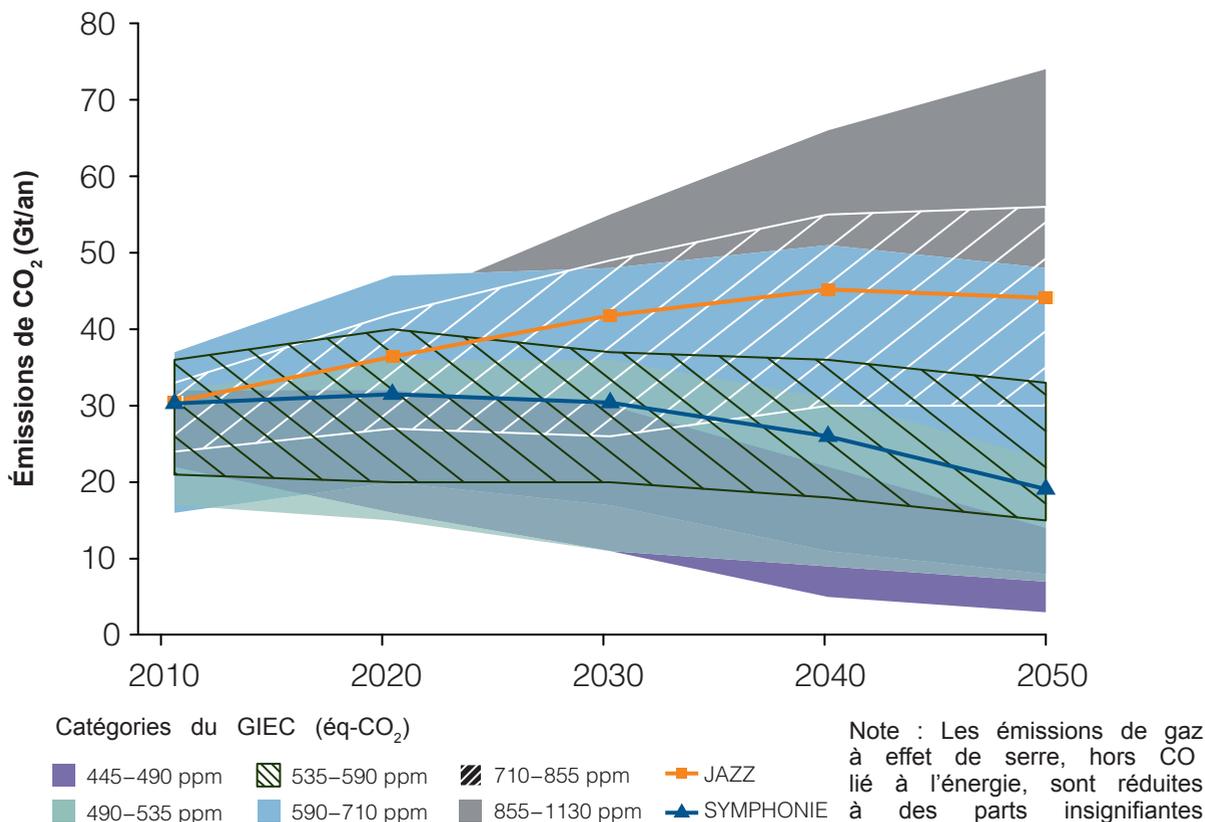
Lors de la 15^{ème} conférence des parties (COP 15) de la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique, l'accord de Copenhague a été ratifié par les délégués, qui ont prolongé le protocole de Kyoto. Des objectifs précis de réduction des émissions pour 2020 ont été proposés par les pays. Lors des réunions suivantes de la COP, ces points ont été réaffirmés, en particulier lors de la COP 18 à Doha où a été développé un ensemble d'accords - Doha Climate Gateway - qui définit un programme de travail qui pourra permettre aux pays riches et en développement de parvenir à un nouvel accord international sur le climat. Cet ensemble d'accords comprend un calendrier visant un accord global sur le changement climatique pour 2015 et de nouvelles ambitions d'ici à 2020. A Doha, les pays se sont mis

d'accord sur un processus de négociation de la plateforme de Durban, un nouvel accord sur le climat pour tous les pays qui doit être approuvé d'ici 2015 et prendra effet en 2020 – c'est le Groupe de travail sur la Plateforme de Durban pour une action renforcée (GTPD).

Pour établir un lien clair entre consommation d'énergie et objectifs de changement climatique, le CME a fait de la Doha Climate Gateway une des différences majeures entre ses deux scénarios. La CME fait l'hypothèse que dans le scénario Symphonie, les pays adoptent l'accord de Doha et négocient un traité global. Dans le scénario Jazz, ces négociations échouent et les régions, pays, États et collectivités locales prennent leurs propres chemins de développement durable.

Trajectoires d'émissions pour les concentrations de gaz à effet de serre (GES)

Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013) basé sur le 4ème rapport d'évaluation du GIEC (2007)



JAZZ	SYMPHONIE
Les émissions de CO ₂ du scénario Jazz suivent une trajectoire correspondant à une concentration atmosphérique à long terme de tous les GES allant de 590 à 710 parts par million d'équivalent CO ₂	Symphonie vise 490 à 535 ppm d'équivalent CO ₂

scénario, des initiatives nationales pour satisfaire les obligations du traité de réduire les émissions sont lancées, dans les pays développés et dans les pays en développement. Ces initiatives nationales sont souvent liées et forment des marchés régionaux avec des mécanismes de développement propre et d'autres émissions. Dans la période finale du scénario, on assiste à une action mondiale contre le changement climatique avec un marché d'échange d'émissions comme principal mécanisme pour atteindre les objectifs d'émissions de CO₂.

Les scénarios du CME et leurs conséquences sur le climat

Le diagramme ci-dessus présente les conséquences potentielles des émissions associées à Jazz et à Symphonie sur les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre (et donc sur le climat), à partir du 4^{ème} rapport

d'évaluation du GIEC.

Même si Jazz insiste davantage sur l'adaptation et Symphonie sur l'atténuation, les deux scénarios anticipent des actions complémentaires à long terme, au-delà de 2050, pour réduire davantage les conséquences sur le climat. Les conséquences de ces changements de concentration atmosphérique de gaz à effet de serre sur les températures de surface, sur le niveau des océans, sur les précipitations ou encore les phénomènes météorologiques extrêmes demeurent incertaines.

La pression en faveur d'une action pour le climat changera au cours de la période. Le CME reconnaît, par exemple, que le forçage climatique du CO₂ est désormais considéré comme plus faible dans certains articles scientifiques de 2013. Parallèlement, il y a aussi une plus grande sensibilité aux événements climatiques graves qui pourraient être liés au forçage climatique.

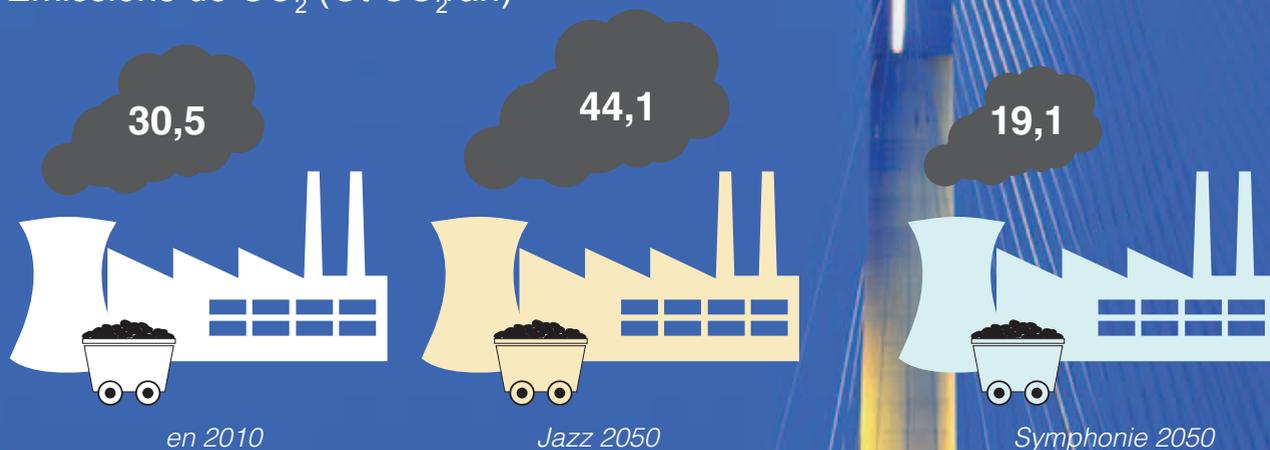
Un futur « bas carbone » ne dépend pas que des renouvelables : le captage, l'utilisation et le stockage du carbone et le comportement des consommateurs doivent contribuer au changement.

Les émissions de CO₂ et le changement climatique

Les émissions de CO₂ vont augmenter dans les deux scénarios au cours de la première période du scénario. Dans Symphonie, où par hypothèse une plus grande importance est donnée au changement climatique (atténuation et adaptation), on arrive à un tournant en 2020. Dans Jazz, le tournant n'est atteint qu'en 2040.

Les scénarios diffèrent substantiellement en ce qui concerne le total des émissions de CO₂. Dans Jazz, en 2050, les émissions seront supérieures à 44 milliards de tonnes par an, ce qui correspond à une augmentation de 45 % par rapport à 2010 ; dans Symphonie, elles s'élèvent à 19 milliards de tonnes par an, ce qui correspond à une diminution de presque 40 % par rapport à 2010. Les scénarios énergétiques du CME soulignent qu'une réduction des émissions de gaz à effet de serre est possible au cours de la seconde période des scénarios si l'on obtient des accords globaux et si l'on met en place des mesures efficaces économiquement comme un marché d'émissions avec un système de cap and trade (comme dans Symphonie).

Emissions de CO₂ (Gt CO₂/an)



Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)
(émissions de CO₂ seulement, pas les équivalents de CO₂)

La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité sera comprise entre 31 et 48 % en 2050.

Vers une production d'électricité bas carbone

La production d'électricité à partir de sources d'énergies renouvelables sera multipliée par quatre ou cinq en 2050 par rapport à 2010. Le chiffre le plus élevé correspond à Symphonie. Dans Symphonie, la production d'hydro électricité double, la biomasse est multipliée par huit et l'éolien par 11 entre 2010 et 2050. Le photovoltaïque connaît la hausse la plus spectaculaire : il est multiplié par environ 230 entre 2010 et 2050. En 2050, au niveau mondial, presque autant d'électricité est produite à partir de photovoltaïque qu'à partir de charbon (y compris charbon avec captage et stockage du carbone).

La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité passe d'environ 20 % en 2010 à plus de 30 % en 2050 dans Jazz et à près de 50 % dans Symphonie.

Le degré d'utilisation des énergies renouvelables et le niveau des investissements en captage et stockage du carbone pour le charbon et le gaz (et aussi pour la biomasse) seront décisifs pour atténuer le changement climatique.

L'énergie solaire va augmenter de 34,4 (TWh/an) à

2980

dans le scénario

Jazz d'ici 2050

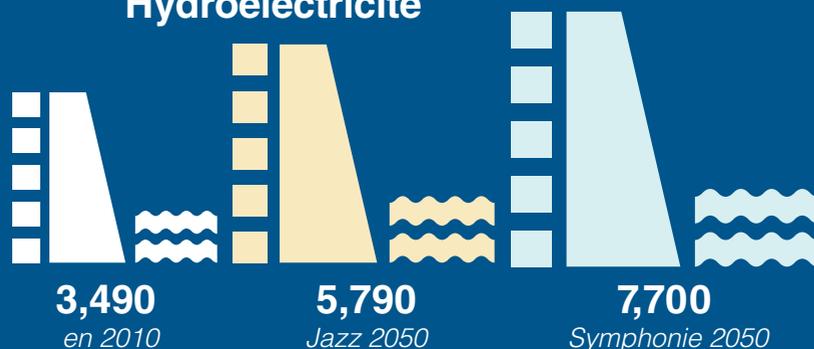
7740

dans le scénario

Symphonie d'ici 2050

Production d'électricité renouvelable (unité : TWh/an)

Hydroélectricité



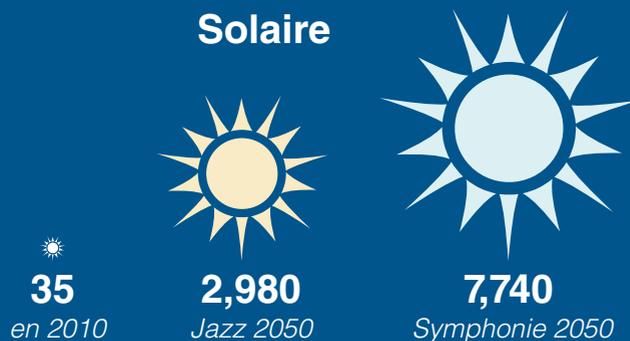
Géothermie



Eolien



Solaire



Biomasse



Biomasse (avec CSC)



Le captage et le stockage du carbone, l'énergie solaire et le stockage de l'énergie sont les incertitudes majeures d'ici 2050.

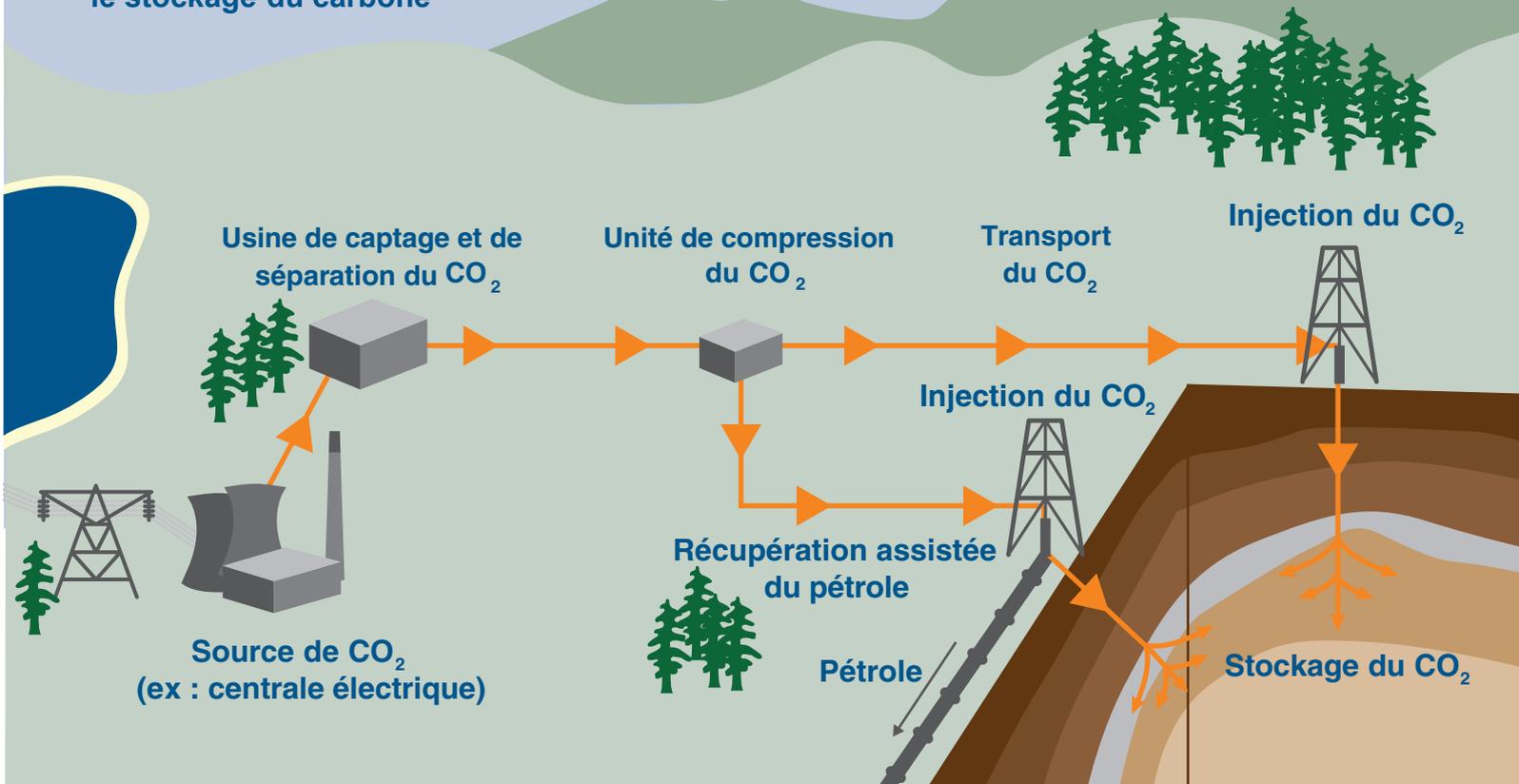
Le captage, l'utilisation et le stockage du carbone

Les technologies de captage, d'utilisation et de stockage du carbone (CUSC) sont largement utilisées dans Symphonie et connaissent donc des taux de croissance supérieurs par rapport à ceux de Jazz. La moitié de l'électricité produite à partir d'énergies fossiles le sera en conjonction avec le CUSC en 2050 dans Symphonie. En associant l'énergie nucléaire et le CUSC pour le gaz, le charbon et la biomasse, plus de 80 % de l'électricité sera produite en 2050 à partir de sources bas carbone dans le scénario Symphonie, à comparer à 40 % dans le scénario Jazz. En 2010, seulement un tiers de la production d'électricité a été produite à partir de sources bas carbone.

Le CME considère que la technologie de captage, d'utilisation et de stockage du carbone, l'énergie solaire et le stockage de l'énergie sont les incertitudes majeures pour 2050. Pour le CUSC, des cadres législatifs clairs sont nécessaires, avec des investissements en infrastructures et des incitations adaptées. Un futur bas carbone ne dépend pas que des renouvelables : le captage, l'utilisation et le stockage du carbone est important et les habitudes des consommateurs doivent changer. Les changements dans les habitudes de consommation peuvent être une manière efficace de décarboner le système énergétique. Les électeurs doivent trouver un équilibre entre les problèmes locaux et les problèmes globaux.

« Pour une décarbonation efficace, les citoyens jouent un rôle déterminant : en tant que consommateur dans Jazz et en tant qu'électeur dans Symphonie. »

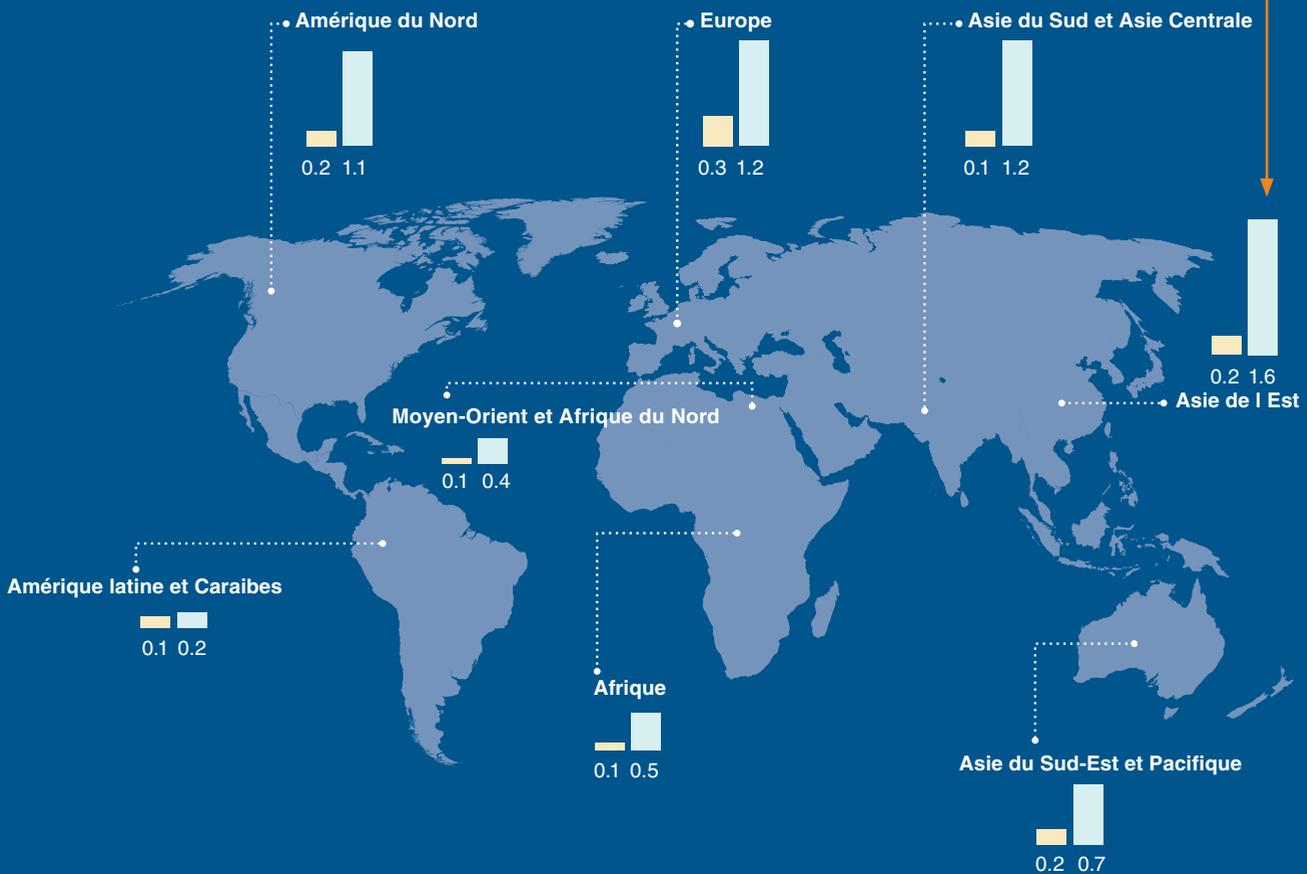
Le captage, l'utilisation et le stockage du carbone



CUSC (unité : GtCO₂/an)

Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)

■ Jazz 2050 ■ Symphonie 2050



Les CUSC vont faire un bon en Asie de l'Est, futur noyau de la croissance. Les questions environnementales deviennent un sujet de préoccupation qui poussent les gouvernements

Comparaison de Jazz et Symphonie

Le CME est convaincu que seuls des compromis et des initiatives globales peuvent permettre d'équilibrer le trilemme énergétique. Avec l'efficacité énergétique, le captage, utilisation et stockage du carbone, le solaire et l'éolien seront les technologies-clés qui feront progresser le changement.

Messages-clés

Sécurité énergétique : équilibrer le trilemme énergétique implique des choix difficiles.

Équité énergétique : le bon fonctionnement des marchés de l'énergie exige des investissements et une intégration régionale pour apporter les bénéfices à tous les consommateurs.

Environnement : la politique énergétique doit garantir le fonctionnement des marchés de l'énergie et du carbone.

JAZZ

- Production d'énergie plus élevée
- Plus d'échanges et plus de diversité des fournisseurs internationaux d'énergies fossiles.

SÉCURITÉ ENERGÉTIQUE

SYMPHONIE

- Plus grande diversité des sources d'énergie.
- Incitations gouvernementales aux investissements dans les infrastructures.

ÉQUITÉ ENERGÉTIQUE

DÉVELOPPEMENT DURABLE

JAZZ

- En moyenne, l'équité énergétique progresse davantage.
- Davantage de personnes peuvent accéder à l'énergie grâce à une croissance économique plus forte permise par la globalisation des marchés.

SYMPHONIE

- L'équité énergétique est plus faible à cause d'interventions inévitables limitant la croissance économique.
- Les fonds directement alloués aux initiatives bas carbone le sont au détriment d'autres priorités des gouvernements comme la santé.
- Les ressources financières ne sont pas illimitées
- Les gouvernements doivent prioriser leurs dépenses.
- Des choix politiques judicieux, comme ceux présentés dans le rapport du CME sur le trilemme énergétique mondial, peuvent permettre d'éviter cet obstacle et améliorer la note de ces pays dans le classement du CME.

JAZZ

- Les émissions ne diminuent pas avant 2040.
- Les performances s'améliorent nettement si un marché du carbone se développe localement au début du scénario, mais la croissance économique plus forte entraîne toujours des émissions plus élevées.
- Met davantage l'accent sur l'adaptation.

SYMPHONIE

- Bons résultats pour l'atténuation des impacts environnementaux, notamment pour la réduction des émissions de CO₂ qui diminuent à partir de 2020.
- Les externalités sont traitées plus efficacement : la raison principale est que les pays ont adopté un ensemble de mécanismes pour satisfaire leurs engagements internationaux sur le CO₂.
- Des prix du carbone plus élevés aboutiraient à une réduction des émissions plus importantes.
- Le marché des émissions est considéré comme le mécanisme le plus important pour satisfaire aux obligations en matière d'émissions de CO₂ dans la seconde partie du scénario.

Méthodologie de construction des scénarios du CME

Les scénarios énergétiques mondiaux du CME pour 2050 sont construits pour donner un aperçu de ce à quoi pourrait ressembler notre futur, en restant plausible et - espérons-le - stimulant. Ils ne constituent pas des prévisions exactes ou précises.

Il n'est pas possible de prédire l'avenir. À mesure que l'on avance, le champ des possibles s'élargit, notamment quand l'incertitude augmente. Lorsque des tendances ou des innovations accélèrent et gagnent en importance, leurs conséquences augmentent.

Les signaux que nous observons aujourd'hui peuvent être catégorisés en fondamentaux, en incertitudes critiques ou en éléments prédéterminés qui façonneront notre futur. Il est de la plus grande importance stratégique que les gouvernements et les entreprises qui souhaitent investir ou prendre des décisions dans le secteur de l'énergie se livrent

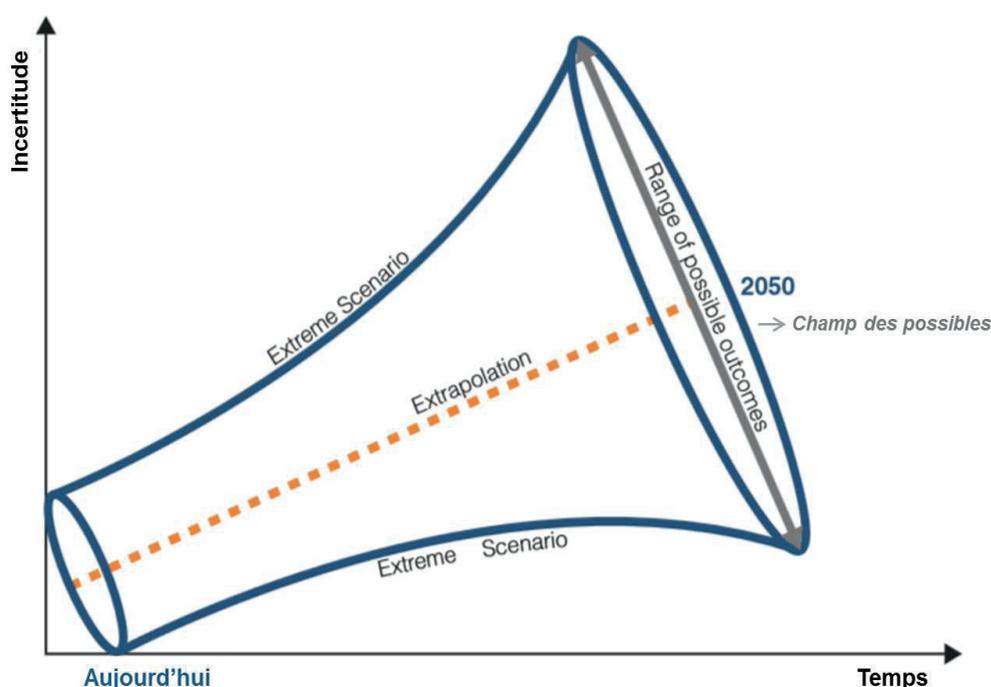
à des exercices de planification à long terme.

Pour aider les décideurs politiques et les chefs d'entreprise dans cette tâche, le Conseil Mondial de l'Énergie a lancé son nouvel exercice de construction de scénarios en 2010.

Pour obtenir un aperçu de ce que pourrait être le paysage énergétique en 2050, le CME a commencé par étudier les principaux fondamentaux du système énergétique en adoptant un point de vue le plus large possible, grâce à une approche systémique. Le CME a structuré son analyse en identifiant d'abord 116 fondamentaux qui pourraient affecter le paysage énergétique mondial d'ici 2050. Ces facteurs ont été réduits à 29 facteurs-clés qui auront un impact sur le paysage énergétique, puis regroupés en 15 groupes-clés qui ont été utilisés pour délimiter les deux futurs ensembles ou scénarios.

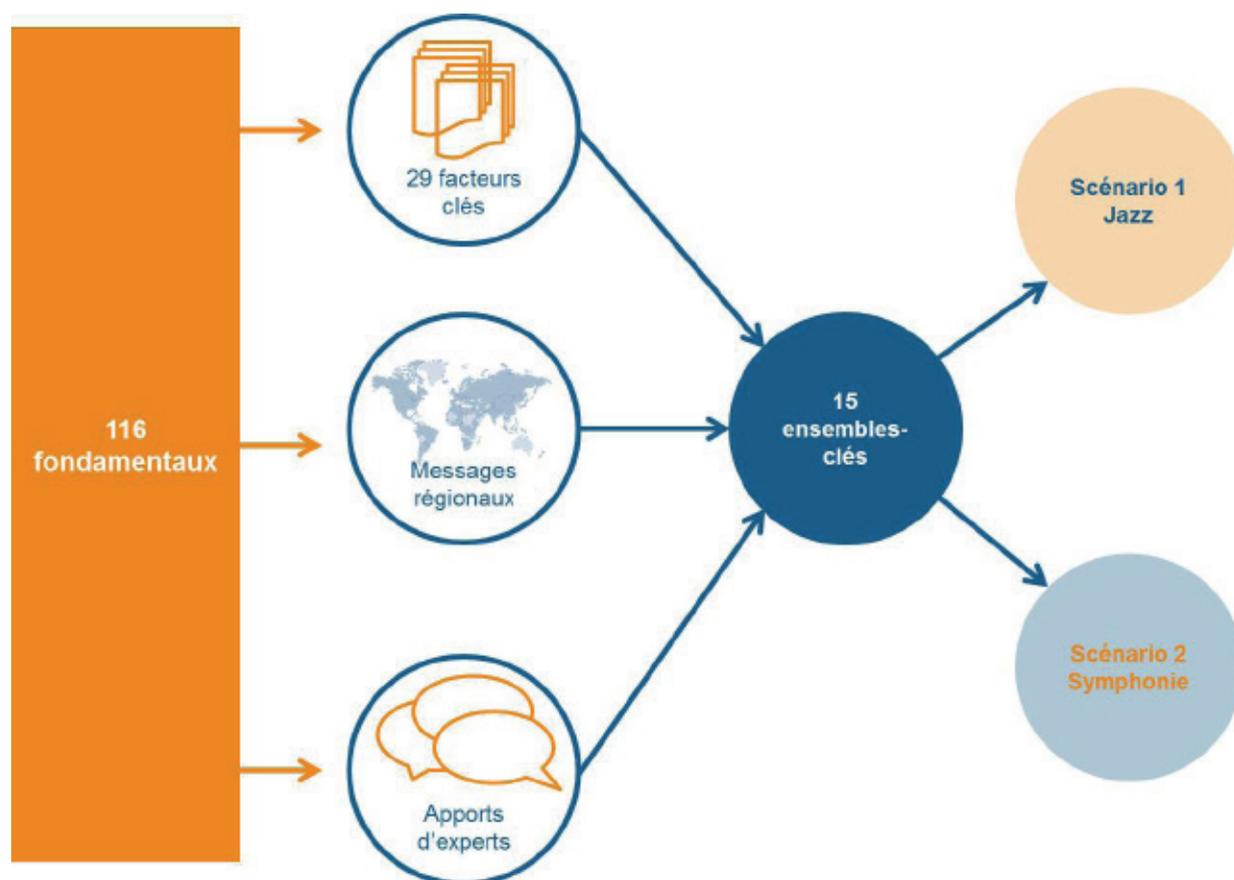
Le modèle de l'entonnoir : quand l'incertitude augmente, l'entonnoir s'élargit

Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)



Les scénarios du CME : deux espaces futurs

Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)



Les 15 ensembles-clés :

1. Le gouvernement et le rôle de l'État
2. La disponibilité des fonds : investissements
3. L'atténuation du CO₂
4. L'égalité, l'accès à l'énergie et la pauvreté
5. L'économie mondiale
6. Les prix de l'énergie
7. L'acceptation des consommateurs et des citoyens
8. L'efficacité énergétique
9. Les évolutions technologiques
10. La sécurité de l'offre
11. La Chine et l'Inde
12. La précarité énergétique
13. Les sources d'énergie
14. La compétition pour les ressources
15. Les pénuries de compétences

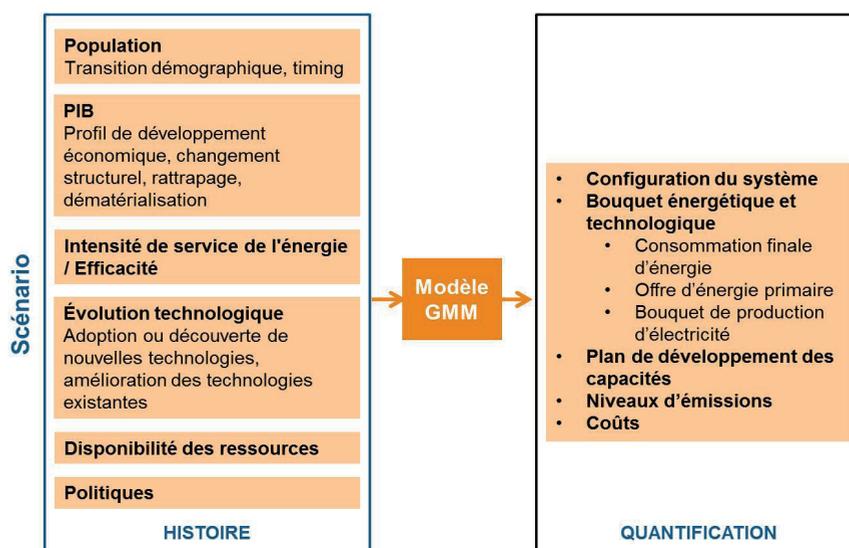
Pour le CME les évolutions futures de ces 15 groupes-clés détermineront à quoi ressemblera le paysage énergétique de 2050. Tous ces ensembles sont donc d'égale importance.

Le CME a utilisé ces groupes-clés et les a articulés pour construire deux futurs distincts, à partir d'hypothèses précises qui correspondent à deux visions du monde et donc à deux futurs « scénarios ». Les histoires associées à ces deux scénarios, qui ont été développées par cette méthodologie, sont donc exploratoires et non normatives, également probables mais différentes plutôt que seulement « bien » ou « mal ».

Afin d'obtenir les meilleures informations des experts de l'énergie du monde entier, le CME a adopté un processus ouvert, global et transparent qui intègre tous les apports dans les histoires associées aux scénarios, qu'il s'agisse des membres du groupe d'études, des experts qui ont participé aux réunions ou qui ont été interviewés ou des participants aux ateliers régionaux qui se sont tenus à New Delhi, à Johannesburg, à Londres, à Pékin, à Washington D.C et à Cancun.

La quantification des scénarios : utilisation du modèle mondial multi-régional Markal (GMM).

Source : Conseil Mondial de l'Énergie (2013)



Quantification des histoires des scénarios du CME

Pour modéliser et quantifier chaque scénario, les fondamentaux des clusters ont été regroupés et traduits en variables d'entrée chiffrées : demande d'énergie, caractéristiques et déploiements, disponibilité des technologies, disponibilité des ressources énergétiques et coûts d'extraction, prix du CO₂ et autres. Les mesures de politiques et les aspects comportementaux des hypothèses du scénario ont été traduits dans des contraintes et paramètres supplémentaires de la modélisation, comme par exemple les hypothèses sur les ressources des fossiles non conventionnels, les biocarburants ou la politique climatique.

Les étapes de développement et de quantification de l'histoire cherchent à intégrer l'interdépendance entre les différents fondamentaux et les hypothèses sur les variables d'entrée du modèle (par exemple, la demande en énergie qui dépend du PIB, les évolutions structurelles et l'efficacité énergétique qui dépendent des politiques et autres facteurs). Les fondamentaux des scénarios sont entrés directement dans le modèle qui décrit la structure du système énergétique sous-jacent, est construit à partir de données numériques et de séries temporelles, suit une structure mathématique précise, inclut l'information sur les limites et les contraintes en fonction de relations définies par

l'utilisateur et peut décrire différents scénarios et stratégie.

Le modèle de systèmes énergétiques utilisés par le CME pour quantifier ces scénarios est basé sur le cadre reconnu MARKAL (MARKer ALlocation). Plus précisément le CME utilise le modèle mondial multi-régional MARKAL (GMM) développé par l'institut Paul Scherrer (PSI). GMM est un modèle d'optimisation des coûts qui fournit des solutions minimisant le coût du système énergétique mondial en fonction de l'ensemble des hypothèses et des contraintes d'un scénario. C'est un modèle dynamique d'équilibre partiel ; les parts des technologies et des vecteurs énergétiques utilisés pour l'extraction et pour la conversion ainsi que les demandes énergétiques finales sont déterminées de façon endogène par le modèle, tandis que les demandes en énergie utile (service) sont données par les scénarios.

Le modèle GMM permet de choisir entre plusieurs décompositions régionales du monde, on peut ainsi analyser la sensibilité des résultats au découpage retenu. Le modèle prend compte un horizon à long terme (jusqu'à 2050 et même au-delà) permettant l'analyse de questions énergétiques comme l'épuisement des ressources, les politiques climatiques, le développement économique et l'apprentissage des technologies.

GMM est un modèle « bottom-up » qui représente

² Le cadre de modélisation MARKAL est largement utilisé dans plus de 250 établissements dans près de 70 pays, le cadre fait partie du programme (ETSAP) de l'AIE Energy Technology Systems Analysis.

bien l'approche décentralisée du CME adoptée pour construire ces scénarios ; le modèle comprend une représentation détaillée des ressources, des technologies, des flux énergétiques et des hypothèses sur l'évolution des technologies, leur développement, leur coût et l'amélioration de leur efficacité dans le temps.

Jokers et incertitudes critiques

Le CME considère que la technologie de captage, d'utilisation et de stockage du carbone, l'évolution des profils de consommation et le stockage de l'énergie sont les incertitudes-clés d'ici 2050.

La technologie de captage, d'utilisation et de stockage du carbone (CUSC) est déjà disponible et représente potentiellement l'une des options les moins coûteuses de décarbonation. Mais elle constituera toujours un coût supplémentaire et nécessitera d'importants pipelines et autres infrastructures. Pour développer le CUSC, il faut des cadres législatifs clairs, des investissements en infrastructures et des incitations bien ciblées. Le signal prix du carbone qu'il faut développer dans les prochaines années pour permettre l'émergence du CUSC profitera également aux courbes d'apprentissage et à l'adaptabilité des énergies renouvelables (diminution du coût du capital). Le CUSC pourrait n'être possible que dans certaines régions du monde, lorsque la géologie le permet. Le CME suppose que c'est vraisemblablement plus dans le scénario Symphonie que les premiers

projets de CUSC vont impliquer un stockage en aquifère en Europe, sous la mer du Nord, et de grands projets de récupération assistée de pétrole, dans les réservoirs de gaz et de pétrole des États-Unis, sous l'impulsion des restrictions aux émissions de CO₂ liée à la production d'électricité, imposées par l'agence américaine de protection de l'environnement. Le CME fait l'hypothèse que dans le scénario Jazz, sans intervention gouvernementale, le marché mettra du temps à prendre en compte efficacement le CO₂ à cause des coûts initiaux élevés d'infrastructures, à moins d'une incitation commerciale comme la récupération assistée du pétrole.

En ce qui concerne les technologies de stockage de l'énergie, le stockage par pompage est une technologie bien développée, largement mise en œuvre et dont l'usage n'est limité que par la disponibilité de sites. La transformation de l'électricité en gaz (hydrogène ou méthane) pourrait être une option rapide à mettre en œuvre, étant donné qu'il existe déjà des infrastructures gazières. D'autres technologies de stockage de l'énergie, nouvelles ou émergentes, telles que les batteries et l'hydrogène, ont encore besoin de plus de R&D avant de devenir commercialement viables. Des investissements en R&D sont donc nécessaires pour que ces technologies puissent jouer un rôle-clé d'ici 2050, notamment pour surmonter le problème de l'intermittence des énergies renouvelables.



Les scénarios mondiaux de l'énergie à l'horizon 2050

Messages-clés de Jazz et Symphonie pour les décideurs politiques et les industriels de l'énergie

1

La complexité du système énergétique va s'accroître d'ici 2050

Le paysage énergétique que nous dessinons pour 2050 sera très différent de celui d'aujourd'hui. L'ajustement de l'offre et de la demande d'énergie gagne en complexité. Les coûts d'intégration au système sont substantiels, particulièrement quand une part importante de renouvelables entraîne des coûts croissants de développement du réseau des réseaux de distribution et de transport (particulièrement dans le scénario Symphonie). Pour mieux comprendre et finalement mieux répondre à cette complexité croissante, la modélisation des systèmes intégrés devra donner à l'avenir plus d'importance à proposer une vision plus holistique qui conduira à une meilleure compréhension des systèmes énergétiques complexes.

2

L'efficacité énergétique est cruciale pour résorber l'avance de la demande sur l'offre

Les scénarios énergétiques mondiaux pour 2050 du CME montrent que l'efficacité énergétique et la conservation de l'énergie sont absolument cruciales pour résorber l'avance de la demande sur l'offre ; toutes deux exigent un changement des priorités du consommateur et ont des implications en termes de coût dans toutes les industries. Des capitaux seront donc nécessaires pour financer les mesures d'efficacité énergétique, notamment l'investissement initial avant qu'il ne soit rentable. Dans les deux scénarios, Jazz et Symphonie, la mobilité électrique arrive plus tard qu'on ne l'attendait, pas avant 2030. Les politiques et les industriels doivent consentir des efforts encore plus importants pour promouvoir la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité : elle ne progresse actuellement pas assez vite pour assurer un environnement soutenable dans le long terme, en 2050 et au-delà.

3

Le bouquet énergétique de 2050 restera majoritairement fossile

Les scénarios énergétiques mondiaux à l'horizon 2050 du CME montrent qu'en 2050, les énergies fossiles joueront toujours un rôle crucial à la fois dans la production d'électricité et dans le transport ; c'est particulièrement le cas dans Jazz. Le charbon continuera de jouer un rôle important dans le long terme, particulièrement pour la production d'électricité en Chine et en Inde, deux pays dont la demande s'accroît le plus rapidement d'ici 2050. Le gaz naturel, en particulier provenant de sources non conventionnelles, jouera un rôle croissant et prendra une place plus importante dans l'énergie. Un exemple est le secteur du transport : le transport des pondéreux dépendra des énergies fossiles pendant encore des décennies. Le pétrole continuera de rester dominant dans les transports ; on prévoit davantage d'importance des sources non conventionnelles, en particulier les

sables et schistes bitumineux. Aucune renaissance de l'énergie nucléaire n'est anticipée. L'énergie nucléaire ne changera pas la donne, avec un impact limité également dû à la dimension économique. Dans le scénario Symphonie, le CME prévoit une augmentation importante de la part des énergies renouvelables, principalement le photovoltaïque, l'hydroélectricité et l'éolien.

4

Les priorités régionales diffèrent : il n'y a pas de solution « taille unique » au trilemme énergétique

Il n'y a pas de solution globale à la question de l'offre d'énergie. La recherche de la solution repose plutôt sur la résolution de toutes les initiatives individuelles pour atteindre l'objectif global d'une offre d'énergie respectueuse de l'environnement, bon marché et fiable pour tous. Des incertitudes critiques demeurent, concernant par exemple le CUSC ou le développement futur des technologies de stockage de l'énergie que l'on pourra déployer du point de vue économique. Dans ce monde complexe, les gouvernements jouent un rôle crucial en concevant et en mettant en place le cadre d'un fonctionnement des marchés, et ceci dans les deux scénarios. Les industries et les marchés sont nécessaires pour fournir des solutions efficaces. Jusqu'en 2050, la réalité se trouvera quelque part entre Jazz et Symphonie en termes d'offre d'énergie, de croissance de la demande d'énergie et de croissance économique – ou elle pourrait même aller au-delà.

5

Ce sera un vrai défi pour l'économie mondiale d'atteindre l'objectif de 450 ppm sans prix du carbone inacceptable

Les scénarios énergétiques mondiaux pour 2050 soulignent qu'une réduction des émissions de gaz à effet de serre est possible dans la seconde partie des scénarios si des accords mondiaux sont acceptés et si sont mis en place des instruments de marché efficaces, comme les échanges d'émissions avec un système cap and trade (comme dans Symphonie). Le captage, l'utilisation et le stockage du carbone (CUSC) est une option efficace économiquement pour limiter les émissions de CO₂, qui peut jouer un rôle important après 2030, en fonction du prix du CO₂. Un tel prix du CO₂ doit être suffisamment élevé pour donner le bon signal et l'incitation adaptée pour réduire le CO₂. Les scénarios indiquent que ces réductions importantes de CO₂ sont possibles si les gouvernements agissent et envoient aux acteurs industriels et aux marchés les justes incitations pour développer les solutions technologiques pour y parvenir. Cependant, les signaux actuels indiquent que l'économie mondiale ne se dirige pas vers l'objectif de 450ppm en termes d'émission sans prix du carbone inacceptable. Dans le scénario Symphonie, les émissions de CO₂ commencent à diminuer à partir de 2030 mais elles n'atteignent pas l'objectif de 450 ppm. Dans le scénario

Jazz, le prix des émissions de carbone ne se stabilise pas à un niveau bas avant 2050 environ.

6

Un futur « bas carbone » ne dépend pas que des énergies renouvelables : le captage, l'utilisation et le stockage du carbone et le comportement des consommateurs doivent contribuer au changement.

Le captage, l'utilisation et le stockage du carbone (CUSC) est une technologie qui, en plus de la production d'électricité renouvelable, permettra de réduire les émissions de CO₂. Avec un signal prix du CO₂ adéquat, le CUSC peut jouer un rôle important après 2030 comme solution efficace économiquement de réduction des émissions.

Le prix du CO₂ doit être assez élevé pour créer le juste signal qui constituera une incitation adéquate à la réduction du CO₂. Des difficultés demeurent comme la faisabilité technique à large échelle, les réticences du public et le coût des infrastructures. Ces questions sont mieux traitées dans Symphonie où le CUSC et le solaire contribuent également à la décarbonation du système énergétique d'ici 2050. Pour que la décarbonation soit plus effective, les citoyens jouent un rôle crucial, comme consommateurs dans Jazz et comme électeurs dans Symphonie. Des changements dans les habitudes de consommation peuvent être un moyen efficace de décarboner le système énergétique. Les électeurs doivent trouver un équilibre entre problèmes locaux et mondiaux.

7

Le captage et stockage du carbone, l'énergie solaire et le stockage de l'énergie sont les incertitudes majeures d'ici 2050.

Pour le CME, la technologie CUSC, l'énergie solaire et le stockage de l'énergie sont des incertitudes clés d'ici 2050. Les technologies CUSC sont déjà disponibles et représentent potentiellement l'une des manières les plus rentables de décarboner l'économie ; mais ce sera toujours considéré comme un coût supplémentaire et nécessitera des pipelines importants ainsi que d'autres infrastructures. Pour que le CUSC se développe, il faut des cadres législatifs clairs, associés à des investissements en infrastructures et des incitations adaptées. Le CME fait l'hypothèse que les technologies solaires, en particulier le solaire photovoltaïque, vont décoller grâce aux tarifs de rachat de l'électricité, aux subventions et à la formation des prix en Europe ainsi qu'à une forte baisse des coûts de ces technologies. Elles feront ensuite des avancées majeures et seront utilisés en Inde, en Afrique et dans d'autres pays pour apporter l'électricité à des communautés rurales ou isolées du réseau. Des subventions seront nécessaires pour que l'énergie solaire devienne rentable économiquement et pour encourager les investissements. Les subventions pour le solaire sont plus élevées dans Symphonie que dans Jazz, ce qui mène à une trajectoire de pénétration du marché plus haute pour le photovoltaïque.

En ce qui concerne les technologies de stockage de l'énergie, le stockage par pompage est une technologie mature et largement développée ; son utilisation est limitée. D'autres techniques de stockage, nouvelles ou émergentes comme les batteries, l'hydrogène, la transformation d'électricité en gaz (hydrogène ou méthane) ont besoin de davantage de R&D avant de devenir commercialement viables. Les investissements en R&D sont donc nécessaires pour promouvoir ces technologies qui pourraient jouer un rôle clé d'ici 2050, spécialement pour pallier la question de

l'intermittence liée à une forte pénétration des renouvelables dans Symphonie.

8

Répondre au trilemme énergétique implique des choix difficiles.

Les citoyens ont le choix entre une énergie bon marché et une croissance économique élevée dans Jazz ou des prix de l'énergie plus élevés et moins d'impact sur l'environnement dans Symphonie. On voit ainsi qu'une vision globale à long terme du secteur de l'énergie est indispensable pour répondre aux questions du trilemme énergétique, jusqu'en 2050 et au-delà. Pour les hommes politiques, le temps du « court-termisme » est révolu : des cadres législatifs clairs et stables sont indispensables pour garantir la prévisibilité financière qui permettra aux marchés de se développer et à l'industrie d'apporter des solutions aux besoins croissants en énergie dans le monde.

9

Les marchés énergétiques exigent des investissements et une intégration régionale pour bénéficier à tous les consommateurs.

La disponibilité des capitaux pour l'investissement est l'un des facteurs-clés des scénarios qui modèlera le paysage énergétique de 2050. Le CME a évalué les conséquences des investissements pour la production d'électricité dans les scénarios Jazz et Symphonie, au niveau global et au niveau régional. Des décisions d'investissements à long terme sont indispensables pour satisfaire la demande énergétique future. Les coûts d'investissement pour la production d'électricité associés à chacun des scénarios se situent approximativement à 26 000 milliards de dollars dans Jazz et à 19 000 milliards de dollars dans Symphonie pour la seule production d'électricité.

Pour que de tels investissements soient possibles, des signaux clairs sont indispensables à la fois avec une haute prévisibilité financière, des cadres réglementaires stables avec un risque de régulation faible et un fonctionnement des marchés qui assure que l'énergie pourra être acheminée vers tous les consommateurs qui en ont besoin, pour le plus grand bénéfice de tous.

10

La politique énergétique doit garantir le fonctionnement des marchés de l'énergie et du carbone.

Le CME croit fermement que la politique énergétique devrait garantir que les marchés de l'énergie et du carbone encouragent les investissements, promeuvent l'intégration régionale et donc apportent les bénéfices au consommateur. Dans Symphonie, un accord sur un objectif de décarbonation en 2030 constituerait un bon signal pour les investisseurs à favoriser les investissements dans différentes technologies. Dans Symphonie, les gouvernements devraient être conscients que la promotion de nouvelles technologies par des subventions comme des tarifs de rachat peut aussi créer des « bulles » sur les marchés de l'énergie. Dans le scénario Jazz, les gouvernements pourraient faciliter la croissance des marchés nationaux et régionaux en simplifiant les procédures et en encourageant l'intégration et la coopération régionales. Cela aboutira à une meilleure intégration des marchés et à la création de marchés régionaux qui bénéficieront à tous les consommateurs.

Annexe des données

Jazz
Symphonie

APPROVISIONNEMENT TOTAL EN ÉNERGIE PRIMAIRE PAR TYPE D'ÉNERGIE (Unité : EJ/an)

Énergie primaire	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Charbon	148	181	200	224	223	146	125	101	106
Pétrole	172	193	225	231	216	177	185	170	141
Gaz	114	151	189	216	234	141	160	170	166
Nucléaire	30	36	37	37	37	40	52	66	79
Biomasse	66	60	59	71	97	62	66	79	111
Hydroélectricité	13	14	16	19	21	16	19	24	28
Renouvelables	2	7	14	28	51	10	23	45	65
Total	545	642	740	826	879	592	630	655	696

APPROVISIONNEMENT TOTAL EN ÉNERGIE PRIMAIRE PAR RÉGION (Unité : EJ/an)

Région	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Afrique subsaharienne	23	24	29	38	50	23	27	35	46
Asie du Sud-Est et Pacifique	32	44	56	66	71	40	46	50	54
Amérique du Nord	116	128	135	136	130	118	114	108	105
Moyen-Orient et Afrique du Nord	37	44	55	67	79	43	52	59	67
Amérique latine et Caraïbes	29	38	49	58	67	35	43	47	51
Europe	121	127	133	136	135	119	117	114	114
Asie de l'Est	145	187	215	222	211	167	174	166	164
Asie du Sud et Asie Centrale	43	52	69	102	136	47	57	75	96
Total	546	644	741	825	879	592	630	654	697

PRODUCTION TOTALE D'ÉLECTRICITÉ (Unité : TWh/an)

Région	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Afrique subsaharienne	414	612	996	1,857	3,087	597	936	1,687	2,836
Asie du Sud-Est et Pacifique	996	1,549	2,106	3,123	4,024	1,409	2,045	2,699	3,398
Amérique du Nord	5,214	6,152	6,903	7,728	8,024	6,100	6,733	7,695	8,057
Moyen-Orient et Afrique du Nord	1,150	1,445	1,951	2,693	3,644	1,485	1,911	2,476	3,314
Amérique latine et Caraïbes	1,147	1,648	2,422	3,131	3,701	1,571	2,209	2,750	3,221
Europe	5,104	5,932	6,869	7,803	8,439	5,656	6,363	7,037	7,961
Asie de l'Est	6,121	8,761	11,070	13,064	14,298	7,749	9,223	10,916	12,571
Asie du Sud et Asie Centrale	1,331	1,861	2,881	5,055	8,429	1,749	2,476	4,339	6,560
Total	21477	27960	35198	44,454	53,646	26316	31896	39,599	47,918

PRIX DU CARBONE (US\$2010/tCO₂)

Région	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Afrique subsaharienne	0	5	10	23	10	23	42	70
Moyen-Orient et Afrique du Nord	0	5	10	23	10	23	42	70
Amérique latine et Caraïbes	0	5	10	23	10	23	42	70
Amérique du Nord	8	15	21	28	21	28	55	70
Europe	0-8	5-15	10-30	23-45	10-30	23-40	50-60	75-80
Asie du Sud et Asie Centrale	0	5	10	23	10	23	50	75
Asie de l'Est	0-6	5-12	10-24	23-38	10-24	23-38	50-60	75
Asie du Sud-Est et Pacifique	0-6	5-12	10-24	23-38	10-24	23-38	50-60	75

CO₂ – ÉMISSIONS PAR RÉGION (Unité : GtCO₂/an)

Région	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Afrique subsaharienne	0.7	0.8	1.1	1.5	1.7	0.7	0.8	0.9	0.9
Asie du Sud-Est, Pacifique	1.7	2.5	3.2	3.8	3.7	2.1	2.3	2.1	1.7
Amérique du Nord	6.5	7.2	7.3	7.2	6.7	6.2	5.4	4.4	3.1
Moyen-Orient et Afrique du Nord	2.1	2.3	2.7	3.1	3.5	2.2	2.5	2.4	2.3
Amérique latine et Caraïbes	1.2	1.5	2.0	2.2	2.1	1.3	1.5	1.3	0.8
Europe	6.2	6.4	6.7	6.4	5.6	5.6	5.0	3.9	2.5
Asie de l'Est	9.8	12.7	14.7	14.7	12.3	10.8	10.1	7.8	5.1
Asie du Sud et Asie Centrale	2.3	3.0	4.1	6.3	8.4	2.5	2.8	3.1	2.7
Total	30.5	36.4	41.8	45.2	44.0	31.4	30.4	25.9	19.1

CAPTAGE, UTILISATION ET STOCKAGE DU CARBONE PAR RÉGION (Unité : GtCO₂/an)

	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Énergie primaire									
Afrique subsaharienne	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.5
Asie du Sud-Est, Pacifique	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.2	0.7
Amérique du Nord	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.3	1.1
Moyen-Orient et Afrique du Nord	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4
Amérique latine et Caraïbes	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2
Europe	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	1.2
Asie de l'Est	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1	0.4	1.6
Asie du Sud et Asie Centrale	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	1.2
Total	0.0	0.0	0.0	0.4	1.3	0.0	0.3	1.7	6.9

PRODUCTION GLOBALE D'ÉLECTRICITÉ PAR ORIGINE DE CARBURANT (Unité : TWh/an)

	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Énergie primaire									
Charbon (avec CSC)	0	10	87	346	1,007	41	301	1,587	7,100
Charbon	8,666	11,920	14,792	18,565	19,272	9,289	7,949	5,280	1,383
Pétrole	980	0	0	0	0	0	0	0	0
Gaz (avec CSC)	0	2	31	140	558	11	113	789	2,505
Gaz	4,777	7,232	9,734	11,427	12,869	6,609	8,127	9,049	7,012
Nucléaire	2,763	3,255	3,430	3,395	3,279	3,651	4,706	5,888	6,950
Hydrogène	0	0	2	12	69	0	5	32	155
Hydroélectricité	3,491	4,003	4,550	5,146	5,789	4,337	5,408	6,530	7,701
Biomasse	337	287	390	884	1,923	362	535	1,056	1,913
Biomasse (avec CSC)	0	8	28	160	441	16	100	295	800
Éolien	358	818	1,435	3,142	4,513	1,386	2,418	2,994	4,003
Solaire	34	302	462	732	2,979	519	2,054	5,752	7,741
Géothermie	69	125	257	504	949	94	182	346	654
Total	21,475	27,962	35,198	44,453	53,648	26,315	31,898	39,598	47,917

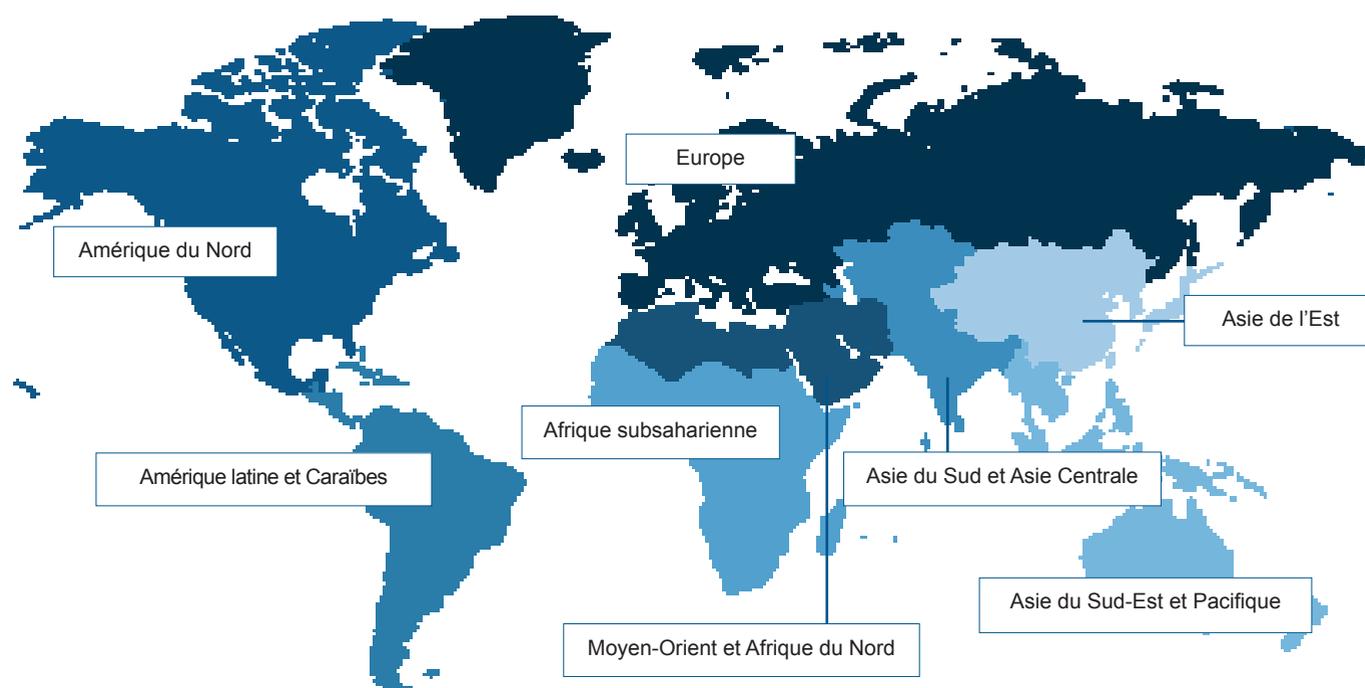
CAPACITÉ GLOBALE DE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ INSTALLÉE PAR ORIGINE (Unité : TWh/an)

Technologie	2010	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050
Charbon (avec CSC)	0	2	14	49	141	9	47	226	1,006
Charbon	1,606	2,084	2,503	3,038	3,003	1,610	1,352	1,003	484
Pétrole	426	289	168	86	41	289	168	86	41
Gaz (avec CSC)	0	4	20	63	178	8	40	206	603
Gaz	1,412	1,657	1,674	1,851	2,353	1,589	1,691	2,198	2,036
Nucléaire	373	417	438	434	421	468	603	751	884
Hydrogène	0	0	0	3	15	0	2	10	39
Hydro	1,026	1,136	1,267	1,414	1,575	1,223	1,505	1,854	2,161
Biomasse	71	62	65	124	256	73	87	156	292
Biomasse (avec CSC)	0	2	9	28	78	5	18	52	141
Éolien	191	404	621	1,290	1,824	667	1,059	1,274	1,654
Solaire	39	255	326	445	1,654	437	1,451	3,585	4,439
Géothermie	11	19	38	75	141	14	28	54	102
Total	5,156	6,330	7,142	8,899	11,680	6,392	8,049	11,454	13,881

CUMUL DES INVESTISSEMENTS DANS LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ (2010–2050, billion US\$2010, non actualisé)

Énergie primaire	Asie du Sud et Asie Centrale	Asie de l'Est	Europe	Amérique latine et Caraïbes	Moyen-Orient et Afrique du Nord	Amérique du Nord	Asie du Sud-Est, Pacifique	Afrique sub.	Monde
Charbon (avec CSC)	20	40	50	20	10	30	30	10	200
Charbon	2,260	2,540	750	90	30	580	510	180	6,950
Pétrole	0	20	20	10	10	30	0	0	90
Gaz (avec CSC)	30	50	0	0	30	0	10	30	140
Gaz	100	320	440	190	340	320	190	160	2,050
Nucléaire	30	380	370	10	50	160	0	10	1,010
Hydrogène	20	0	0	0	0	0	0	10	30
Hydroélectricité	230	560	370	310	10	290	100	80	1,950
Biomasse	20	20	90	70	0	30	10	20	260
Biomasse (avec CSC)	10	20	80	30	10	40	30	10	240
Éolien	160	370	770	170	10	990	160	100	2,720
Solaire	160	710	270	380	150	150	540	580	2,950
Géothermie	40	70	50	80	20	150	240	70	720
Total	3,080	5,100	3,260	1,360	670	2,770	1,820	1,260	19,310
Charbon (avec CSC)	310	400	290	30	50	290	170	90	1,620
Charbon	330	820	240	10	10	110	80	50	1,660
Pétrole	0	20	20	10	10	30	0	0	90
Gaz (avec CSC)	80	120	30	10	90	10	50	90	490
Gaz	140	470	400	120	270	320	190	70	1,980
Nucléaire	130	830	550	30	100	300	60	20	2,020
Hydrogène	60	0	0	10	0	0	10	20	100
Hydroélectricité	540	1,020	510	480	0	490	230	260	3,520
Biomasse	50	20	100	120	10	30	10	10	340
Biomasse (avec CSC)	70	90	90	40	20	70	40	20	440
Éolien	580	420	1,020	110	0	990	70	80	3,280
Solaire	1,110	3,160	1,120	360	840	1,600	860	600	9,660
Géothermie	60	30	30	0	10	210	100	70	520
Total	3,460	7,400	4,390	1,330	1,410	4,450	1,870	1,380	25,720

Régions



Principaux contributeurs

Christoph Frei
Secrétaire général, CME

Rob Whitney
Président exécutif de l'étude des scénarios

Hans-Wilhelm Schiffer
Vice-président exécutif

Karl Rose
Directeur Senior, politiques et scénarios

Dan A. Rieser
Directeur adjoint, scénarios

Ayed Al-Qahtani
Chef de project Senior, scénarios

Philip Thomas
Chef de projet, scénarios

Équipe PSI Energy Economics

Hal Turton

Martin Densing

Evangelos Panos

Kathrin Volkart

Les opinions exprimées dans ce rapport sont celles du Conseil Mondial de l'Énergie et ne reflètent pas nécessairement celle de l'équipe PSI Energy Economics.

Conseil Français de l'Énergie

12 rue de Saint-Quentin

75010 Paris - France

T (+33) 1 40 37 69 01

F (+33) 1 40 38 17 38

E cfe@wec-france.org

www.wec-france.org

Promouvoir la fourniture et l'utilisation

durables de l'énergie

pour le plus grand bien de tous