

**Commission économique pour l'Europe**

Comité de l'énergie durable

**Groupe d'experts des systèmes de production
moins polluante d'électricité****Dix-neuvième session**

Genève, 3-4 octobre 2023

Point 6 de l'ordre du jour provisoire

Moyens d'atteindre la neutralité carbone des systèmes électriques**Transition vers la neutralité carbone des systèmes
électriques – Principes communs pour
un approvisionnement fiable****Note du secrétariat***Résumé*

Si l'on veut réduire à zéro d'ici à 2050 la quantité nette de dioxyde de carbone émise à l'échelle mondiale, objectif environnemental louable, il faudra opérer des changements fondamentaux dans la structure et le fonctionnement des différents secteurs de l'économie. Il en résultera une accélération des changements sur les plans de la gestion des ressources, de la chaîne d'approvisionnement, de la consommation finale et des technologies de conversion. Une action sans précédent, menée avec détermination, sera nécessaire à cette fin.

L'électrification est un moyen de réduire les émissions provenant de nombreuses activités, mais encore faut-il que, parallèlement à son expansion, le secteur de l'électricité passe à des technologies de production à émissions nettes de dioxyde de carbone faibles ou nulles, voire négatives et que, si nécessaire, à terme, des technologies d'élimination du dioxyde de carbone soient également adoptées.

Le présent document a été élaboré par le Groupe d'experts des systèmes de production moins polluante d'électricité à l'appui des activités du Comité de l'énergie durable. Il porte sur la perte de fiabilité de l'approvisionnement qui pourrait résulter de l'expansion et de la transition nécessairement rapides que le secteur va connaître, et présente une réflexion sur les moyens de maintenir des capacités de production pilotable suffisantes pendant la transition vers la neutralité carbone afin de préserver la fiabilité et la résilience des réseaux.



I. Introduction

1. Pour atteindre l'objectif environnemental louable de réduction des risques et des effets des changements climatiques causés par les gaz à effet de serre (GES), il faut parvenir à la neutralité carbone à l'échelle mondiale (c'est-à-dire ramener les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) à un niveau aussi proche de zéro que possible et extraire de l'atmosphère le CO₂ qui continue d'être émis) d'ici à 2050, soit en un peu moins de 10 000 jours. Pour ce faire, il faut complètement transformer la structure et le fonctionnement des différents secteurs de l'économie. Il en résultera une accélération des changements sur les plans de la gestion des ressources, de la chaîne d'approvisionnement, de la consommation finale et des technologies de conversion. Une action sans précédent, menée avec détermination, sera nécessaire à cette fin.

2. L'un des principaux moyens de parvenir à la neutralité carbone consiste à passer à l'électricité pour de nombreux usages énergétiques finaux pour lesquels, à l'heure actuelle, il est fait une utilisation directe de combustibles fossiles. Cette électrification nécessiterait une hausse considérable de la production d'électricité, même si l'efficacité énergétique était améliorée au stade de l'utilisation finale. À court terme, la priorité devra être d'électrifier les secteurs de la mobilité et de la construction, deux des plus gros consommateurs d'énergie. Cependant, pour que l'électrification conduise à une vraie réduction des émissions, il faut que le secteur de la production d'électricité opère, parallèlement à son expansion, une transition vers des sources d'énergie à émissions nettes de GES faibles, puis nulles, des méthodes d'extraction du CO₂ de l'atmosphère étant ensuite employées, si nécessaire, pour que les émissions nettes deviennent négatives¹. La communauté financière internationale s'emploie actuellement à accélérer cette transition en intégrant des stratégies relatives à l'environnement, à la société et à la gouvernance d'entreprise dans les pratiques de prêt aux niveaux régional et national.

3. Des stratégies sont mises en place dans de nombreux pays de la région de la Commission économique pour l'Europe (CEE) afin de promouvoir le déploiement rapide de technologies exploitant des sources d'énergie renouvelable, en particulier l'éolien et le solaire, à l'échelle la plus large possible, et d'encourager, en complément, les investissements dans des technologies émergentes permettant le stockage d'énergie (notamment le stockage de l'hydrogène et de nombreuses autres formes d'énergie). Certains États membres de la CEE mettent également en place de nouveaux moyens de production d'électricité d'origine nucléaire, ainsi que des solutions reposant sur l'utilisation des combustibles fossiles et de la biomasse avec captage et stockage du carbone (CSC).

4. La logique économique veut qu'une fois mis en place des moyens de production reposant sur des sources d'origine non fossile (éolien, solaire ou nucléaire, par exemple), dont les coûts marginaux sont nuls ou faibles, ils remplaceront les moyens de production reposant sur les combustibles fossiles avec et sans CSC. De même, les centrales électriques avec CSC auront des coûts marginaux inférieurs à ceux des centrales classiques exploitant des combustibles fossiles sans dispositif d'atténuation, même à des niveaux modérés de tarification des émissions de carbone², et l'on peut s'attendre à ce qu'elles soient exploitées en priorité en cas de besoin.

5. Il est cependant aussi envisagé d'imposer des restrictions en ce qui concerne l'utilisation des combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) dans la production d'électricité, par exemple de fermer d'office des centrales. De telles mesures tendront évidemment à limiter plus encore l'utilisation des combustibles fossiles, mais elles réduiront également les capacités de production pilotable disponibles pour répondre à la demande quand il n'y a pas d'autre possibilité. Cela étant, les périodes au cours desquelles ces capacités devront être mobilisées seront normalement limitées et, à mesure du renforcement des infrastructures de production d'origine non fossile et de stockage de l'énergie, de plus en plus courtes.

¹ Voir https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf.

² Le prix du carbone qui ferait augmenter le coût marginal de la production d'origine fossile sans CSC est bien inférieur à celui qui permettrait de couvrir l'intégralité des coûts du CSC, notamment les dépenses d'équipement.

6. Un système énergétique résilient est un système qui résiste aux imprévus et est capable de revenir à la normale. À sa trente et unième session (21-23 septembre 2022), le Comité de l'énergie durable a également affirmé qu'un système énergétique résilient est un système conçu de telle sorte que l'énergie contribue de manière optimale au développement social, économique et environnemental d'un pays et qu'un équilibre soit établi entre durabilité, caractère abordable et sécurité³. Or, à moins que des capacités de production suffisantes soient maintenues pour répondre à la demande d'énergie, les critères relatifs à la sécurité, ainsi qu'au coût abordable, risquent de ne pas être satisfaits. Compte tenu de l'état actuel de la transition du secteur de l'électricité, la solution consiste à maintenir les capacités d'origine fossile jusqu'à ce qu'elles soient graduellement remplacées par d'autres options. Il importe donc que l'ensemble des stratégies qu'adoptent les États membres pour réduire les émissions de GES issues de la production d'électricité et, en parallèle, augmenter l'utilisation de l'électricité, n'entraînent pas de perte involontaire – et inacceptable – de fiabilité.

7. Il est avant tout nécessaire de pouvoir répondre à tout moment aux besoins en électricité ; jusqu'à ce que des solutions à grande échelle et à long terme soient mises en place pour le stockage de l'électricité et d'autres énergies, il faudra pouvoir compter sur d'importantes capacités de production pilotable (c'est-à-dire que l'énergie devra pouvoir être produite en fonction de la demande, avec une grande certitude quant à sa disponibilité en toutes circonstances). Par ailleurs, et c'est souvent moins évident, pour être stable, le réseau électrique nécessitera un ensemble de services de fiabilité essentiels permettant de maintenir la fréquence, la tension et la capacité d'adaptation de la puissance dans des conditions d'exploitation très diverses. Enfin, à mesure que d'autres sources d'énergie sobres en carbone mais variables sont ajoutées aux réseaux (éolien et solaire, par exemple), il deviendra essentiel de disposer de capacités de production d'électricité pilotable permettant d'adapter rapidement la production à la hausse et à la baisse pour compenser la plus grande variabilité de la production d'électricité reposant sur ces sources.

8. La majorité des services de fiabilité essentiels reposent actuellement sur la production à partir de combustibles fossiles. En cas de besoin, les centrales à combustibles fossiles peuvent produire une énergie pilotable, créer l'inertie nécessaire pour que le réseau résiste aux changements de fréquence du courant alternatif causés par des défaillances du système et pour réduire au minimum les effets des perturbations et générer de l'énergie réactive, nécessaire pour maintenir la tension. Ces centrales peuvent aussi, du moins pour ce qui est du gaz naturel, adapter rapidement la production à la hausse et à la baisse pour compenser la variabilité de la production éolienne et solaire.

9. S'il est primordial que l'électricité soit beaucoup plus utilisée à l'avenir, les contraintes que cette expansion fera peser sur les systèmes électriques n'ont bien entendu jamais été observées sur les réseaux actuels, et encore moins sur ceux de la période précédente, qui étaient largement alimentés au moyen de combustibles fossiles, ou dans le cas récent de régions où la demande en électricité s'est stabilisée ou a baissé. Ainsi, si l'on se fonde sur une expérience qui sera bientôt dépassée, on peut penser qu'un retrait accéléré des capacités de production exploitant les combustibles fossiles est réalisable et procéder à ce retrait, qui serait irréversible, sans avoir remplacé les services de fiabilité actuellement fournis par les moyens de production de ce type, services qui seront essentiels pour la fiabilité de réseaux électriques plus vastes. La mise hors service de certains moyens de production peut résulter non seulement de restrictions directes, mais aussi de prix faussés, qui ne reflètent pas la valeur de tous les services fournis, ou encore de l'importance des capitaux nécessaires pour satisfaire à de nouvelles règles environnementales proposées. On observe cette dynamique dans le contexte de la mise hors service d'actifs de production fonctionnant aux énergies fossiles dans plusieurs États membres de la CEE.

10. Du point de vue du Groupe d'experts des systèmes de production moins polluante d'électricité, il ne fait pas de doute qu'il est primordial, pour préserver la fiabilité et la résilience des réseaux, de maintenir suffisamment de capacités de production pilotable pour que ces services essentiels continuent d'être fournis jusqu'à ce que des solutions de remplacement soient en place. Ce maintien n'est pas nécessairement incompatible avec les

³ Voir <https://unece.org/sed/documents/2022/09/post-session-documents/final-report-thirty-first-session-committee>.

objectifs de décarbonisation. Comme indiqué précédemment, la consommation de combustibles fossiles et les émissions de CO₂ qui en résultent diminueront inévitablement avec la disponibilité accrue de sources de production bas carbone ayant des coûts d'exploitation faibles ou nuls. Toutefois, lorsqu'il sera nécessaire d'équilibrer les systèmes et de compléter des capacités d'origine renouvelable insuffisantes, il sera extrêmement précieux de disposer de capacités de production de secours, reposant souvent sur les combustibles fossiles, jusqu'à ce que des solutions de remplacement soient trouvées. Le maintien de capacités de production pilotable suffisantes (notamment de centrales fonctionnant aux énergies fossiles, dont le coefficient d'utilisation de la capacité est bien plus faible), éventuellement accompagné d'un passage à des combustibles émettant moins de carbone, tels que le gaz naturel, présente, du point de vue de la résilience, tout un ensemble d'avantages qui devraient autrement être obtenus grâce à d'autres technologies pour que les grands réseaux de transport (BPS, ou *bulk power system*) continuent à fonctionner. On pense notamment à la disponibilité des moyens nécessaires au démarrage à froid.

11. Par conséquent, le Groupe d'experts invite instamment les États membres à tenir compte des conséquences qu'auront les stratégies de réduction des émissions de carbone sur les capacités des installations classiques, non dotées de dispositif d'atténuation, de production pilotable d'origine fossile. Il les engage également à trouver des moyens de maintenir ces capacités jusqu'à ce qu'il soit clair que les services d'énergie et de fiabilité correspondants peuvent être obtenus au moyen d'autres solutions, à savoir des capacités de stockage de l'électricité à grande échelle et à long terme permettant d'assurer un approvisionnement complémentaire en énergie à la demande, des onduleurs intelligents capables de former naturellement un réseau (*grid-forming*) pour le contrôle de la fréquence et de la tension et, dans la mesure où cela est compatible avec les stratégies nationales, des centrales alimentées aux combustibles fossiles et dotées de systèmes de CSC qui peuvent offrir des services système similaires. Le stockage de l'électricité pourrait reposer sur des technologies de stockage physique inertiel (par exemple, pompage-turbinage ou stockage par air comprimé ou liquide) ou de stockage chimique (batteries), bien que ces technologies non fossiles permettant d'assurer la sécurité des réseaux soient encore en cours de mise au point et, pour la plupart, non exploitables à grande échelle, et qu'elles puissent se heurter à des limites physiques. D'autres systèmes de stockage de l'énergie, le stockage thermique par exemple, pourraient aussi permettre de réduire les pointes de demande en électricité. Dans les centrales fonctionnant aux combustibles fossiles, les techniques de CSC pourraient être utilisées à la source ; en particulier dans celles qui ne sont pas souvent utilisées, le CO₂ émis dans l'atmosphère pourrait être capté grâce à des systèmes de captage direct avant stockage. À nouveau, ces technologies sont émergentes et, dans le cas du CSC à la source, ne peuvent pas être employées partout.

II. Questions et problèmes

Les changements résultant de l'électrification seront énormes

12. L'électrification complète de l'économie nécessiterait une expansion massive des réseaux électriques, ce qui représenterait une véritable gageure compte tenu de l'intensité capitalistique des activités de production, de transport et de distribution d'électricité. Les prévisions de croissance de la charge réseau commencent déjà à faire apparaître des augmentations annuelles ; en Amérique du Nord, par exemple, ces augmentations atteignent 7 % à 10 % après une longue période de croissance très modérée due à des programmes d'efficacité énergétique.

13. Ces dix dernières années, afin d'atteindre les objectifs relatifs à la part des énergies renouvelables dans le portefeuille énergétique fixés par différents organes de réglementation et de décision, les services publics de distribution d'électricité ont procédé à une intégration intensive de sources de production à émissions faibles ou nulles dans les systèmes électriques. Conjuguées à la réduction du coût des onduleurs et des panneaux photovoltaïques, ces décisions ont rendu très attractifs les investissements commerciaux dans les sources d'énergie durable à production variable, qui représentent aujourd'hui plus de 60 % du total des investissements. En outre, les consommateurs sont incités à installer des panneaux solaires sur leurs toits et à participer à des programmes de gestion de la demande portant à la fois sur l'efficacité énergétique et sur l'adaptation de la demande.

14. Avec cette intégration accélérée des énergies à production variable dont le coût marginal est nul, la production pilotable perd en attractivité économique et est beaucoup moins souvent mobilisée. Devant investir des sommes considérables pour adapter l'infrastructure en fonction de nouvelles règles environnementales, ainsi que pour entretenir les installations, et ne disposant pas d'autres sources de revenus pour financer les services de fiabilité qu'ils fournissent, de nombreux propriétaires choisissent de mettre hors service les capacités reposant sur les énergies fossiles. À cause de ces mises hors service, l'ensemble des réseaux électriques actuels perdent en énergie réactive, en réponse en fréquence et en capacité d'adaptation de la puissance. Pour la stabilité de fonctionnement des réseaux, en particulier lors de défaillances et de perturbations, il est essentiel d'inverser la tendance.

La sécurité de l'approvisionnement en énergie est de plus en plus importante

15. La continuité de l'approvisionnement en électricité est gage de certitude pour les citoyens, qui sont assurés de disposer de suffisamment d'électricité pour couvrir leurs besoins sans devoir se tourner vers des solutions de secours (par exemple, bois de chauffage, groupe électrogène de réserve, batterie domestique). Cette continuité est essentielle pour ce qui est de moderniser l'économie et d'encourager l'électrification des transports et du chauffage, entre autres ; à mesure que les réseaux se transforment et s'étendent, elle devient plus importante encore. La production d'énergie solaire et éolienne est par nature variable puisqu'elle dépend des conditions météorologiques. D'autres sources d'énergie sont donc nécessaires pour les cas où les conditions réduisent fortement cette production.

16. Les fournisseurs d'électricité peuvent investir dans la gestion de la demande (efficacité énergétique et adaptation de la demande) mais, en cas d'événements météorologiques extrêmes prolongés, ces mesures peuvent se révéler insuffisantes dans leur portée ou leur durée, or il est nécessaire de disposer d'énergie pour répondre aux besoins essentiels de la société. C'est pourquoi, avec l'accent mis sur la décarbonisation par l'électrification de tous les types d'applications énergétiques, la continuité de l'approvisionnement devient de plus en plus importante. Si l'offre d'électricité est réduite, il est important que les réductions soient planifiées. Si elles le sont, les citoyens peuvent mieux s'y préparer ; si elles ne le sont pas, ils risquent de ne pas disposer de suffisamment d'énergie et de subir des préjudices. Par exemple, ces 20 dernières années, avec l'essor du commerce en ligne, le développement des télécommunications fondées sur l'Internet et le passage au numérique dans de nombreux domaines de la société (Internet des objets, loisirs, etc.), les interruptions de l'approvisionnement, même momentanées, sont de moins en moins bien tolérées. Avec la multiplication des utilisations finales de l'électricité, elles risquent de ne plus l'être du tout, et la fiabilité devra donc encore s'améliorer.

17. Étant donné que les réseaux voisins interconnectés sont souvent soumis aux mêmes conditions météorologiques et climatiques, il est difficile de compter sur les capacités de transfert pour garantir la sécurité énergétique ; ces capacités permettent avant tout de faire jouer la concurrence et de réduire les prix de l'énergie au jour le jour. C'est pourquoi on estime qu'actuellement, les principaux moyens nécessaires pour assurer la sécurité énergétique sont les centrales à combustibles fossiles avec CSC (ou les centrales à faibles émissions, comme celles qui sont alimentées à l'hydrogène), les grandes centrales hydroélectriques et les unités de stockage de l'énergie à grande échelle et à long terme.

Les capacités de production pilotable sont essentielles, mais déjà très sollicitées

18. En attendant que des solutions économiques de stockage de l'énergie soient déployées à grande échelle et qu'elles permettent un stockage dans la durée, sur plusieurs jours, il faudra que l'électricité continue d'être produite principalement au moment où elle est consommée. Si les profils de production de l'éolien et du solaire sont complémentaires à de nombreux égards, la corrélation est loin d'être parfaitement inverse et il est nécessaire de disposer de capacités très souples de production pilotable pour que la production d'électricité d'origine renouvelable puisse être équilibrée.

19. En raison de cette dynamique, le système d'approvisionnement en combustibles est fortement sollicité dans les régions où le taux de pénétration du photovoltaïque est très élevé ; comme la charge réseau continue à augmenter en fin d'après-midi et en soirée et que la production solaire diminue au coucher du soleil, la production pilotable d'énergie issue du

gaz naturel doit augmenter rapidement pour combler le déficit. À ce moment, le gaz naturel est prélevé dans le réseau de distribution local plus rapidement que les pipelines ne peuvent l'acheminer, ce qui accroît la nécessité de constituer des stocks tampons.

20. Si les batteries permettant un stockage de courte durée (de l'ordre de quatre heures) peuvent contribuer de façon notable à l'adaptation de la puissance à la hausse, il est essentiel de disposer de centrales au gaz naturel dotées de dispositifs d'atténuation et de moyens de stockage de longue durée pour pouvoir répondre à la demande en période de pointe sans avoir à faire fonctionner des centrales à combustible fossile de type classique. D'autres secteurs reposant sur des infrastructures critiques consomment de l'électricité en grandes quantités. Par exemple, pour recycler l'acier, il est nécessaire d'utiliser des fours à arc, qui consomment d'importantes quantités d'électricité devant être fournies instantanément pendant de courtes périodes de temps (10 à 15 minutes) deux à trois fois par heure. Dans de tels cas, l'électricité ne peut provenir que de moyens de production pilotable. Le manque d'électricité pourrait conduire à des défaillances du matériel.

Des conditions similaires peuvent avoir une incidence sur une grande part de la production d'origine renouvelable

21. Les mesures visant à garantir la fiabilité des réseaux électriques reposent sur le principe du caractère aléatoire et indépendant des défaillances que peuvent connaître les installations de production et de transmission ; c'est la raison d'être des marges de réserve. Cependant, comme expliqué précédemment, les productions éolienne et solaire (et même hydroélectrique) sont soumises à des conditions similaires dans des zones étendues, ce qui n'est pas le cas pour les productions pilotables. Il est fréquent que la production solaire pâtisse pendant plusieurs jours d'une épaisse couverture nuageuse, d'une nappe de brouillard ou de nuages de fumée et que la production éolienne s'arrête faute de vent ; quant à la production hydroélectrique, elle a baissé dans l'ouest des États-Unis pendant plusieurs années et dans toute l'Europe en 2022 en raison de la sécheresse.

22. Comme on l'a vu précédemment, pour assurer la résilience face à de telles conditions sans recourir aux combustibles fossiles, il faudrait disposer d'une gamme de technologies de production neutre en carbone et de solutions permettant de stocker l'énergie sur plusieurs jours, voire semaines, ce qui n'est pas encore possible avec les moyens actuels. Les technologies de stockage physique, telles que le pompage-turbinage et le stockage par air comprimé ou liquide, pourraient contribuer à la production de quantités suffisantes, mais permettraient rarement de stocker l'énergie assez longtemps pour assurer un approvisionnement complet pendant plusieurs jours.

Les services de fiabilité essentiels doivent être fournis

23. Pour assurer la fiabilité et la stabilité d'un réseau électrique synchrone, il ne suffit pas de l'alimenter en énergie. Il faut aussi maintenir la tension et la fréquence à des niveaux précis. Un certain nombre de services de fiabilité essentiels sont fournis naturellement grâce aux machines tournantes des centrales classiques, qui fonctionnent de manière synchronisée grâce à des turbines à vapeur et à gaz ; ces services comprennent notamment l'énergie réactive servant à maintenir la tension, la réponse en fréquence et la souplesse de l'adaptation de la puissance permettant de contrebalancer l'intermittence des sources d'énergie variable.

24. Par contre, les moyens de production d'énergie nécessitant l'emploi d'onduleurs (panneaux photovoltaïques, éoliennes et batteries) ne fournissent pas ces services car ils s'appuient sur l'électronique de puissance pour interagir avec le réseau. Ils posent des problèmes de fiabilité, dont la plupart résultent de difficultés d'intégration et de modélisation. Leur comportement n'est pas toujours bien compris et les réglages des systèmes de suivi du réseau ne sont pas les mêmes que pour les machines synchrones. En 2017, le Royaume-Uni a connu une baisse généralisée de la production éolienne et solaire ; aux États-Unis de nombreux problèmes de fiabilité des réseaux se sont produits en raison du comportement des onduleurs photovoltaïques, le dernier en date étant une perte de 1 700 MW d'énergie solaire qui a entraîné une perte supplémentaire de 800 MW d'énergie produite à partir du gaz naturel dans l'ouest du Texas et a failli conduire l'opérateur du réseau à déclencher des coupures tournantes pour éviter un délestage en sous-fréquence.

Les moyens de production nécessitant l'emploi d'onduleurs doivent faire l'objet de normes internationales, dont l'élaboration n'est pas encore achevée

25. Étant donné que les moyens de production nécessitant l'emploi d'onduleurs occupent de plus en plus de place dans les systèmes électriques, il va être essentiel de disposer de normes internationales régissant leurs performances en matière de soutien aux réseaux et la modélisation de leur comportement. Un certain nombre de normes élaborées par l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)^{4, 5} ont récemment été adoptées, mais des travaux supplémentaires sont nécessaires pour assurer le remplacement le plus complet possible des moyens de production classiques. Jusqu'à ce que ces normes soient en vigueur et que des critères de performance soient établis, les moyens de production nécessitant l'emploi d'onduleurs constitueront, sur le plan opérationnel, de véritables boîtes noires et risqueront de transformer de petites perturbations en problèmes majeurs du point de vue de la fiabilité des réseaux.

Le maintien des actifs classiques nécessaires à la fiabilité des réseaux pourrait ne pas être assuré jusqu'à ce que des technologies de remplacement aient été mises au point et soient opérationnelles

26. La multiplication des sources d'énergie renouvelable accroît l'incertitude quant au potentiel de production et de distribution de l'électricité, en particulier si certaines conditions météorologiques touchent de larges zones pendant une période prolongée. Pour assurer la continuité de l'approvisionnement, il faut employer des solutions de secours ; les batteries ne suffisent cependant pas puisque leur durée de fonctionnement est généralement de 4 à 8 heures. Il faut donc disposer d'actifs de production pilotable ou de solutions de stockage de longue durée pour garantir un degré élevé de certitude et assurer la continuité de l'approvisionnement malgré les incertitudes liées à la variabilité des sources d'énergie renouvelable. Ces actifs sont, à l'heure actuelle, les centrales nucléaires, centrales hydroélectriques, centrales à biomasse et centrales à combustibles fossiles, parfois dotées de systèmes de stockage par volant d'inertie. Il faut qu'il en existe un certain nombre pour que les incertitudes soient gérées et que la continuité de la production et de la distribution d'électricité soit assurée jusqu'à nouvel ordre, ce qui ne veut pas nécessairement dire pour toujours.

27. Cependant, il sera compliqué de maintenir les actifs de production pilotable existants ou de les remplacer par d'autres solutions au cours des 20 prochaines années, pour les raisons suivantes :

a) En raison de l'augmentation rapide de la production d'origine renouvelable, dont les coûts marginaux de production sont nuls, les moyens de production synchrone et pilotable, de même que les services de fiabilité indispensables qui leur sont associés, sont relégués au dernier rang des unités de production ;

b) Le prix de l'ensemble des services de fiabilité fournis par les différents moyens de production n'est correctement fixé ni sur le marché de l'énergie, ni même sur le marché de capacité. En conséquence, peu de sociétés de production d'électricité font les investissements nécessaires pour améliorer leur performance en matière de fiabilité (par exemple, des investissements dans la protection contre les aléas météorologiques (*weatherization*) ou dans la consolidation et la sécurisation de l'approvisionnement en combustible) ;

c) Des questions se posent quant à l'équilibre entre capacités et inclusion des producteurs d'énergie individuels, tels que les propriétaires de petits parcs solaires qui vendent de l'énergie au réseau commun, par exemple par l'intermédiaire de NordPool. Les restrictions et les limites de prix ont une incidence sur l'éventuelle augmentation des investissements privés dans la production d'énergie renouvelable. Par exemple, d'ici à 2030, plus de 100 millions de ménages pourraient équiper leur toit de panneaux solaires photovoltaïques⁶ ;

⁴ Voir : IEEE SA – IEEE 2800-2022, <https://standards.ieee.org/ieee/2800/10453/>.

⁵ Voir : IEEE SA – IEEE 1547-2018, <https://standards.ieee.org/ieee/1547/5915/>.

⁶ Voir : <https://www.iea.org/reports/approximately-100-million-households-rely-on-rooftop-solar-pv-by-2030>.

d) D'autres politiques, qui ne sont pas directement liées à l'approvisionnement en électricité, par exemple de nouvelles règles environnementales imposées aux centrales existantes, dont le respect nécessiterait d'importants investissements en capital, poussent également les investisseurs à mettre hors service des moyens de production synchrone et pilotable, en particulier des centrales au charbon, au pétrole, au gaz naturel et au gaz de pétrole liquéfié, ainsi que des centrales nucléaires.

Les technologies de captage et de stockage du carbone doivent être déployées et développées pour pouvoir être utilisées à grande échelle

28. Les technologies de captage et de stockage du carbone (CSC) doivent être déployées à grande échelle, notamment dans les centrales au gaz naturel et au charbon, afin que la pratique permette de tirer des enseignements et de faire des progrès en ce qui concerne des facteurs clés tels que les taux de captage du CO₂, la souplesse opérationnelle, l'énergie que la centrale hôte doit consacrer au captage, la fiabilité du matériel et des procédés, les coûts de transport et de stockage du CO₂ et les risques potentiels. Il est essentiel de mener à bien des projets de référence pour permettre un déploiement généralisé et économique des technologies de CSC ou de CUSC (captage, utilisation et stockage), déploiement nécessaire pour que les centrales à combustibles fossiles (avec tous les avantages inhérents qu'elles présentent pour la sécurité énergétique, le fonctionnement des réseaux et la fiabilité des systèmes) puissent jouer un rôle de taille dans des systèmes énergétiques à zéro émission nette.

III. Recommandations à l'intention des États membres et résultats escomptés

29. Les points qui précèdent ont permis de formuler les recommandations ci-après à l'intention des États membres de la CEE en ce qui concerne des principes communs devant permettre d'assurer la fiabilité de l'approvisionnement en électricité lors de la transition vers des systèmes à émissions nettes nulles.

a) Les États membres devraient supprimer les contraintes inutiles. Il est extrêmement difficile de parvenir à des réseaux électriques décarbonés, résilients et étendus et il faut donc concentrer les efforts sur les résultats qui comptent vraiment, à savoir la réduction des émissions de CO₂, la sécurité de l'approvisionnement et le coût de l'électricité pour les usagers, sachant qu'il y a d'importantes différences de méthodes au sein de la CEE mais compte tenu de principes communs ;

b) Les États membres devraient évaluer les actifs de production en se fondant sur des indicateurs autres que le prix de l'énergie par MWh et même que leur contribution à l'équilibrage en temps réel entre l'offre et la demande. Dans des situations où la résilience est mise à l'épreuve (par exemple en cas de conditions météorologiques extrêmes ou de conflit), il convient de veiller à ce que la réponse en fréquence des réseaux, leur énergie réactive et leur capacité d'adaptation de la puissance correspondent aux paramètres définis. Il faut également tenir compte du fait qu'une tarification basée uniquement sur la production d'énergie (production de MWh) ne tient pas compte d'aspects clés des services de fiabilité des centrales électriques, essentiels à un fonctionnement stable et fiable des réseaux :

i) Les tarifs qui ne tiennent compte que de l'énergie produite (*energy-only*) ne couvrent pas tous les services fournis (et requis) pour le fonctionnement des réseaux ;

ii) Il est de toute évidence nécessaire de prévoir de nouvelles sources de revenus, structures de tarification ou règles pour garantir la fourniture de l'ensemble des services de fiabilité nécessaires à l'exploitation des réseaux électriques à courant alternatif ;

c) Les États membres devraient déterminer quels sont, à l'heure actuelle, les actifs stratégiques essentiels au fonctionnement stable et fiable des réseaux et prévoir de ne les mettre hors service qu'une fois que les services qu'ils fournissent auront été remplacés de façon satisfaisante ou qu'il sera prouvé qu'ils ne sont plus nécessaires, notamment dans la perspective de la multiplication des sources d'approvisionnement en électricité liée à l'électrification plus large de l'économie ;

d) Les États membres devraient continuer à encourager le déploiement rapide des technologies de production d'origine renouvelable, de renforcement de l'efficacité énergétique et de réduction de la demande, et utiliser au maximum les ressources renouvelables et les technologies à émissions faibles ou nulles (notamment le nucléaire, dans le respect des objectifs nationaux et des ambitions en matière de développement) afin de réduire l'empreinte carbone du secteur ;

e) Les États membres devraient encourager le développement et le déploiement de solutions permettant de stocker l'énergie pendant de longues périodes (plusieurs jours à plusieurs semaines) ;

f) Étant donné qu'il est difficile d'imaginer que les réseaux électriques puissent fonctionner de manière fiable sans qu'une partie de la production d'énergie soit produite à la demande en cas d'urgence et que cette production sera très probablement d'origine fossile, il est essentiel que les États membres s'attellent à la mise au point de technologies de captage direct du CO₂ de l'air avant stockage et de CUSC à la source. Le captage technique du CO₂ émis dans l'atmosphère et son stockage permanent et sûr sont sans doute le moyen le moins coûteux et le plus souple de produire de l'électricité de source fossile de façon localisée et ponctuelle avec un bilan carbone nul ;

g) Il est recommandé aux États membres de tenir compte du rôle important que peuvent encore jouer les combustibles fossiles (par exemple le gaz naturel), non seulement pour la production d'électricité en cas d'urgence, mais aussi pour la production de grandes quantités d'énergie sur de brèves périodes pour les usagers finaux, à court et à moyen terme, sans création de capacités de production et de transmission supplémentaires considérables qui ne seraient utilisées que rarement et augmenteraient la redondance⁷. Ainsi, pour le chauffage des locaux, des combustibles peuvent être utilisés à titre complémentaire afin d'améliorer la performance des pompes à chaleur en cas de températures ambiantes extrêmes et de faible production d'origine renouvelable ; dans ces circonstances, la combustion locale directe pour la production de chaleur peut à la fois être plus efficace et réduire la demande de production et de transmission d'électricité, même compte tenu de la nécessité d'utiliser des systèmes de captage direct du CO₂ de l'air avant stockage afin de capter les émissions produites pour parvenir à une exploitation neutre en carbone ;

h) Les États membres devraient préparer la transition vers la neutralité carbone au stade de l'investissement en déterminant quels actifs pourront jouer un rôle dans les futurs réseaux neutres en carbone (par exemple, apporter de la souplesse aux nouvelles capacités de production d'origine fossile, les doter de systèmes de CSC ou créer les conditions qui permettront de les doter de tels systèmes). Il leur est également recommandé d'encourager la mise au point de moyens permettant de stocker de grandes quantités d'énergie sur une longue durée pour que les réseaux puissent fonctionner sans moyens de secours alimentés aux énergies fossiles, ou presque ;

i) Les États membres devraient, avec la participation d'ingénieurs, mettre au point des normes communes internationales régissant l'exploitation fiable des moyens de production nécessitant l'emploi d'onduleurs, qui fourniront sans aucun doute la majorité de l'énergie des réseaux ;

⁷ Dans le document ECE/ENERGY/GE.5/2023/5 (<https://unece.org/sed/documents/2022/09/post-session-documents/final-report-thirty-first-session-committee>), la redondance est définie comme une capacité de réserve, par exemple des composants, des actifs ou des fonctions dédoublés, qui renforce la fiabilité d'un système et permet d'éviter les perturbations. Dans le secteur de l'énergie, la redondance peut prendre la forme de générateurs de secours locaux ou de systèmes de stockage, d'une capacité inactive au sein des réseaux de transmission et de distribution ou d'actifs de production inactifs.

j) Compte tenu des estimations selon lesquelles les villes sont responsables de 75 % des émissions mondiales de CO₂⁸, les États membres devraient renforcer la coopération avec les autorités municipales et les grandes zones urbaines, en s'associant de plus près à leurs plans d'action en faveur de l'énergie durable afin d'encourager les investissements dans la transition vers la neutralité carbone et de garantir la résilience des réseaux énergétiques, tant pour les infrastructures critiques que pour les usagers finaux.

30. L'application de ces recommandations permettra la poursuite des progrès dans la mise en place de réseaux électriques beaucoup plus vastes qui, outre qu'ils produiront de moins en moins de CO₂ pour arriver à terme à la neutralité carbone, continueront de fonctionner de manière fiable et donneront donc aux usagers la confiance dans la sécurité d'approvisionnement et le coût de l'électricité nécessaire pour que l'électricité vienne rapidement remplacer l'utilisation directe d'hydrocarbures. Une grande partie des capacités de production d'origine fossile sera nécessairement maintenue (jusqu'à ce que des avancées soient réalisées en ce qui concerne les technologies de stockage de l'énergie), mais elle sera beaucoup moins importante et ne sera exploitée qu'en cas de besoin, ce qui garantira une réduction substantielle des émissions du secteur. En d'autres termes, on pourrait dire que les systèmes énergétiques seront comme des véhicules électriques hybrides rechargeables, qui fonctionnent principalement à l'électricité mais peuvent aussi rouler à l'essence si nécessaire.

31. Le Groupe d'experts note également que le maintien de certains actifs clefs de production d'origine fossile pourrait, en favorisant la préservation des emplois, aider les populations des régions productrices et permettre une transition plus juste. Même si ces actifs produiront probablement beaucoup moins d'énergie (et donc d'émissions de CO₂), ils continueront à fournir des services de fiabilité de grande valeur.

⁸ Voir : <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/cities/cities-and-climate-change>.