



NUCLÉAIRE ET RENOUVELABLES DES ÉNERGIES COMPLÉMENTAIRES ?

Les réflexions sur l'urgence de « décarboner » les activités humaines – en particulier la production d'énergie – prennent de l'ampleur. Parallèlement, la demande énergétique mondiale ne cesse de croître. La nécessaire complémentarité entre le nucléaire, l'éolien, le solaire, l'hydraulique et la biomasse est en passe de s'imposer comme une évidence. Démonstration.

Vers un mix énergétique équilibré et décarboné? C'est en tout cas ce que l'on peut souhaiter à la lecture des conclusions de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) et du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, sur les différentes projections d'émissions de gaz à effet de serre (GES) d'ici à la fin du siècle. Leur corollaire est en effet jugé irréversible: un réchauffement des températures moyennes de la planète en « *augmentation catastrophique* », ce que confirme le WWF (*World Wide Fund for Nature*) en prélude au sommet Rio + 20 de juin dernier (*voir l'encadré « L'urgence d'une énergie décarbonée »*). Pourtant, s'il est difficile de prétendre réduire la demande énergétique, freiner l'augmentation des émissions de GES est absolument nécessaire.

À la recherche d'un compromis stable

L'inégalité de la répartition des ressources énergétiques engendre des tensions géopolitiques autour de la maîtrise et de la sécurité des approvisionnements. Elle est à ce titre en grande partie responsable de la diversité des mix énergétiques que l'on trouve dans chaque région du monde. Ainsi, en Europe, la France a compensé la perte de son pétrole saharien et sa dépendance aux pays producteurs par le développement du nucléaire; avec ses voisins, elle ambitionne de sécuriser son approvisionnement en gaz naturel par des accords pérennes avec le producteur russe; parallèlement, le Vieux Continent développe à marche forcée une industrie des équipements pour les énergies renouvelables. L'Asie, face à un développement économique phénoménal, attire à elle toutes les technologies, va chercher des ressources

partout dans le monde et fait, pourrait-on dire, feu de tout bois. Chacun essaie d'accéder au compromis le plus stable possible entre ses ressources énergétiques propres, ses besoins à long terme et l'exigence environnementale.

Parallèlement, l'accroissement de la demande mondiale d'électricité – qui devrait presque doubler d'ici à 2035 selon l'AIE –, constitue un défi majeur à relever: celui de garantir l'augmentation politiquement la plus pacifique et économiquement la moins inégalitaire possible des quelque 7 milliards d'individus que nous sommes aujourd'hui, au plus de 9 milliards que nous serons à la moitié du siècle...

Dans ce contexte, plus question d'opposer énergies nucléaire et renouvelables au nom d'improbables stratégies de rupture. Il paraît désormais beaucoup plus productif d'ajouter leurs atouts respectifs. Et ce, d'une

part au profit d'une complémentarité favorisant la « décarbonisation » de la production d'électricité – deuxième solution potentielle pour la réduction de CO₂, après l'efficacité énergétique –, d'autre part au profit d'une réponse concertée pour subvenir aux besoins énergétiques de la planète. Cette complémentarité ouvre d'intéressantes perspectives sur les plans énergétique, stratégique et opérationnel, et concerne aussi bien les responsables politiques que les économistes et les chercheurs. Mais en pratique, comment peut-elle s'exercer?

Complémentarité pour les équipements énergétiques

Les équipements nucléaires peuvent contribuer à améliorer le Bilan Carbone® de la fabrication d'équipements pour énergies renouvelables. Par exemple, en France, ce sont les centrales nucléaires qui fournissent ►►



✓ À Bakersfield (Californie), la centrale solaire thermique à concentration de Kimberlina installée par AREVA Solar fait appel à la technologie des réflecteurs compacts linéaires à miroirs de Fresnel. Une technologie qui permet également d'augmenter la puissance de centrales conventionnelles à gaz ou à charbon réduisant ainsi leurs émissions de CO₂.

L'urgence d'une énergie décarbonnée

En 2010, les émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant de la production d'énergie étaient déjà supérieures de 5,3 % à celles de 2009. Avec une augmentation de la demande d'énergie évaluée à plus de 40 %, une telle tendance, traduite en émissions de CO₂, conduirait en fin de siècle à une élévation de température de plus de 3,5 °C (voire jusqu'à 6 °C), aux conséquences dramatiques : élévation de deux mètres du niveau des mers, déplacements massifs de populations, sécheresses et inondations, impacts négatifs forts sur la santé et la mortalité...

Et les analyses fines, menées par l'AIE pays par pays, sont formelles : 80 % des émissions à l'horizon 2035 sont déjà « verrouillées » par les installations existantes (centrales électriques, bâtiments, usines) du fait de leur durée de vie. C'est dire que non seulement l'urgence est réelle, mais que les marges de manœuvre pour réduire les émissions sont faibles.

► majoritairement l'électricité pour l'industrialisation très énergivore des cellules photovoltaïques au silicium. En Chine, premier producteur mondial de modules photovoltaïques, ce sont des centrales à charbon. Résultat, le contenu CO₂ d'un kWh produit par un module solaire peut varier du simple au double suivant le mix électrique utilisé pour sa fabrication. Sur une durée de vie moyenne de trente ans, le bilan environnemental d'un module fabriqué en France sera d'environ 45 g CO₂/kWh contre près de 115 g CO₂/kWh pour un module chinois. Ce dernier émettra donc sur sa durée de vie globalement plus de CO₂ qu'il n'en évite... La chaîne du photovoltaïque n'est vertueuse que si ses conditions énergétiques de production le sont elles aussi.

Complémentarité pour le réseau électrique

L'équilibre du réseau et son suivi de charge (réglage de la production) illustrent l'évidente complémentarité des énergies nucléaire et renouvelables. Avec ses installations de grande puissance (supérieures à 900 MW), un parc nucléaire a la capacité d'assurer en permanence une production de base en électricité de qualité (stabilité de fréquence et de tension). Par comparaison, une éolienne « classique » produit en moyenne 2 MW, ce qui donne la mesure du nombre de mâts qu'il faudrait implanter pour remplacer ne serait-ce qu'une seule centrale ! En revanche, le nucléaire présente une inertie trop importante pour s'adapter aux variations brutales de la demande en cas de pic de consommation. D'où le recours,

mot à mot

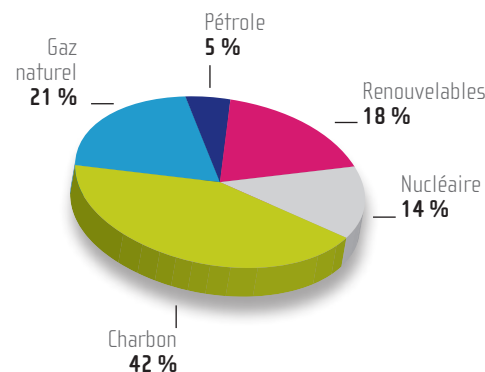
Reformage : réaction chimique qui casse les molécules d'hydrocarbure sous l'action de la chaleur pour en libérer l'hydrogène. Le vaporeformage du gaz naturel est le procédé le plus courant : le gaz naturel est exposé à de la vapeur d'eau très chaude et libère ainsi l'hydrogène qu'il contient et du CO₂.

le plus souvent, aux centrales thermiques alimentées en gaz, charbon ou fioul et qui sont immédiatement opérationnelles, pour la production de pointe. C'est là que peuvent intervenir en complément, et selon leur disponibilité, les énergies renouvelables, particulièrement l'hydraulique, ainsi que l'éolien et, dans une moindre mesure en Europe, le solaire. Mais si le potentiel hydraulique est assez facilement mobilisable, son développement est limité, l'Europe ayant « fait le plein » de ses capacités sur ses lacs et cours d'eau. De son côté, la ressource éolienne, intermittente par nature, et a fortiori le solaire, peuvent faire défaut à l'instant T. En attendant un déploiement à grande échelle de ces deux ressources (variables selon les pays...), la complémentarité

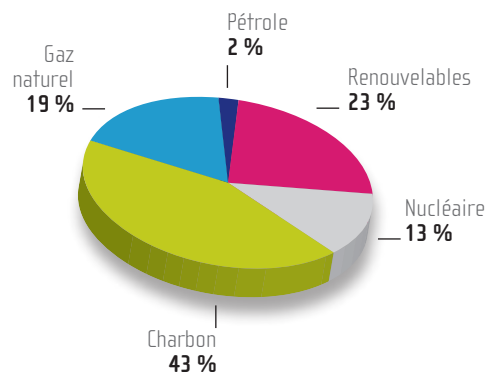
D'OU VIENDRA L'ÉLECTRICITÉ EN 2035 ?

Selon les scénarios de l'AIE, la part des ENR est appelée à croître de manière significative, tandis que celle du nucléaire restera quasiment stable. Mais la forte croissance de la production d'électricité suffira-t-elle à répondre à la demande mondiale d'énergie ? existantes (centrales électriques, bâtiments, usines) du fait de leur durée de vie. C'est dire que non seulement l'urgence est réelle, mais que les marges de manœuvre pour réduire les émissions sont faibles.

Production d'électricité par type de combustible (2008) 18,8 TWh



Production d'électricité par type de combustible (2035) 35,1 TWh



rité nucléaire/renouvelables, pour être pleinement efficace, nécessitera de pouvoir stocker l'énergie d'origine intermittente (voir article page 9 « Stocker ou transformer l'électricité? »). Le déploiement de réseaux intelligents (*smart grids*), permettra en outre d'optimiser en temps réel et à une maille la plus fine possible (agglomération, quartier, site industriel...), l'allocation de la ressource électrique vers les zones de consommation.

La piste de la cogénération

Outre l'électricité, la production d'hydrogène constitue un axe fort de la complémentarité nucléaire/ENR. Véritable « gaz à tout faire », l'hydrogène est largement utilisé dans la fabrication des engrais (ammoniac), dans le raffinage pétrolier, dans les carburants de synthèse⁽¹⁾ extraits du charbon, du méthane ou de la biomasse, dans les transports (pile à combustible), dans la chimie (ammoniac, méthanol, colorants) et la pharmacie, dans le traitement des eaux, et d'une manière générale dans l'industrie (métallurgie, informatique...). Il est aujourd'hui principalement produit à partir de combustibles fossiles, notamment le gaz naturel, par reformage (cf rubrique « mot à mot »), procédé peu coûteux, mais très générateur de CO₂. L'électrolyse de l'eau, qui sépare celle-ci en oxygène et en hydrogène, est au contraire un procédé très propre et qui ne demande que de l'électricité, ce qui rend le nucléaire et les ENR particulièrement aptes à l'emploi de cette technique. La cogénération d'électricité et d'hydrogène à l'échelle industrielle est d'ailleurs l'un des objectifs prometteurs des études sur les réacteurs nucléaires de quatrième génération, à l'horizon 2040. Fonctionnant à haute température, les futurs réacteurs auront en effet la capacité de « casser » directement les molécules d'eau en atomes d'oxygène et d'hydrogène.

Enfin, la chaleur provenant d'un réacteur nucléaire peut également servir à valoriser le CO₂ en produisant du méthanol, un vecteur énergétique multi-usages (carburants, polymères, intermédiaires chimiques...). Une option particulièrement intéressante qui viendrait en alternative ou en complément des techniques de capture et de séquestration⁽²⁾ du CO₂ et limiterait ainsi la présence dans l'atmosphère de ce gaz à effet de serre. ■

(1) Voir Alternatives n° 13, « Le charbon, carburant de demain? ».

(2) Voir Alternatives n° 18, « Capturer et stocker le CO₂ ».

Nucléaire ou renouvelables, des défis incontournables

Les légitimes espoirs portés sur le nucléaire et sur les énergies renouvelables ne doivent pas occulter les hypothèques qui pèsent sur leur développement.

• **Sur le plan économique**, le nucléaire reste l'apanage des économies avancées car c'est une filière exigeante, qui nécessite un engagement et des moyens importants. L'élargissement de la gamme des réacteurs permet cependant d'envisager des installations de petite puissance (environ 600 MW) dans des zones fortement peuplées ou elles pourront notamment contribuer au développement économique et au bien-être, par exemple en facilitant le dessalement de l'eau de mer à grande échelle⁽¹⁾, et réduire ainsi les migrations économiques. Pour les renouvelables, leur compétitivité dépend des financements et des réglementations locales (rarement définitives...) et surtout de l'évolution des prix des énergies fossiles. Si l'éolien s'approche régulièrement d'un prix compétitif, en particulier l'éolien off-shore qui permet d'installer un plus grand nombre d'éoliennes qu'à terre, il

n'en est pas de même pour le solaire photovoltaïque du fait notamment du coût du silicium, principal composant pour la conversion photoélectrique.

Leur déploiement à grande échelle constitue un défi industriel important. À titre d'exemple, et dans des contextes énergétiques différents, l'Allemagne et la France ont décidé de développer chacune des industries nationales puissantes dans les renouvelables. Entre 2010 et 2020, la France compte augmenter sa capacité éolienne installée de 5 660 MW à 25 000 MW en s'appuyant sur un outil de production spécialement créé à cet effet. De son côté, l'Allemagne, qui dispose déjà de 27 200 MW de capacité éolienne, devra développer à marche forcée ses filières dans les renouvelables (et ses importations d'électricité) pour cause de renoncement récent à ses 20 % de production d'électricité d'origine nucléaire...

• **Sur le plan technique**, l'intermittence intrinsèque de l'éolien et du solaire, les deux ENR les plus abondantes (mais inégalement réparties ►►



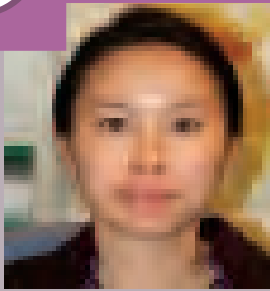
✓ En Allemagne, le parc éolien offshore Alpha Ventus installé par AREVA Wind en 2009 est un site test de l'énergie éolienne en mer du Nord. En 2011, il a produit 270 GWh, a affiché un taux de disponibilité de 97 % et plus de 4 400 heures de fonctionnement en base.



AVIS D'EXPERT

CECILIA TAM

Analyste à l'Energy Technology Division au siège de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), à Paris, Cecilia Tam est spécialiste de l'efficacité énergétique, des énergies renouvelables et des émissions de CO₂.



« La décarbonisation du secteur électrique nécessitera une forte augmentation des parts des énergies renouvelables et du nucléaire. »

Alternatives — Quels sont les avantages d'une économie décarbonée ?

Cecilia Tam : Depuis plusieurs années, l'AIE prône une révolution énergétique fondée sur un large déploiement de technologies à bas carbone, afin de relever le défi du changement climatique. Notre rapport, *The Energy Technology Perspectives 2012 (ETP 2012)*, démontre qu'un avenir à bas carbone est également un puissant outil pour améliorer la sécurité énergétique et le développement économique. Il passe en revue les options possibles en matière de technologies et de combustibles pour la production d'électricité et ses applications dans les secteurs-clés de l'industrie, de la construction et des transports.

Est-il encore temps de modifier les tendances actuelles, et à quel prix ?

C.T. : Le scénario du *statu quo* – ou scénario des 6 °C – montre qu'en 2050, sans une nouvelle politique, les combustibles fossiles satisferont encore la plus grande part des besoins

énergétiques de la planète, au prix d'un doublement des émissions de CO₂ à environ 58 gigatonnes. Par contraste, le scénario des 2 °C identifie une voie à moindre coût pour diviser par deux ces émissions (par rapport aux niveaux de 2005), en ligne avec l'objectif d'une augmentation de 2 à 3 °C de la température à long terme. Dans ce scénario, la demande globale en pétrole, gaz et charbon, serait inférieure à celle d'aujourd'hui, jusqu'à 30 % pour le seul pétrole par rapport à 2009. L'amélioration de l'efficacité énergétique deviendra le « carburant » du futur. Des moyens peu coûteux – dont la plupart existent déjà – pour réduire notre consommation actuelle, offrent un potentiel considérable pour baisser les émissions de CO₂. Il faudrait pour cela dupliquer et étendre au monde entier, pendant les quarante ans à venir, les taux actuels d'efficacité énergétique enregistrés dans les pays de l'OCDE.

Quel serait le mix énergétique idéal pour atteindre cet objectif ?

C.T. : La « décarbonisation » du secteur élec-

trique, deuxième source possible de baisse des émissions, nécessitera une forte augmentation des parts des énergies renouvelables et du nucléaire. Devront s'y ajouter le captage et la séquestration du carbone (CSC) sur les sites industriels alimentés en combustibles fossiles. En 2050, 57 % de la production globale d'électricité devrait provenir des énergies renouvelables, contre 19 % aujourd'hui. Et d'ici là, il faudrait construire chaque année, en moyenne, 25 nouveaux réacteurs nucléaires et 35 centrales à charbon équipées en CSC. Une électricité décarbonée, associée à des réseaux intelligents, offrirait des opportunités substantielles de réduction des émissions de CO₂ grâce à une augmentation de l'électrification, par exemple *via* un accroissement du nombre de véhicules électriques et de pompes à chaleur électriques performantes. Dans le scénario 2 °C, en 2050, plus de la moitié des véhicules légers dans le monde fonctionneront en mode hybride ou au tout-électrique. ■

sur la planète), pose le problème de leur connexion au réseau et du maintien de l'équilibre de ce dernier (voir article « Stocker ou transformer l'électricité? »). En amont, cela suppose la mise en place de systèmes de pilotage intelligents pour le couplage entre installations de production et zones de consommation. En aval, cela nécessite des systèmes de stockage performants afin de réguler l'injection de leur électricité dans le réseau en fonction de la demande. Enfin, l'implantation de fermes éoliennes ou solaires impose la construction de lignes nouvelles robustes et fiables, mais aussi coûteuses (par exemple, les liaisons sous-marines pour l'éolien en mer) et qui doivent être acceptables sur un plan environnemental.

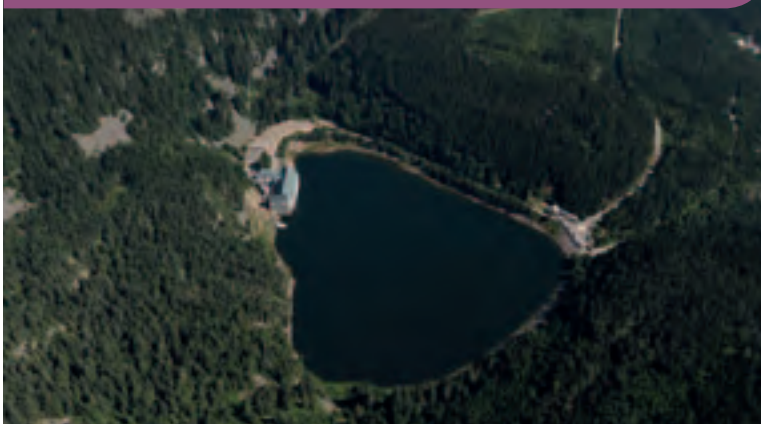
• **Sur le plan environnemental et sociétal**, les inquiétudes suscitées par la gestion des déchets radioactifs constituent l'obstacle récurrent à l'acceptabilité de l'énergie nucléaire. Par ailleurs, les questions de sûreté ravivées par l'accident de Fukushima⁽²⁾ ont récemment trouvé un écho durable dans les opinions publiques et contribué à des revirements stratégiques majeurs de politiques énergétiques. Pour les ENR, cela n'est pas neutre non plus. L'implantation des éoliennes terrestres et marines, leur emprise au sol ou en mer, leur visibilité encombrante, leurs nuisances supposées ou avérées sur l'environnement ne vont pas non plus sans lever de nombreuses oppositions locales selon le principe du NIMBY (« Not In My Back Yard » « Pas dans mon jardin »). Pour la biomasse et l'hydraulique, ce sont les usages des sols et de l'eau qui risquent de perturber les écosystèmes, ou encore les migrations forcées qui peuvent prendre des proportions gigantesques (le barrage des Trois-Gorges, en Chine, a nécessité le déplacement de près de deux millions de personnes). Fermes solaires photovoltaïques ou thermodynamiques posent également le problème de leur emprise au sol (jusqu'à près de 200 hectares). ■

(1) Voir Alternatives n° 23, « Le dessalement pour un monde assoiffé ».

(2) Voir Alternatives n° 26, « Retour sur l'accident de Fukushima ».

Stocker ou transformer l'électricité ?

✓ Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage/Turbinage (STEP) existent depuis plus d'un siècle, et sont apparues d'abord en Italie et en Suisse dans les années 1890. En France, la première du genre a été construite dans les années 30 au bord du Lac Noir dans les Vosges.



compresseur pour produire de l'air comprimé qui est récupéré et stocké en réservoirs souterrains (cavernes) ou de surface (pour de petites installations). Cet air comprimé peut ensuite être extrait à la demande et détendu dans une turbine couplée à un générateur d'électricité.

Capter le soleil

Les centrales solaires thermodynamiques offrent peu de possibilités de stockage de leur énergie. Le rayonnement solaire est concentré et converti en chaleur à haute température qui entraîne une turbine à vapeur et un générateur élec-

trique associé; un cycle où il ne serait guère rentable de ne pas utiliser immédiatement l'électricité produite.

Les centrales photovoltaïques, en revanche, se prêtent davantage au stockage de l'énergie *via* la voie électrochimique selon le principe de la pile à combustible. Mais les capacités des piles en hydrogène, ainsi que les puissances installées (de l'ordre de quelques kilowatts) restent également modestes, sans comparaison avec la production d'électricité, et bientôt d'hydrogène, que permet le nucléaire. ■

Le stockage à grande échelle de l'électricité n'a pas trouvé, jusqu'à ce jour, de solution transposable sous toutes les latitudes. Les moyens techniques sont bien identifiés, mais leur déploiement suppose que le contexte topographique aussi bien que les infrastructures existantes de production d'électricité s'y prêtent tout en restant économiquement acceptables. Reste que la meilleure façon de stocker l'électricité est encore de la transformer en une autre énergie elle-même facilement stockable et qui puisse la restituer ultérieurement.

Maîtriser l'eau

Le transfert d'énergie par pompage-turbinage sur un site de « grand hydraulique » (barrage), reste la solution la plus répandue et la plus efficace. L'eau du bassin inférieur est pompée en heures creuses (lorsque la demande d'électricité et le coût du kWh sont les plus faibles) vers la retenue supérieure pour être relâchée en heures pleines et ainsi actionner les turbines et produire du courant. Mais les sites permettant ce type d'installation sont peu nombreux.

Difficile, par exemple d'appliquer cette solution aux étendues plates et sablonneuses des zones de développement économique sur les rives du golfe Persique.

Maîtriser le vent

Le couplage éolien/grand hydraulique, développé en Allemagne, offre une application prometteuse. C'est le surplus d'électricité des éoliennes non injecté dans le réseau qui assure le pompage en amont. Inversement, lorsque les éoliennes s'avèrent insuffisantes pour répondre à la demande, la centrale hydroélectrique prend le relais. Ce couplage écologiquement optimal permettra de réduire le recours aux énergies fossiles utilisées pour compenser les sautes de vent de l'éolien jusqu'à près de 80 % en période hivernale, et jusqu'à 90 % en été. Là encore, la dépendance à un environnement topographique particulier destine ce mode de transformation de l'énergie à un marché ciblé et relativement peu extensible. Le stockage par air comprimé (CAES pour *Compressed Air Energy Storage*) offre également un bon potentiel, mais il en est encore au stade du développement. L'électricité d'origine éolienne actionne un

UNE « BOX » PHOTOVOLTAÏQUE POUR ALIMENTER UNE COMMUNE

La Greenergy Box™, développée par le CEA, EDF et une filiale d'AREVA, Helion, permet, en période de faible demande d'énergie, de stocker l'hydrogène et l'oxygène obtenus par électrolyse de l'eau et de les recombinaison pour produire de l'électricité lors des pics de consommation.



À l'instar des installations de la plate-forme Myrte déployée en Corse depuis janvier 2012, la Greenergy Box™, qui sera mise en place à la Croix-Valmer (Var), sera connectée à des panneaux photovoltaïques de 35 kW crête situés sur un bâtiment public. Elle servira à compenser une baisse de production ou à prendre le relais du réseau électrique de la commune en cas de coupure.

Vrai ou faux ?

Seules les centrales thermiques à énergie fossile peuvent répondre aux pics de demande d'électricité.

FAUX: La gestion des pics de demande peut se faire par un parc de centrales nucléaires conjugué à la production d'énergies renouvelables, soit en temps réel, soit indirectement via leurs systèmes de stockage d'énergie. Des moyens de pilotage intelligent (dispatching) du plan de tension (la régulation des réseaux) et la mise en place d'un réseau également intelligent (*smart grid*) chez les consommateurs, consolident le dispositif.