

## Vers la neutralité carbone en région à l'horizon 2050 : l'exemple de Provence-Alpes-Côte d'Azur

Alain Burtin\*, Frédéric Marteau\*,  
Patrice Nogues\*, François Turbault\*

@ 71930

*La montée en puissance des énergies renouvelables locales et le renforcement des compétences des régions dans différents domaines en lien avec l'énergie depuis la loi NOTRe de 2015 ont fait de l'avenir énergétique des régions un objet d'attention particulier. Le contexte de transition énergétique rendu nécessaire pour lutter contre le changement climatique et les attentes légitimes de la population de rendre cette transition socialement juste ne font que renforcer cet intérêt pour l'avenir énergétique des régions. Comment viser dans ces régions la neutralité carbone à horizon 2050, tout en prenant en compte les attentes de pouvoir d'achat des habitants et de croissance des régions? Comment dans ce contexte valoriser au mieux les ressources énergétiques locales? Quelles seront les conséquences en particulier sur le système électrique des régions? Tentons d'éclairer ces questions en les illustrant sur la région Sud, Provence-Alpes-Côte d'Azur.*

### Introduction

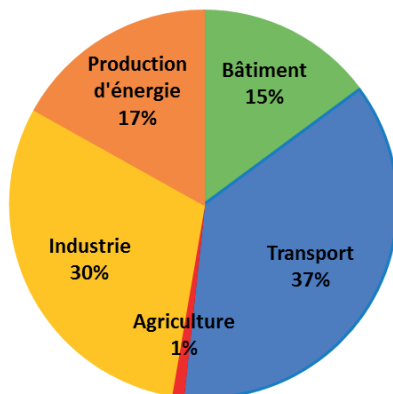
La loi de 2015 portant sur la nouvelle organisation territoriale de la République (NOTRe) a renforcé les compétences des régions dans différents domaines en lien avec l'énergie : habitat, gestion économe de l'espace, intermodalité et développement des transports, maîtrise et valorisation de l'énergie, lutte contre le changement climatique... Les régions doivent ainsi élaborer des schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (SRADDET), documents d'orientation constituant l'instrument d'expression de leur ambition politique.

La lutte contre le changement climatique et la réduction des émissions carbone est devenue un enjeu planétaire majeur. La stratégie

nationale bas carbone (SNBC) de 2018 vise ainsi la neutralité carbone en France à horizon 2050. Cet objectif se retrouve également au niveau régional : la région Provence-Alpes-Côte d'Azur a ainsi inscrit début 2018 ses ambitions de neutralité carbone comme l'un des axes majeurs de son plan climat «une COP d'avance», un autre axe fort étant la croissance.

Cet article s'appuie sur un travail de modélisation fin à la maille régionale réalisé par les chercheurs de la R&D de EDF et vise à donner un éclairage sur différentes stratégies énergétiques en région à horizon 2035 et 2050, sous l'angle de la réduction des émissions carbone, tout en prenant en compte le coût global de l'énergie pour les clients et les ambitions de développement des régions. Les émissions de gaz à effet de serre qui ne sont pas liées à des sources énergétiques, notamment dans l'agriculture ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_{20}$ ), ne sont pas traitées dans

\* EDF (cf. biographies p. 79-80).



**Figure 1. Émissions de CO<sub>2</sub> directes et indirectes liées à des sources énergétiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur (2015)**

Source : base de données CIGALE – Observatoire Régional de l'Énergie, du Climat et de l'Air (ORECA) Provence-Alpes-Côte d'Azur / inventaire Air PACA UE, EDF

le présent article. Une illustration des stratégies énergétiques est présentée sur la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Une analyse particulière du système électrique de cette région et de la valorisation du potentiel local de renouvelables électriques est également réalisée dans le contexte du marché de l'électricité en France et en Europe.

### **1. Des émissions liées à des sources énergétiques concentrées sur peu d'usages**

Avant de savoir comment réduire les émissions de carbone liées à des sources énergétiques, commençons par définir ce que sont ces émissions et comment elles se répartissent entre les différents secteurs et usages.

Les émissions liées à des sources énergétiques sont causées par la décomposition chimique de vecteurs énergétiques carbonés, principalement le charbon, le pétrole et le méthane. Ces réactions chimiques peuvent être énergétiques (moteur, système de chauffage...) ou liées à un process industriel (comme la désoxydation du fer à l'aide de charbon dans l'industrie, un process fortement émetteur de carbone). Il existe également des

émissions de gaz à effet de serre qui ne sont pas liées à des sources énergétiques, principalement dans l'agriculture (en premier la fermentation entérique des animaux puis la décomposition des engrais...) et l'industrie (décarbonatation pour le ciment, décomposition des déchets...), émissions qui sortent du cadre du présent article. À la maille de la France, en 2015, les émissions non énergétiques (principalement du méthane lié aux procédés de fermentation, et protoxyde d'azote lié à la fertilisation azotée) représentent 76 MteqCO<sub>2</sub> pour l'agriculture et 17 MteqCO<sub>2</sub> pour les déchets, sur environ 420 MteqCO<sub>2</sub> pour l'ensemble des émissions tous secteurs. Elles doivent être considérées dans une perspective de neutralité carbone.

Les émissions liées à des sources énergétiques sont fortement concentrées sur relativement peu d'usages, avec des spécificités liées à chaque région :

- Le transport est un secteur très émetteur dans toutes les régions, avec des émissions quasi exclusivement causées par les véhicules thermiques.
- Le bâtiment est également très émetteur, les émissions causées très majoritairement par le chauffage fioul et gaz dépendant cependant fortement du climat de la région, de

## Vers la neutralité carbone en région à l'horizon 2050 : l'exemple de Provence-Alpes-Côte d'Azur

la qualité du bâti et des modes de chauffage locaux. Ainsi, en Provence-Alpes-Côte d'Azur, les émissions du bâtiment représentent moins de 2/3 de la moyenne nationale, à la fois à cause du climat, mais également de la part importante du chauffage électrique moins émetteur que le fioul et le gaz (réseaux de gaz uniquement dans les grandes agglomérations côtières et leur périphérie), et d'une forte utilisation du bois dans l'arrière-pays.

- Les émissions énergétiques de l'agriculture sont dans toutes les régions relativement faibles, particulièrement en Provence-Alpes-Côte d'Azur, région peu agricole.

- Les émissions liées à des sources énergétiques de l'industrie et de la production d'énergie sont très différentes d'une région à l'autre, liées à la présence ou non de 4 secteurs totalisant une grande part des émissions : la fabrication de métaux, la chimie, la production d'électricité et le raffinage. Ainsi, les émissions de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur sont très importantes, car elle possède ces 4 types d'industries : la sidérurgie (8 Mt de CO<sub>2</sub> en 2015), la chimie (3,5 Mt CO<sub>2</sub>), des centrales électriques thermiques (3,5 Mt CO<sub>2</sub>) et du raffinage (3 Mt CO<sub>2</sub>).

### 2. Quels leviers pour décarboner ?

Il existe 3 types d'actions pour décarboner l'économie :

- décarboner les vecteurs énergétiques (combustibles et carburants liquides, gaz, électricité, chaleur, H<sub>2</sub>) en remplaçant l'utilisation d'énergies primaires fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) par des sources décarbonées,

- réduire la consommation d'énergie par la mise en œuvre de technologies énergétiquement plus efficaces (isolation, amélioration des rendements des moteurs...), et par l'adoption de comportements plus sobres en énergie (report modal, covoiturage, température de consigne dans les bâtiments...),

- substituer, pour un usage donné, l'utilisation d'un vecteur énergétique carboné par un vecteur énergétique moins carboné (exemple : remplacement d'une chaudière fioul par une chaudière biomasse).

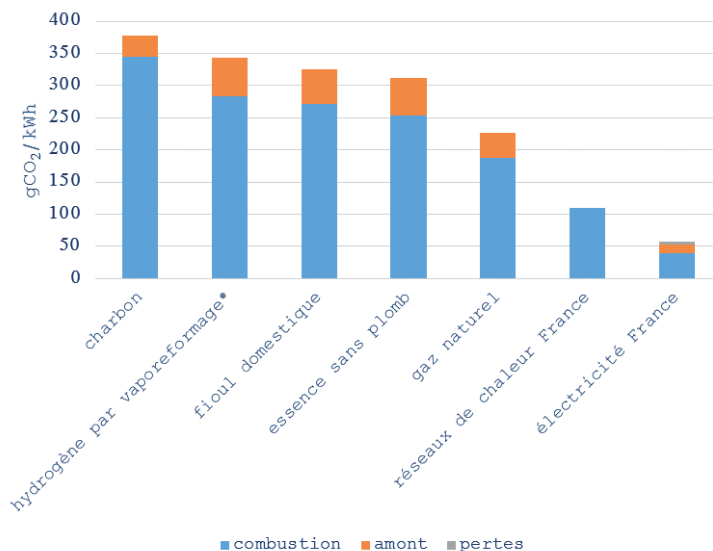
### 2.1. Une décarbonation complexe et limitée pour les vecteurs énergétiques liquide et gazeux, déjà en bonne voie pour l'électricité, accessible pour l'hydrogène et la chaleur

Les émissions énergétiques actuelles proviennent de l'utilisation de vecteurs énergétiques primaires carbonés (charbon, pétrole, méthane). Les facteurs d'émissions de ces vecteurs énergétiques, qui dépendent de la quantité de carbone présente dans ces différents vecteurs, sont dans tous les cas importants (plus de 200 g CO<sub>2</sub>/kWh pour le méthane, plus de 300 g pour le pétrole et près de 400 g pour le charbon).

Les énergies primaires fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) ont pris une place prépondérante dans tous les secteurs de l'économie du fait de leurs qualités : densité énergétique, possibilité de stockage, disponibilité. L'objectif de neutralité carbone nécessite de réduire drastiquement le recours à ces énergies. Pour cela, l'idéal serait de disposer d'énergies décarbonées qui s'utilisent de la même façon : des combustibles solides décarbonés (pour remplacer le charbon), des combustibles et carburants liquides décarbonés (pour remplacer les produits pétroliers) et du gaz décarboné (pour remplacer le gaz naturel fossile). C'est l'approche suivie actuellement pour les carburants contenant une part d'éthanol.

Les enjeux à explorer concernant la décarbonation de ces vecteurs énergétiques sont les suivants : quels sont les potentiels de décarbonation de chacun des vecteurs ? Quelles sont les conditions, les incertitudes et les limites (techniques, économiques, sociétales) quant à la mobilisation de ces potentiels ?

Le potentiel de développement des biocarburants est limité sans amélioration du ratio technico économique et, selon l'ADEME [ADEME 1], le potentiel du biométhane en 2050 est de l'ordre de 20 % de la consommation actuelle de la France, avec une hypothèse de mobilisation importante de la biomasse.



**Figure 2. Facteurs d'émissions actuels de différents vecteurs énergétiques**

Source : Base Carbone ADEME 2019 et SNCU 2018

\* rendement : 66 %

Le biométhane est principalement obtenu par méthanisation, en premier lieu par dégradation de la matière organique provenant de l'agriculture, des biodéchets, des boues d'épuration, des coproduits de l'industrie. Ce chiffre de 20 % de biométhane est donc à nuancer par région : pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, faiblement agricole, ce chiffre est en réalité plutôt de l'ordre de 5 % [HELIANTE].

Le recours à la méthanation (fabrication de méthane à partir de CO<sub>2</sub> et d'hydrogène, lui-même fabriqué bien entendu de façon décarbonée pour que l'on puisse parler de biométhane) peut permettre d'augmenter le pourcentage de biométhane mais pose la question de la source de carbone pour reconstituer le méthane et du coût d'un tel scénario. Et les coûts de production de ce gaz resteront durablement élevés [ADEME 2].

Étant donné le coût et le potentiel limité de décarbonation du méthane, dans une perspective de décarbonation profonde de l'économie, celui-ci devrait être réservé aux usages actuels qui ne seront pas substituables d'ici 2050 ou aux usages du pétrole difficilement

substituables par un autre vecteur que le méthane à cet horizon.

L'électricité est en grande partie déjà décarbonée en France avec une intensité carbone en 2018 de l'ordre de 1/6 de la moyenne des pays européens, grâce à son mix nucléaire, hydraulique, éolien et photovoltaïque [OIE].

La grande majorité des émissions actuelles du système électrique français provient des centrales thermiques au charbon et au gaz. L'objectif de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) est une division par 10 de l'intensité carbone de l'électricité en 2050 par rapport à 2015, en priorité par arrêt de l'utilisation du charbon et moindre recours aux centrales thermiques gaz. Une hypothèse plus conservatrice d'une division par 4 des émissions a été retenue dans les stratégies testées dans cet article. Les objectifs de la SNBC vont donc se traduire à l'échelle de chaque région par une baisse des émissions indirectes liées aux usages de l'électricité et une baisse des émissions directes dues à la production d'électricité, particulièrement en Provence-Alpes-Côte d'Azur qui abrite

## Vers la neutralité carbone en région à l'horizon 2050 : l'exemple de Provence-Alpes-Côte d'Azur

plusieurs centrales thermiques à flamme et dont les émissions actuelles de la production d'électricité sont importantes (Figure 1). On notera que la méthode retenue à la maille régionale dans notre étude conduit à effectuer un double comptage des émissions du secteur électrique à la maille France : le contenu CO<sub>2</sub> des usages de l'électricité à la maille régionale se voit affecter le contenu du mix français (émissions indirectes de la région) afin d'évaluer la stratégie territoriale de développement des usages de l'électricité en conformité avec la politique nationale de développement du mix électrique; les émissions directes des centrales électriques de la région sont comptabilisées dans le bilan CO<sub>2</sub> de la région, mais optimisées dans le cadre de l'optimisation du mix français.

Les réseaux de chaleur existants sont en voie de décarbonation en France avec une baisse des émissions de 45 % en 11 ans, pour aboutir à 116 g/kWh en 2017 en France [SNCU] et 89 g/kWh en Provence-Alpes-Côte d'Azur. En dix ans, les énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) sont passées en France de 27 % à 56 % des énergies utilisées par les réseaux de chaleur : chaufferies ou cogénération bois, combustibles solides de récupération (CSR), géothermie, pompes à chaleur (PAC), solaire thermique... Le couplage notamment de sources locales (géothermie, eau de mer en Provence-Alpes-Côte d'Azur, eaux grises, chaleur solaire...) à des PAC dans les nouveaux quartiers est une solution pertinente à la fois pour décarboner et sur le plan énergétique. Ces solutions déployées à l'échelle d'un réseau de chaleur permettent des gains d'échelle appréciables, mais nécessitent le soutien de toutes les parties prenantes locales, car les investissements initiaux sont en général très importants.

L'hydrogène est très majoritairement produit en France par vaporeformage du méthane d'origine fossile (séparation du CO<sub>2</sub> et de l'hydrogène dans la molécule de méthane), un processus très émetteur. 1 kg d'hydrogène obtenu par vaporeformage émet ainsi plus de 10 kg de CO<sub>2</sub>. Il est possible de décarboner

la production d'hydrogène par l'électrolyse de l'eau à condition qu'il soit obtenu à partir d'un mix électrique décarboné, comme en France. Le coût en est par contre très élevé. Le vaporeformage du biométhane ne semble pas une voie pertinente, cet usage venant en conflit avec l'utilisation du biométhane pour décarboner les usages gaz du bâtiment et de l'industrie difficilement substituables à horizon 2050.

La filière hydrogène électrolytique doit encore progresser vers la maturité, car le coût de l'électrolyse est aujourd'hui beaucoup plus élevé que le vaporeformage. Le développement actuel de nombreux démonstrateurs, comme en Provence-Alpes-Côte d'Azur, vise à évaluer la faisabilité industrielle de cet objectif. Les perspectives les plus prometteuses de développement de l'hydrogène électrolytique à moyen terme concernent d'abord la décarbonation des usages industriels de l'hydrogène (0,9 Mt d'hydrogène sont produits chaque année, émettant 11 Mt de CO<sub>2</sub>). Le développement de l'hydrogène comme vecteur énergétique présente par ailleurs un intérêt pour certains domaines, par exemple les lignes de train non électrifiées ou le transport maritime.

### **2.2. Des gains d'efficacité énergétique tendanciellement attendus dans l'industrie, des ruptures potentielles techniquement envisageables à long terme**

La neutralité carbone s'annonce particulièrement exigeante dans le secteur de l'industrie, les industriels prenant leurs décisions sur des bases économiques et financières strictes dans un contexte de concurrence internationale et les installations les plus émettrices (hauts fourneaux, vapocraqueurs...) étant très fortement capitalistiques, ce qui limite les transformations de process à moyen terme.

Cependant, sous la pression concurrentielle, les consommations et émissions de l'industrie sont en baisse depuis les années 1970 en France, notamment du fait des investissements réalisés pour diminuer la consommation

d'énergie et augmenter la compétitivité, et plus particulièrement pour la chimie et la sidérurgie [SOES]. Dans ce contexte, un gain en efficacité énergétique sur un horizon moyen terme de l'ordre de 1 % par an semble une hypothèse réaliste à un horizon de moyen terme sans rupture technologique. Tabler sur des objectifs de baisse d'émissions trop stricts risquerait d'aboutir à la fermeture de grands sites industriels en France pour délocaliser la production dans un pays moins regardant en termes d'émissions, ce qui non seulement aggraverait les émissions au niveau planétaire, mais serait également une catastrophe économique pour la région concernée. Des ruptures technologiques à horizon 2050 dans les secteurs les plus émetteurs (sidérurgie, chimie) peuvent fournir un relais de décarbonation de ces industries, le recours à l'électrolyse en substitution du charbon dans la sidérurgie pouvant notamment permettre de réduire drastiquement les émissions.

### 2.3. La décarbonation accrue du chauffage, premier levier dans le bâtiment

Les émissions du bâtiment sont centrées sur les usages thermiques (chauffage et eau chaude sanitaire, climatisation). En Provence-Alpes-Côte d'Azur, ces émissions représentent ainsi 5 Mt CO<sub>2</sub> sur 6 au total, 4 Mt provenant en particulier des chauffages fioul et gaz.

Dans les bâtiments existants, le chauffage fioul le plus émetteur pourrait théoriquement être remplacé par du chauffage gaz moins émetteur. Il faut cependant noter que les substitutions possibles du fioul vers le gaz ont en général déjà été réalisées et que la majorité des logements chauffés au fioul sont dans des zones non desservies par le gaz (dans l'arrière-pays en Provence-Alpes-Côte d'Azur). De plus, passer du fioul au gaz ne décarbone que partiellement (Figure 2). Ainsi, une telle solution tue le gisement potentiel de décarbonation supplémentaire, car un chauffage remplacé aujourd'hui ne sera pas remplacé à nouveau avant de nombreuses années. Rappelons enfin que le potentiel de décarbonation du vecteur gaz est limité, et qu'il faut

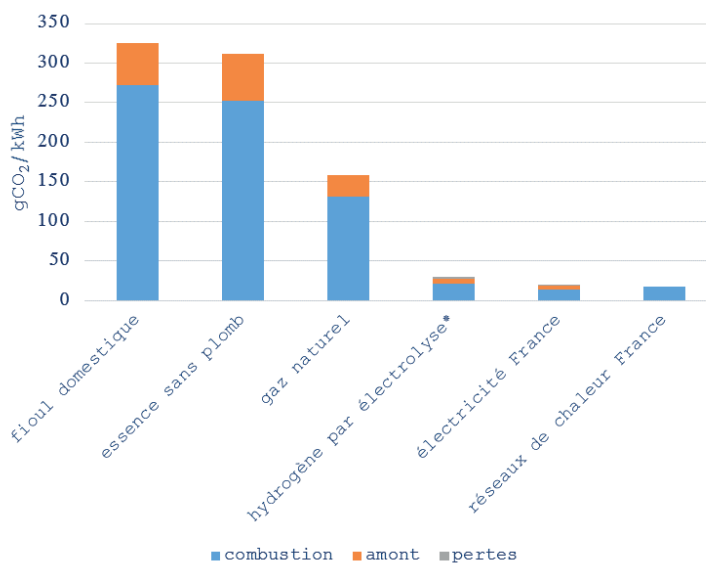


Figure 3. Facteurs d'émissions 2050 de différents vecteurs énergétiques retenus dans l'étude

\* rendement : 66%

## Vers la neutralité carbone en région à l'horizon 2050 : l'exemple de Provence-Alpes-Côte d'Azur

allouer de préférence ce gaz aux usages pour lesquels il n'y a pas d'alternative.

Les logements construits entre aujourd'hui et 2050, même s'ils émettent moins que les logements existants du fait d'une meilleure isolation, doivent être pris en considération. En effet, ils représenteront entre 1/4 et 1/3 des logements en région, en fonction de la croissance démographique des régions, la Provence-Alpes-Côte d'Azur se situant à peu près dans la moyenne française en termes de démographie. Comme pour la rénovation, le choix d'un mode de chauffage peu ou pas carboné est primordial dès la construction, car le chauffage d'un logement construit aujourd'hui ne sera pas remplacé avant de nombreuses années et les logements neufs actuels chauffés au gaz émettent 3 à 4 fois plus que l'objectif SNBC 2050 de 3 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an.

Isoler permet de diminuer la consommation et la facture, et d'améliorer le confort. C'est également un levier essentiel pour la maîtrise des émissions de CO<sub>2</sub>, la baisse de consommation s'accompagnant d'une baisse des émissions. Cependant, au delà d'un niveau d'isolation performant, le gain incrémental d'une isolation supplémentaire en termes de baisse de consommation diminue fortement : isoler ne suffit pas à atteindre des objectifs de décarbonation profonds sur l'ensemble du parc de bâtiments (objectif SNBC 3 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an). Isolation et mode de chauffage décarboné sont donc des leviers complémentaires, le changement du mode de chauffage faisant souvent suite en pratique à des mesures d'isolation.

Au vu de la concentration de la consommation énergétique sur les usages thermiques, utiliser un mode de chauffage peu émetteur (PAC, bois, réseau de chaleur décarboné, EnR thermiques) est le principal levier de décarbonation des bâtiments, y compris dans le neuf.

### 2.4. L'accélération du développement du véhicule électrique, principal levier de décarbonation du transport

Les émissions du transport sont pratiquement exclusivement issues des moteurs thermiques.

L'ensemble des leviers disponibles hors mobilité électrique et efficacité énergétique des moteurs thermiques peut permettre de réduire jusqu'à 1/3 des émissions des transports passagers en Provence-Alpes-Côte d'Azur, au prix d'une politique très ambitieuse (- 10 % de déplacements, + 15 % de taux de remplissage, 20 % des déplacements en transports collectifs et 25 % en vélos dans les grands pôles, + 70 % de trains, 100 % de bus électriques dans les grands pôles). La mise en place de plans de déplacement (covoiturage, modes de déplacement alternatifs, transports en commun...) permet également de diminuer la pollution dans les centres-villes. Ces plans permettent enfin aux citoyens de s'approprier la problématique de décarbonation et peuvent se mettre en place progressivement et relativement rapidement.

L'efficacité énergétique des moteurs thermiques (jusqu'à ~ 3 l/100 km pour les véhicules légers) peut permettre de diviser par 2 les émissions du transport, mais ne permettra pas seule d'atteindre un objectif de décarbonation profonde. D'autre part, les limites réglementaires d'émissions des véhicules très ambitieuses au niveau européen à horizon 2020, tirées par l'urgence sur le CO<sub>2</sub>, seront difficilement atteintes sans une accélération du développement de véhicules décarbonés.

La mobilité électrique (incluant la source d'énergie batterie en premier lieu, mais également la source hydrogène) est le principal levier de décarbonation en France, d'autant qu'au fur et à mesure de la pénétration des véhicules électriques, l'impact sur les émissions de l'efficacité énergétique des moteurs thermiques diminue. L'impact du véhicule électrique sur les émissions est double : les véhicules électriques permettent en effet de substituer au pétrole le vecteur

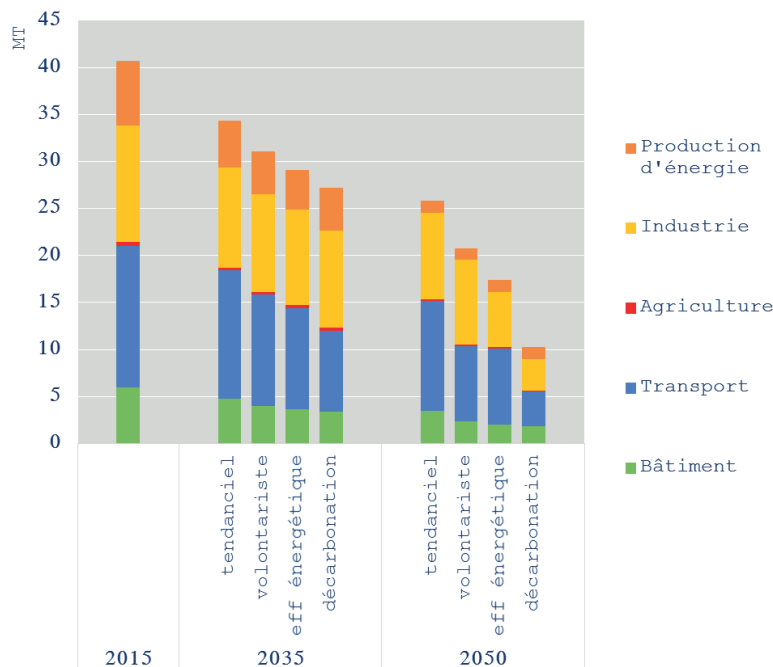


Figure 4. Émissions de CO<sub>2</sub> liées à des sources énergétiques en Provence-Alpes-Côte d'Azur

électrique, fortement décarboné en France, et dans le même temps, de diminuer fortement la consommation finale d'énergie, le rendement du moteur électrique étant supérieur à 80 % contre moins de 30 % pour le moteur thermique.

Pour accompagner ce développement, un plan ambitieux de déploiement de bornes de recharge électrique est nécessaire, dont les principaux challenges sont :

- relier développement sur le domaine public et besoins des usagers aux plans d'aménagement locaux;
- participer au maillage national pour les déplacements longue distance (réseau Corri-Door de points de recharge);
- réaliser des actions de pédagogie sur l'adéquation entre les besoins des usagers et l'autonomie des véhicules pour limiter les besoins en bornes de recharge;
- déployer des solutions spécifiques pour la recharge rapide;
- développer des solutions de *smart-charging* et des interfaces de recharge

bidirectionnelles avec le véhicule pour pouvoir apporter de la flexibilité au système électrique (V2G).

### 3. Quels scénarios énergétiques en région?

#### 3.1. Décarboner, c'est possible!

4 stratégies énergétiques, combinant les mesures d'efficacité énergétique, de substitution des énergies fossiles et de décarbonation des énergies, ont été simulées pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur à 2035 et 2050. Ces simulations reposent sur une modélisation détaillée à la maille régionale des différents secteurs économiques. Ces simulations ne font pas de paris sur des ruptures marquées des comportements qui accélèreraient fortement la baisse attendue des consommations d'énergie, dans l'habitat (par recours à l'habitat collectif et occupation accrue des logements) et dans le transport (par une baisse



## Vers la neutralité carbone en région à l'horizon 2050 : l'exemple de Provence-Alpes-Côte d'Azur

sensible des déplacements et du recours aux voitures particulières).

- La stratégie «tendanciel» mesure l'impact des mesures existantes : la moitié des logements moyennement isolés en 2050, pas de substitutions majeures entre énergies de chauffage, 20 % de véhicules électriques.

- La stratégie «volontariste» évalue un renforcement des mesures existantes, mais sans priorisation entre les mesures et sans véritable rupture : 2/3 des logements correctement isolés en 2050, suppression du chauffage fioul, 50 % de véhicules électriques.

- La stratégie «efficacité énergétique» vise à évaluer le potentiel technique de décarbonation d'une stratégie visant à pousser au maximum le levier d'efficacité énergétique : tous les logements au niveau basse consommation en 2050, des chauffages très efficaces et suppression du fioul, une efficacité maximale des véhicules thermiques mais seulement 30 % de véhicules électriques.

- La stratégie «décarbonation» vise à optimiser le coût de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> en ciblant la combinaison de leviers (efficacité énergétique, substitution entre vecteurs) la plus efficace économiquement : 90 % d'isolation performante, suppression du fioul, des chauffages décarbonés (PAC, bois, réseaux de chaleur) privilégiés lorsque c'est possible, 80 % de véhicules électriques à 2050.

Il est possible d'aboutir dans la stratégie «décarbonation» à une division par plus de 4 des émissions de CO<sub>2</sub> dues aux énergies et de 45 % de la consommation finale en 2050 par rapport à 2015 (Figure 4), sans sobriété forcée et à coût maîtrisé pour la collectivité avec des actions ciblées sur les solutions les plus économiques de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. (En France, les émissions ont baissé de 18 % entre 1990 et 2015. On peut donc estimer à 80 % la réduction entre 1990 et 2050 obtenue avec la stratégie «décarbonation»). Il reste des émissions encore importantes dans le transport en 2050 dans cette stratégie, mais le renouvellement du parc de véhicules permet de les faire baisser au-delà de 2050. Aller plus loin dans la décarbonation du

transport à 2050 tout en maîtrisant les coûts nécessiterait une dynamique internationale très forte sur le sujet, sur laquelle nous n'avons pas voulu faire de paris.

### 3.2. Une décarbonation par l'électrification des usages, pour consommer moins et consommer bas carbone

L'utilisation de l'ensemble des leviers de décarbonation aboutit à une dynamique d'électrification des usages qui place la région sur une trajectoire neutre en carbone. Il ne s'agit là ni d'une particularité de la France, ni d'une vision propre à EDF : l'Agence Internationale de l'Énergie annonce cette hausse du recours à l'électricité directement liée au degré d'ambition de décarbonation [AIE].

Cependant, il est à noter que cette dynamique d'électrification ne s'accompagne pas de hausse significative de la consommation électrique à 2035, deux tendances se compensant en grande partie : plus d'efficacité énergétique d'un côté et substitution de l'électricité aux combustibles fossiles de l'autre, avec une pénétration encore modérée de l'électricité dans les transports. Par contre, la consommation électrique est en hausse à 2050 dans la stratégie «décarbonation» du fait d'une électrification massive des transports, et le recours à l'électrolyse pour la sidérurgie.

Dans cette stratégie, la baisse de la consommation de gaz d'environ 1/3 en 2050 par rapport à la consommation actuelle est proche du scénario énergie climat 2050 France de l'ADEME [ADEME 1].

### 3.3. Une décarbonation à coût maîtrisé dans le résidentiel et le transport

En incluant les coûts de rénovation (isolation, remplacement des appareils de chauffage...) et les gains associés sur les dépenses d'énergie, le coût de la transition énergétique dans le résidentiel de la stratégie tendanciel se monte à 50 M€/an, 200 M€/an pour la stratégie volontariste (soit 4000 € par logement

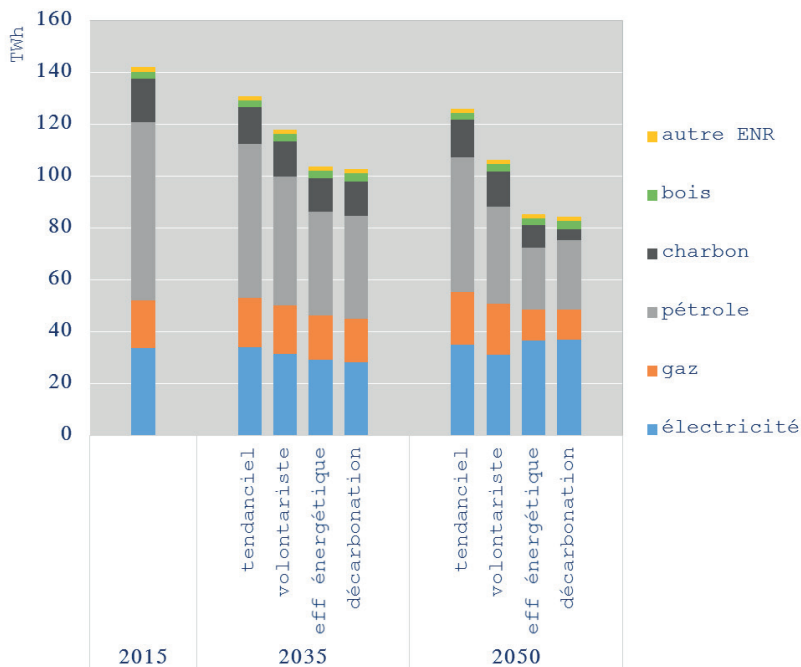


Figure 5. Consommation finale par énergie en Provence-Alpes-Côte d'Azur

renové), 400 M€/an pour la stratégie décarbonation (6500 € par logement renové) et 1,2 milliard/an pour la stratégie efficacité énergétique (plus de 18000 € par logement renové). Cette dernière stratégie s'avère donc difficilement supportable, à la fois pour les particuliers ou les pouvoirs publics, alors que la stratégie décarbonation peut tout à fait se concevoir dans le cadre d'un plan de transition national.

La parité entre coût total de possession du véhicule électrique individuel et du véhicule thermique devrait être atteinte bien avant 2030, même sans subvention pour le véhicule électrique [OPECST]. En partant des chiffres de l'OPECST, il semble même que la parité puisse être atteinte vers 2030 hors taxe sur les énergies. Le développement des bornes de recharges publiques (les bornes de recharge privées sont intégrées au coût de possession du véhicule électrique) est quant à lui estimé entre 20 et 80 milliards d'euros au niveau français [OPECST], soit entre 2,5 et

10 milliards pour une région de la taille de Provence-Alpes-Côte d'Azur, en fonction de la part de recharges rapides et de la baisse du coût des recharges. Il est par contre très difficile d'estimer le coût de développement des infrastructures liées aux transports en commun, aux pistes cyclables...

### 3.4. Un développement ambitieux des énergies locales électriques s'inscrivant dans une approche globale du système électrique

À travers les différents mécanismes de marché actuels, la production d'électricité est optimisée à l'échelle de toute l'Europe. Le réseau interne français et les interconnexions avec l'étranger permettent :

- la solidarité entre les territoires en cas de panne, défaillance, ou tout autre aléa ;
- l'utilisation des moyens de production les moins chers là où ils se situent ;
- l'évacuation de la production renouvelable en surplus et son utilisation aux endroits où elle est moins abondante.

## Vers la neutralité carbone en région à l'horizon 2050 : l'exemple de Provence-Alpes-Côte d'Azur

		Tendanciel		Volontariste		Efficacité énergétique		Décarbonation	
Éolien 2035	terrestre	0,5 GW		0,5 GW		1,2 GW		0,5 GW	
	flottant	0,7 GW		1,5 GW		1,5 GW		1,5 GW	
PV 2035	sol	1,6 GW	+ 100 MW/an	3 GW	+ 200 MW/an	4 GW	+ 400 MW/an	4 GW	+ 300 MW/an
	tertiaire	0,7 GW		1,3 GW		3 GW		1,6 GW	
	résidentiel	0,8 GW		0,8 GW		1,6 GW		1,2 GW	
<b>Production EnR locale/ consommation électrique régionale 2035</b>		42 %		59 %		83 %		72 %	

**Tableau 1. Développement projeté des EnR électriques en Provence-Alpes-Côte d'Azur**

L'insertion des EnR électriques se conçoit dans cette logique d'optimisation de la production à l'échelle européenne. L'ensemble du système électrique européen 2035 a donc été modélisé pour analyser les conséquences de ces stratégies de développement des EnR à l'échelle d'une région. Les hypothèses sur le système électrique hors région sont issues de l'étude publique «60 % EnR» d'EDF R&D [EDF], fondée sur un scénario de déploiement des EnR à horizon 2030-2035 de l'Union européenne.

En Provence-Alpes-Côte d'Azur, 16 TWh environ d'EnR sont utilisés actuellement : quasiment l'ensemble du potentiel hydraulique et une part significative du bois-énergie, en majorité pour des usages thermiques. De bonnes conditions d'ensoleillement et de vent, mais également de nombreuses contraintes d'occupation de l'espace, permettent d'aboutir à un potentiel EnR pouvant servir à la production électrique de l'ordre de 47 TWh en 2017, en plus de ces 16 TWh. Le potentiel photovoltaïque (PV) sol en Provence-Alpes-Côte d'Azur est significatif mais contraint par la disponibilité du foncier dans la région (potentiel accessible de l'ordre de 6 TWh). Le potentiel PV toiture est plus important (environ 25 TWh), mais plus cher, notamment pour le résidentiel. Il apparaîtra donc plus tard. Le potentiel

éolien terrestre est limité (environ 3 TWh) du fait d'un grand nombre de contraintes sur le territoire de la région, celui éolien en mer flottant de 10 TWh en prenant en compte l'ensemble des contraintes sur l'espace maritime.

À la lumière de ces potentiels et de la baisse prévisible des coûts, il est pertinent de supposer un développement important des EnR électriques dans la région. Ainsi, l'équivalent de plus de 70 % de la consommation électrique locale serait produit par des EnR localement en 2035 dans la stratégie «décarbonation» contre environ 20 % actuellement. Les trajectoires de développement sont à la fois ambitieuses (passage de 100 à 300 MW/an d'insertion de PV), réalistes, cohérentes avec les prévisions du bilan prévisionnel RTE au niveau national et les ambitions actuelles en EnR des autres régions (provenant des SR-CAE) et prennent en compte le potentiel et le coût de chacune des filières (saturation du PV sol le moins cher à développer, développement du PV résidentiel dans une logique d'autoconsommation).

- À horizon 2035, le développement du potentiel EnR de la région, dans les différentes stratégies, diminue la dépendance électrique de la région, mais jusqu'à un certain niveau, car des imports vers la région restent

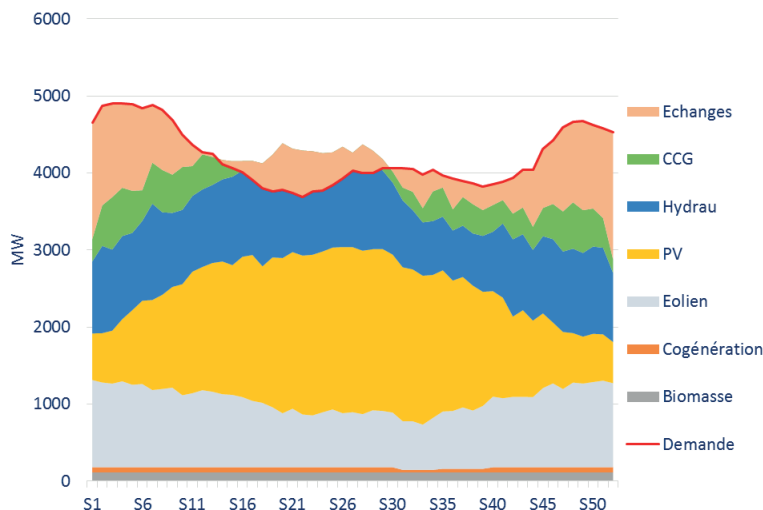


Figure 6. Équilibre journalier production/consommation sur l'année 2035  
Stratégie « Efficacité énergétique »

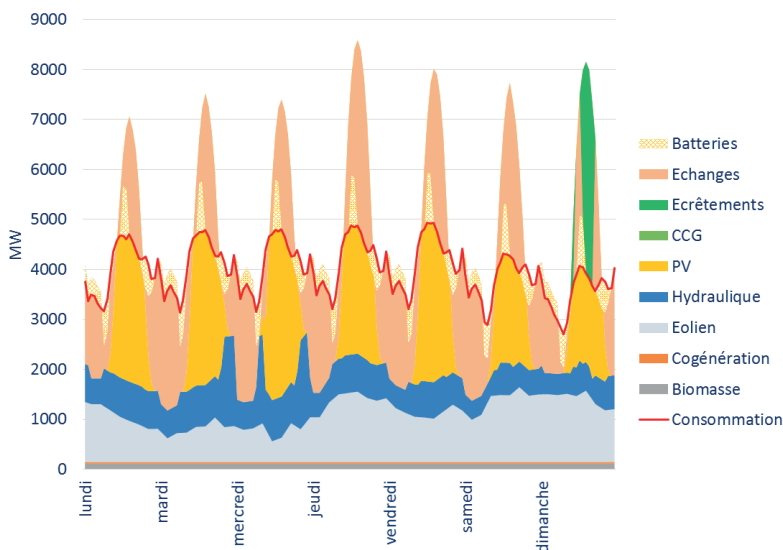


Figure 7. Équilibre horaire production/consommation d'une semaine de juillet 2035  
Stratégie « Efficacité énergétique », année climatique 1985

nécessaires notamment en hiver, quelle que soit la stratégie (Figure 6). Dans les scénarios ambitieux, en période de forte production solaire, les exports d'électricité en dehors de la région deviennent importants parfois aux limites des capacités du système électrique, et

des problèmes de débouchés apparaissent le week-end (Figure 7).

- Au-delà de 2035, il est prématuré de conclure sur la pertinence d'un développement beaucoup plus important de PV : dans le cas d'un développement massif de PV, l'ajout de batteries ou le recours au *vehicle-to-grid*

## Vers la neutralité carbone en région à l'horizon 2050 : l'exemple de Provence-Alpes-Côte d'Azur

ne pourrait pas être suffisant pour empêcher des écarts massifs de production PV. L'opportunité d'un stockage plus long terme des surplus PV dépendra du niveau de maturité et de la compétitivité des technologies de stockage à cet horizon.

Le système électrique reste proche à horizon 2035 du gabarit actuel, l'efficacité énergétique dans les bâtiments diminuant progressivement la sensibilité de la demande d'électricité à la température.

### Conclusion

Il est donc possible de mettre en place en région une trajectoire pertinente en termes d'émissions CO<sub>2</sub>, de consommation énergétique, et de développement des EnR locales. Cette stratégie est ambitieuse car elle nécessite d'activer fortement tous les leviers efficaces pour décarboner : décarbonation des vecteurs énergétiques, électricité (déjà largement décarbonée en France), hydrogène et réseaux de chaleurs, ambitions importantes de rénovation privilégiant des chauffages décarbonés, développement massif du véhicule électrique, efficacité énergétique dans l'industrie conforme aux ambitions des industriels et rupture partielle techniquement envisageable dans les process les plus émissifs d'ici 2050. Elle est cependant réaliste. Elle aboutit en Provence-Alpes-Côte d'Azur à une division par plus de 4 des émissions et de 45 % de la consommation finale en 2050 par rapport à 2015, soit une division par 5 des émissions par rapport à 1990.

Dans le cadre des débats actuels de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) autour de la neutralité carbone, il serait possible d'aller encore plus loin dans la décarbonation en activant plus fortement les leviers, la dynamique générale de décarbonation internationale permettant alors vraisemblablement de maîtriser les coûts d'une telle stratégie. Les avancées techniques dans l'industrie (chimie, sidérurgie) peuvent également améliorer ce résultat à l'horizon

2050. Nous n'avons pas évalué à ce stade ces potentiels par prudence.

Le coût de l'énergie pour les clients reste acceptable dans cette stratégie, car la consommation est maîtrisée, notamment par le développement des usages performants de l'électricité, et les investissements de rénovation ciblent les gestes permettant de décarboner à moindre coût. L'absence de sobriété forcée aboutit de plus à un cadre qui reste attractif pour le développement de l'activité économique et industrielle, et créateur d'emplois. Ce cadre attractif et cette maîtrise des coûts sont essentiels tant la transition énergétique modifie par ailleurs profondément les activités économiques.

Cette stratégie suppose des ruptures majeures par rapport aux pratiques actuelles : la dernière étude de l'ADEME montre ainsi que seulement 5 % des rénovations actuelles de maisons permettent de gagner deux classes DPE [TREM]. Et même avec un objectif 2050, il est important que ces ruptures dans les pratiques s'opèrent dès aujourd'hui : un logement neuf ou qui vient juste d'être rénové ne sera pas rénové à nouveau avant de nombreuses années ; de même, le temps moyen de possession d'un véhicule est entre 10 et 15 ans.

Cette stratégie repose sur un développement des usages performants de l'électricité, pour consommer moins et consommer bas carbone. En effet, l'intensité carbone de l'électricité est faible en France déjà actuellement et appelée à diminuer encore de façon importante. D'autre part, une pompe à chaleur consomme au moins 2 à 3 fois moins d'énergie finale qu'un chauffage fossile, un véhicule électrique 2 à 3 fois moins qu'un moteur thermique. Pour autant, la consommation d'électricité n'augmentera pas significativement d'ici 2035.

En parallèle, un développement ambitieux et plausible de l'éolien et du PV est possible en région à horizon 2035, permettant en Provence-Alpes-Côte d'Azur d'aboutir à une production d'électricité à partir des EnR locales équivalente à 70 % de la consommation

électrique de la région contre 20 % aujourd'hui. Ce développement des énergies locales électriques doit bien entendu s'inscrire dans le contexte du système électrique français et européen en profitant du bénéfice des réseaux interconnectés.

### RÉFÉRENCES

- [ADEME 1] ADEME, «Actualisation du scénario énergie-climat, ADEME 2035-2050», octobre 2017.
- [ADEME 2] ADEME, GRDF, GRTgaz, «La France indépendante en gaz en 2050 — Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050?», janvier 2018.
- [AIE] Agence Internationale de l'Énergie, «World energy outlook 2018», 2018.
- [CAMBRIDGE] Cambridge Econometrics, «Low carbon cars in Europe: a socio economic assessment», février 2018.
- [EDF] EDF R&D, «Analyse technico-économique d'un système électrique européen avec 60 % d'énergies renouvelables», REE, n° 5/2016, 2016.
- [HELIANTE] Heliante, «Potentiel énergétique des sources de méthanisation en PACA», mars 2015.
- [OIE] Observatoire de l'industrie électrique, «Contenu carbone des énergies», fiche pédagogique, février 2019.
- [OPECST] Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, «Les scénarios technologiques permettant d'atteindre l'objectif d'un arrêt de la commercialisation des véhicules thermiques en 2040», rapport 1776, mars 2019.
- [PARISOT] Laurence Parisot, «Plan de programmation des emplois et des compétences», rapport de mission pour les ministères de la Transition écologique, du Travail, de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, février 2019.
- [SNCU] Syndicat national du chauffage urbain et de la climatisation urbaine, «Les chiffres clés 2017 des réseaux de chaleur et de froid», novembre 2018.
- [SOES] Commissariat général au développement durable — service de l'observation et des statistiques, «L'intensité énergétique a baissé dans l'industrie entre 2001 et 2012», chiffres et statistiques 542, juillet 2014.
- [TREMI] ADEME, «Enquête TREMI : Travaux de rénovation énergétique des maisons individuelles, campagne 2017», octobre 2018.