

# Quelques apports de la R&D à l'accélération de la transition énergétique

*Catherine Rivière est directrice générale adjointe de l'IFP Énergies nouvelles<sup>1</sup>.*

## 1 La transition énergétique : une dynamique enclenchée

Plusieurs chapitres de cet ouvrage montrent que le système énergétique mondial est encore aujourd'hui très carboné et que sa transformation vers un système n'émettant pas de gaz à effet de serre prendra un certain nombre d'années, certainement de décennies. Mais il est cependant clair qu'aujourd'hui, même après la crise sanitaire et la crise économique que nous vivons, la transition énergétique est enclenchée : un élément clé a été la

signature de l'Accord de Paris en décembre 2015.

Ce chapitre illustre la dynamique dans laquelle cette transition énergétique s'inscrit autour de quatre constats. Le premier de ces constats est qu'aujourd'hui, 38 pays sont engagés dans l'objectif de neutralité carbone : l'Europe s'y est engagée pour 2050, la France avec son plan climat s'y est engagée en 2017, le Japon plus récemment. La Chine, elle aussi engagée, vise une neutralité carbone à l'échéance 2060. Avec l'élection de Joe Biden à la présidence américaine, les États-Unis sont revenus dans l'Accord de Paris. Sur la carte de la **Figure 1** à gauche, apparaissent en bleu

1. [www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr)

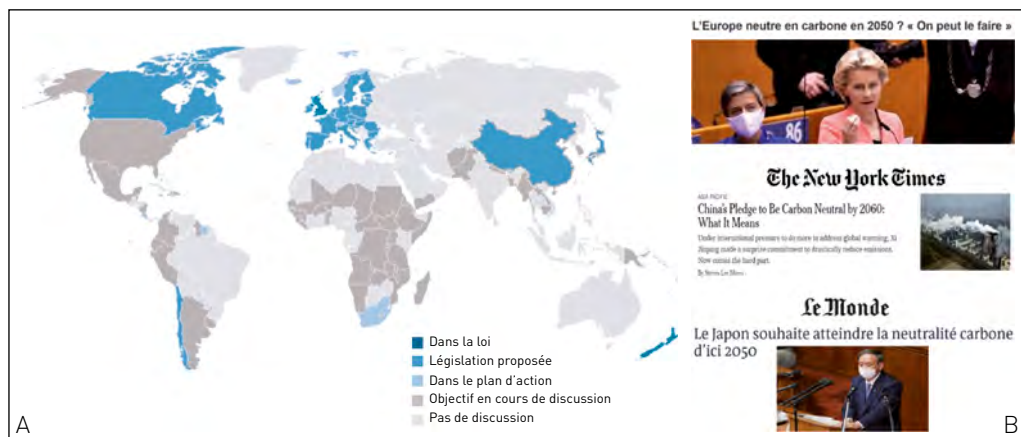


Figure 1

La neutralité carbone : A) Carte des pays engagés dans la neutralité carbone ; B) Articles de la presse mondiale.  
Source : carte : © IFPEN.

les pays ayant pris des engagements fermes et en gris les pays qui sont en discussion pour prendre de tels engagements. La totalité de ces pays représente 64 % des émissions de CO<sub>2</sub> sur la planète : cela démontre que cet engagement est bien une réalité.

Autre constat, en regardant l'évolution de la part des énergies renouvelables dans le mix électrique mondial (Figure 2), on peut constater que depuis dix ans celle-ci (en vert) augmente. Elles sont le second fournisseur d'électricité. Si on prolonge les tendances, et avec l'érosion du charbon, les énergies renouvelables pourraient devenir le premier fournisseur d'électricité de la décennie en cours. 2020, avec la crise Covid, ne semble pas remettre en cause ces tendances puisqu'il apparaît dans le dernier bilan de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le WEO (« *World Energy*

*Outlook* ») de 2020, que de toutes les sources primaires d'énergie, les sources d'énergie renouvelables sont les seules à avoir continué à croître en 2020.

Le troisième constat factuel, également cité dans d'autres chapitres de cet ouvrage, est le déploiement des véhicules électriques (Figure 3). L'électrification est une voie pour décarboner le secteur du transport concernant les véhicules de particuliers. C'est un secteur que l'on pensait très difficile à décarboner du fait de la très grande dépendance des carburants avec le pétrole. Pourtant en 2020, et malgré la crise sanitaire et économique, près de 10 millions de véhicules électriques ont été vendus dans le monde.

Le dernier constat est l'évolution toujours croissante au niveau mondial des investissements dans la transition énergétique malgré le contexte

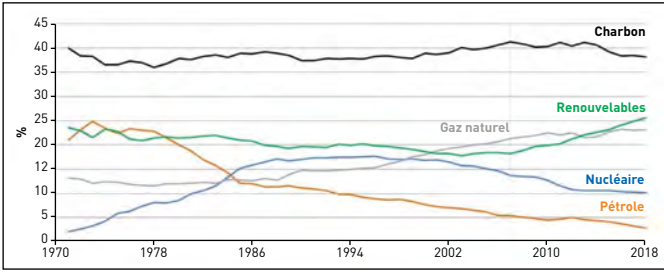


Figure 2

Mix électrique mondial : rôle croissant des renouvelables. Part dans la production mondiale d'électricité par combustible (1971-2018).

Source : AIE (au 31/07/2020).

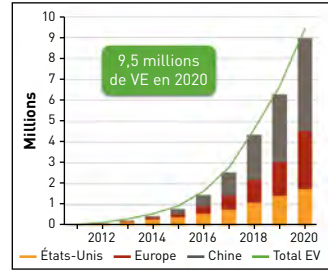


Figure 3

Évolution du stock de véhicules électriques.

Source : © IFPEN.

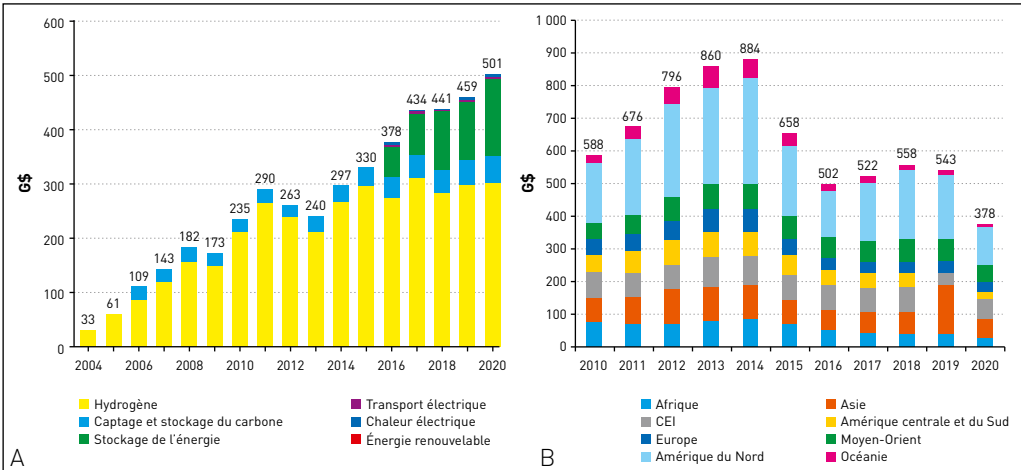


Figure 4

Comparaison des investissements par année dans la transition énergétique (A) et dans le secteur pétrolier (B).

Source : A) BloombergNEF ; B) : © IFPEN

de la pandémie ; il est intéressant de comparer, sur la **Figure 4**, la partie de gauche (A), qui concerne les investissements dans la transition énergétique, avec la partie à droite (B), qui présente l'évolution des investissements en exploration/production pétrolière qui est en baisse à partir de la crise pétrolière de 2014. Il est important dans cette

comparaison de noter que 2020 est la première année où les investissements dans la transition énergétique, de 501 milliards de dollars, sont supérieurs à ceux de l'exploration/production pétrolière, qui étaient de 378 milliards de dollars. C'est donc un élément factuel qui illustre bien ce qui est en train de se passer : une véritable bascule.

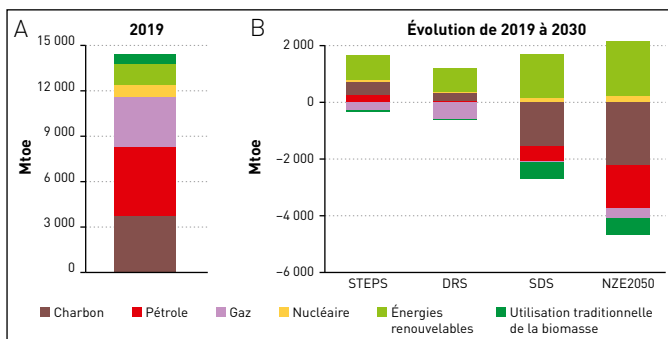


Figure 5

Comparaison des sources énergétiques en 2019 (A) avec les sources énergétiques (B) par secteurs selon les scénarios de l'AIE en 2030.

Source : d'après AIE : WEO 2020.

L'Agence internationale de l'énergie a établi plusieurs scénarios, avec des hypothèses plus ou moins sévères (Figure 5). Tous ces scénarios, du moins contraignant au plus exigeant, prévoient une forte croissance des sources d'énergies renouvelables dans la prochaine décennie :

- le premier scénario, STEPS (« *Stated policies scenario* ») (STEPS), scénario des politiques déclarées), est celui, qui prend en compte les engagements des États et qui prévoit une fin de crise Covid en 2021 ;

- le scénario suivant, DRS (« *Delayed recovery scenario* ») (DRS), scénario de reprise retardée), est un scénario récent qui a été élaboré l'année dernière, qui est le même que le STEPS mais qui prévoit une fin de crise Covid deux ans plus tard, en 2023 ;

- le scénario SDS (« *Sustainable development scenario* ») (SDS), scénario de développement durable) est un scénario très

habituel de l'Agence internationale de l'énergie, qui prend en compte l'hypothèse du respect de la limitation de la température sur la planète de 1,5 °C et une neutralité carbone en 2070 ;

- le scénario suivant, NZE2050 (« *Net zero emissions* »), prévoit la neutralité carbone mondiale en 2050 et a été élaboré également par l'AIE l'année dernière.

Comment passer du scénario STEPS, qui est un scénario facile, au scénario SDS, qui est un scénario plus difficile, et ainsi obtenir un impact satisfaisant sur le climat en réduisant fortement les émissions de CO<sub>2</sub> ? Un rapport de l'AIE de septembre 2020 montre que si nous voulons en 2030 réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à moins de 10 millions de tonnes pour passer du scénario STEPS au scénario SDS (Figure 6A), il faut mettre en place tout un ensemble de technologies différentes qui ne sont matures aujourd'hui qu'à 26 % (ex. H<sub>2</sub> ou CCUS) (Figure 6B).

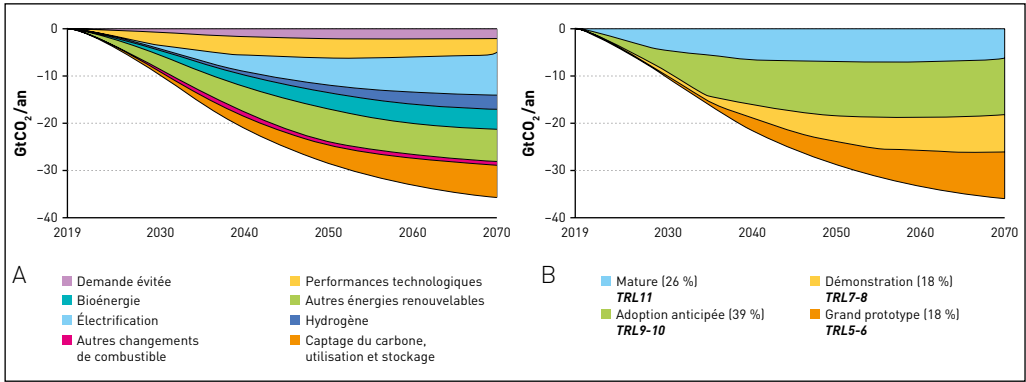


Figure 6

Nécessité de technologies bas carbone matures : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par technologies (A) et B (à droite) par maturité des technologies (B).

Source : IEA : EnergyTechnology Perspectives 2020 (sept. 2020).

## 2 La recherche et l'innovation à IFP Énergies nouvelles

L'atteinte de l'objectif de neutralité carbone nécessite donc des efforts soutenus de recherche et d'innovation parfois de rupture, pour augmenter leur rendement, réduire leurs coûts et ainsi accélérer leur déploiement.

Si on regarde les dépenses publiques mondiales de R&D dans le domaine de l'énergie,

au global elles n'évoluent pas. S'il y a eu une nette augmentation dans les années 2010 avec une croissance importante des efforts sur les énergies renouvelables, les dépenses publiques mondiales de R&D dans le domaine de l'énergie demeurent stables depuis dix ans (Figure 7). Mais, comme on peut le voir dans plusieurs chapitres de cet ouvrage, les industriels affichent leur volonté de développer la R&D dans le domaine des énergies renouvelables.

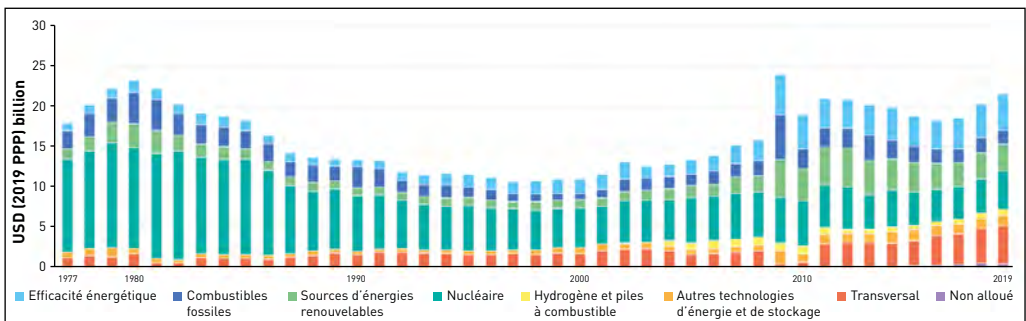


Figure 7

Dépenses R&D en énergie par secteur et dans le temps depuis dix ans.

Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone, s'appuyer sur une R&D performante et coopérative entre les différents acteurs sera un plus.

### 2.1. Les domaines d'activité d'IFP Énergies nouvelles

La transition énergétique est inscrite dans la réalité d'IFP Énergies nouvelles (IFPEN) depuis dix ans, avec aujourd'hui quatre priorités stratégiques (Figure 8), dont trois qui concernent directement la transition énergétique. Le cœur historique d'IFPEN, son histoire, ses compétences, ont



Figure 8

Domaines d'activités de l'IFPEN. La recherche fondamentale est un socle important et mutualisé.

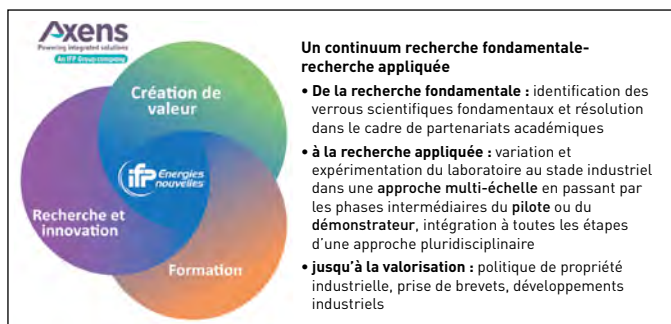


Figure 9

Stratégie de l'IFPEN concernant l'innovation.

été construites dans le domaine des hydrocarbures, qui ne représentent plus aujourd'hui qu'un tiers de ses activités.

### 2.2. La stratégie

La recherche et développement à IFPEN intègre l'ensemble de la chaîne de l'innovation dans le cadre d'un continuum depuis la recherche fondamentale jusqu'à la recherche appliquée (Figure 9). La stratégie d'IFPEN est de conduire une recherche fondamentale mutualisée pour optimiser les capacités d'innovation et pour mettre le résultat des efforts des chercheurs sur le marché le plus vite possible. L'objectif est de partir des concepts expérimentaux mis au point au laboratoire et de les tester à une échelle différente, qu'on appelle « pilote », de le démontrer avec des partenaires lorsque nécessaire, avant de le mettre sur le marché, et de le faire commercialiser par des tiers.

La valorisation est inscrite dans l'ADN des chercheurs à IFPEN et la prise de brevets est importante. IFPEN est un Institut public, un EPIC, le troisième institut public qui dépose le plus de brevets en France après le CEA et le CNRS.

Il est essentiel à IFPEN de créer de la valeur non seulement par la prise de brevets mais également par la création de filiales. Un exemple de filiale emblématique est Axens<sup>2</sup>, qui est une

2. Axens est une société française du secteur de l'énergie, présente sur les marchés du raffinage, de la pétrochimie, du traitement du gaz, des énergies renouvelables (carburants et intermédiaires pétrochimiques).

filiale 100 % IFPEN, créée il y a vingt ans et qui est le deuxième bailleur de procédés au monde. Aujourd'hui 42 % environ des technologies utilisées dans toutes les raffineries du monde proviennent de procédés Axens.

### 2.3. La recherche partenariale

À IFP Énergies nouvelles, il y a une grande expérience de partenariat public-privé. Il est en effet important de s'associer le plus vite possible, de manière complémentaire, avec d'autres acteurs du monde économique pour faciliter l'accès rapide des technologies au marché.

Trois exemples avec des partenaires de tailles très différentes (Figure 10) dans des domaines très différents peuvent illustrer cette recherche partenariale. IFPEN est aujourd'hui dans le secteur des énergies nouvelles, mais son histoire était en partie l'exploration/production pétrolière ; qui dit

exploration/production pétrolière dit offshore en mer. Les compétences développées sur l'éolien en mer, basées sur l'expérience acquise dans le domaine des plateformes pétrolières en mer, ont amené à développer un partenariat stratégique avec SBM<sup>3</sup> pour construire des flotteurs d'éoliennes en mer. Ainsi, IFPEN a été retenu au côté de SBM dans un appel d'offres d'EDF pour installer trois éoliennes en mer au large de Fos-sur-Mer.

Un autre exemple dans le domaine du recyclage chimique des plastiques est le partenariat avec une PME japonaise pour mettre au point un procédé de recyclage chimique de plastiques (PET), qui nécessite aujourd'hui une phase de démonstration. La démonstration aura lieu à partir de 2022, le procédé sera ensuite mis sur le marché,

3. SBM Offshore est une société travaillant comme sous-traitant de l'industrie pétrolière et gazière.



Figure 10

La recherche partenariale à l'IFPEN : trois exemples qui montrent la diversité des partenaires et des technologies sur le marché.

Sources : A) © SBM Offshore ; C) © Geovelo/Compagnie des Mobilités-IFPEN.

pour être commercialisé dans les années suivantes.

Plusieurs partenariats ont été établis avec des startups. Ainsi, dans le domaine de la mobilité, IFPEN a à la fois un partenariat de recherche et une prise de participation dans la startup Geovelo, qui permet de faire de la cartographie extrêmement utile sur les smartphones pour les parcours à vélo.

La diversité des entreprises (grands groupes, PME, startups) et la diversité des thèmes montrent la diversité du type de partenariat souhaitée.

#### 2.4. La recherche fondamentale

À IFPEN, la recherche fondamentale est organisée autour de neuf verrous scientifiques, déclinés en défis (*Figure 11*), qui adressent des grandes questions scientifiques intervenant dans toutes les activités de recherche et innovation à IFPEN. Cette démarche autour de ces neuf verrous scientifiques permet d'aller

de la compréhension de phénomènes physico-chimiques, en passant par leur modélisation, et jusqu'à l'évaluation d'un système complet.

Ces verrous scientifiques, transverses et interconnectés, n'ont pas tous le même poids ni la même importance. Certains sont des piliers, comme la caractérisation des matériaux et des fluides, les mécanismes réactionnels, la modélisation des phénomènes couplés aux différentes échelles, ainsi que la simulation numérique. L'intelligence artificielle et l'utilisation des données massives comme sources d'amélioration des connaissances sont montées en puissance ces dernières années.

Un autre verrou scientifique transverse concerne l'évaluation économique et environnementale à laquelle s'intègre l'étude de l'acceptation sociétale qui apporte des méthodes et outils d'aide à la décision. C'est aussi un facteur clé pour mettre sur le marché de nouveaux procédés.

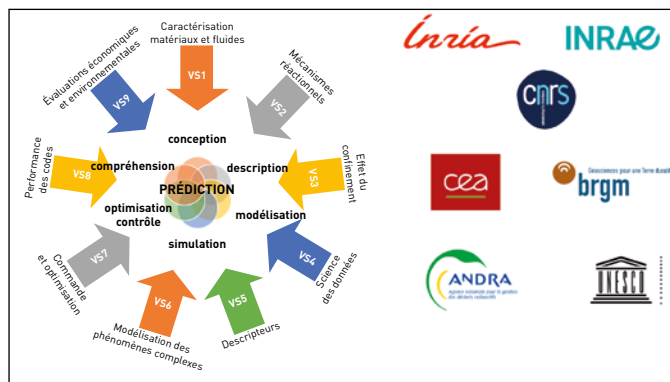


Figure 11

Les neuf verrous scientifiques d'IFPEN en matière de recherche fondamentale et quelques partenaires.



En explicitant les questionnements scientifiques, cette démarche structurée autour de neuf verrous scientifiques permet de mutualiser la recherche fondamentale en travaillant aux interfaces des disciplines et en collaboration avec des partenaires, dont certains sont cités sur la partie droite de la *Figure 11*.

### 3 La chimie, une discipline clé pour les technologies bas carbone

#### 3.1. Transformation de la biomasse lignocellulosique

La transformation de la biomasse lignocellulosique<sup>4</sup> pour faire des biocarburants ou des bioproduits (*Figure 12*) est un exemple de technologie bas carbone pour laquelle la chimie

4. Biomasse lignocellulosique : biomasse d'origine agricole ou forestière telle que le bois, les déchets de bois, les cultures pérennes, les cultures annuelles et les coproduits ligneux des cultures.

est essentielle. La transformation de la biomasse fait appel à énormément de compétences très variées, qu'elles soient du domaine chimique, génie chimique ou biologique et biotechnologique.

L'utilisation des biocarburants est une solution pour décarboner le secteur des transports. IFPEN y travaille depuis quelques années (*Figure 13*). La première génération de biocarburants (biocarburants conventionnels) était basée sur l'utilisation des ressources agroalimentaires, ce qui est en compétition avec leur utilisation dans le domaine de l'alimentaire, c'est donc devenu extrêmement réglementé. La deuxième génération de biocarburants (biocarburants avancés) développée depuis consiste en la transformation de résidus agricoles ou de bois et présente une réduction de gaz à effet de serre extrêmement compétitive (plus de 85 % de réduction des gaz à effet de serre par rapport à la référence fossile). C'est la voie qui



Figure 12

Exemples de biomasse lignocellulosique.

Source : © Michel Jolyot – PROCETHOL 2G.

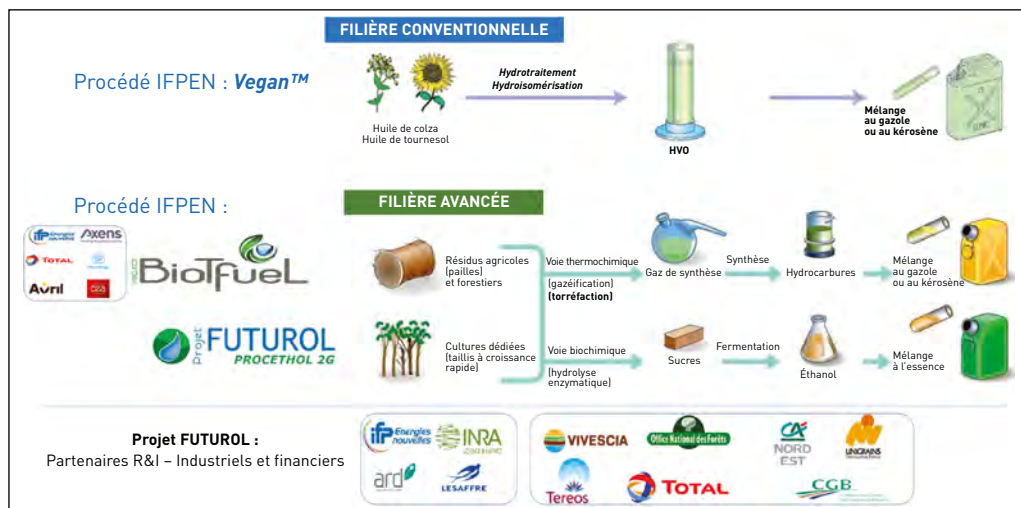


Figure 13

Les différentes générations de biocarburants.

Source : © IFPEN.

a été retenue et dans laquelle IFPEN est impliqué avec deux procédés qui utilisent deux approches chimiques différentes : Futurol et BioTfuel. Futurol utilise une approche enzymatique, tandis que BioTfuel utilise une approche thermo-chimique. Le bas de la **Figure 13** présente l'ensemble des partenaires, qu'ils soient académiques ou industriels, qui sont intervenus dans le développement du procédé Futurol, qui est dans la phase de commercialisation par Axens, filiale d'IFPEN, et pour lequel une première licence a été vendue en Croatie en 2020.

### 3.2. Vers les briques de la bioraffinerie : production des grands intermédiaires chimiques biosourcés

Trois exemples (**Figure 14**) illustrent l'utilisation de la biomasse pour la production

de grands intermédiaires dans lesquels IFPEN est associé avec des partenaires industriels pour mettre sur le marché des procédés qui, à terme, s'inscrivent dans la transition énergétique.

Le premier exemple est un partenariat avec Michelin pour fabriquer du butadiène biosourcé, élément indispensable dans la fabrication des pneumatiques. La phase de démonstration de ce procédé, sur l'unité de Michelin près de Bordeaux, va démarrer sous peu (l'unité entre en phase finale de construction).

Le deuxième exemple (cité dans le chapitre d'O. Greiner), est un partenariat avec Total, pour le Procédé Atol-C2, technologie de production de bioéthylène par déshydratation d'éthanol. La première licence a été vendue en 2020.

Le dernier exemple est un partenariat avec une startup

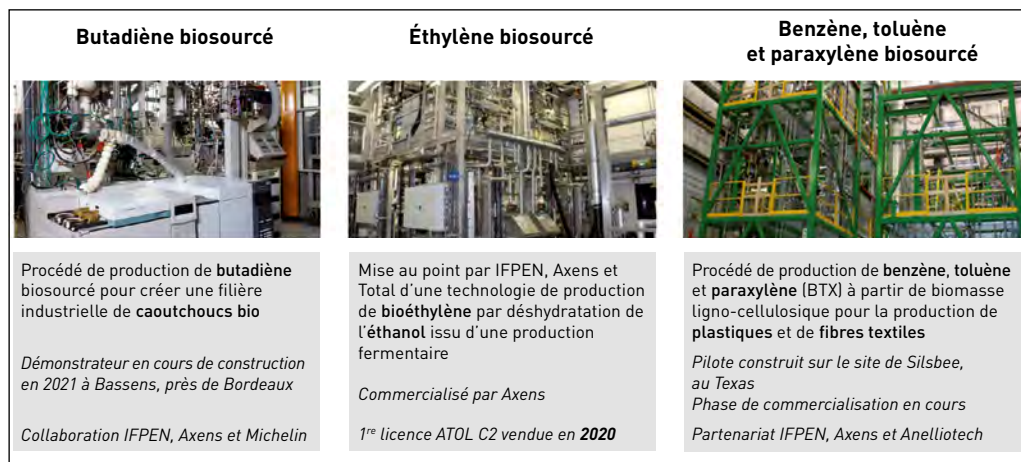


Figure 14

Exemples de partenariats sur les procédés de synthèse d'intermédiaires biosourcés.

Source : © IFPEN/Objectif Images, © IFPEN (David Arraou), © IFPEN (Frédéric Feugnet).

américaine, Anellotech, pour fabriquer du benzène et du paraxylène à partir de biomasse lignocellulosique, briques de base pour la production de plastiques biosourcés. Le point intéressant dans ce partenariat est que cette startup avait mis au point un procédé à l'échelle du laboratoire, et IFPEN a construit un partenariat pour extrapoler leur procédé à l'échelle industrielle via un passage par une échelle de démonstration, avant de lancer la phase de commercialisation, qui est désormais en cours.

#### 4 Le recyclage chimique des plastiques

Depuis 2020, IFPEN a également développé une autre priorité, en lien avec l'économie circulaire, pour s'inscrire dans la transition énergétique :

le recyclage chimique des plastiques (Figure 15).

Le recyclage mécanique des plastiques est la méthode de recyclage la plus courante ; le recyclage chimique a un avantage même s'il est plus complexe, il permet d'élargir la gamme des déchets à traiter et permet d'éviter le « *down-cycling* » (recyclage du produit vers un usage moins noble). La chimie est un élément clé pour le recyclage chimique des plastiques avec trois types de procédés :

- par dissolution et on obtient directement un polymère<sup>5</sup> ;
- par dépolymérisation, on obtient un monomère<sup>5</sup> ;

5. Polymère : molécule de masse moléculaire élevée généralement organique ou semi-organique. Une macromolécule constituée d'un enchaînement d'un grand nombre d'unités de répétition, d'un ou de plusieurs monomères (unités de répétition), unis les uns aux autres par des liaisons covalentes.

– par une conversion chimique beaucoup plus importante pour revenir directement à la molécule.

On peut voir clairement dans les trois cercles de la **Figure 15** que la difficulté va en s'accroissant quand on passe du polymère, au monomère, puis à la molécule.

Pour illustrer ce procédé de recyclage chimique, prenons le cas du polyéthylène téréphtalate opaque et coloré (**Figure 16**), technologie en développement en partenariat avec la société JEPLAN, une PME japonaise choisie parce qu'elle avait un savoir-faire éprouvé sur le recyclage de textiles.

IFPEN avait mis au point au laboratoire un procédé de dépolymérisation et purification mais il fallait passer à une échelle pilote pour pouvoir le démontrer avant qu'il soit commercialisé. L'association avec JEPLAN permet de gagner du temps dans ce passage d'échelle, les travaux ont débuté en 2020, l'étape de démonstration sera réalisée à partir de 2022 ; il n'aura fallu que quatre-cinq ans pour mettre au point un procédé depuis le laboratoire jusqu'à sa mise sur le marché, soit deux fois moins de temps qu'il n'en faut pour mettre au point tout seul un procédé.



**Figure 15**

*Le recyclage chimique des plastiques, une prise de conscience sociétale à l'échelle mondiale : des évolutions réglementaires qui se développent, un comportement des consommateurs en évolution et une adaptation des industriels.*

Projet IFPEN de valorisation des déchets à base de PET colorés, opaques ou thermoformés (bouteilles, films, barquettes ou textiles) par **dépolymérisation et purification**

Partenariat IFPEN, Axens et JEPLAN

Démarrage de l'étape de démonstration : fin 2021



**Figure 16**

*Recyclage chimique du PET opaque.*

## 5 Le numérique dans la chimie, un atout performant

Historiquement, la modélisation numérique a beaucoup apporté à la chimie. On peut citer la dynamique moléculaire par exemple, permettant de représenter les molécules et leurs interactions.

Les nouvelles techniques numériques sont devenues des outils performants au service de la chimie, comme illustré sur la **Figure 17**.

Un exemple de calcul quantique est présenté sur la **Figure 17** : un système de 500 atomes simulés dans une réaction visant à produire des intermédiaires chimiques biosourcés. Grâce à l'accroissement de la puissance de calcul des ordinateurs, et au fait que les codes sont beaucoup mieux adaptés, il est maintenant possible de simuler des systèmes plus complets associant la molécule et son environnement, et de prédire par exemple les vitesses de réactions. Cela ouvre la voie pour tester les procédés beaucoup plus rapidement et de

manière beaucoup plus intrusive et aussi beaucoup moins chère.

L'intelligence artificielle et l'utilisation du big data (mégadonnées) permettent de modéliser plus facilement et plus rapidement un grand nombre d'espèces chimiques, et en couplant un résultat de calculs avec des données et en les comparant, d'être beaucoup plus prédictif et de gagner beaucoup de temps. Cela ouvre des voies à une chimie beaucoup plus focalisée qui pourra aborder des phénomènes qu'elle ne savait pas aborder ou difficilement.

Les relations structure-propriétés à l'échelle quantitative : au lieu de partir d'une molécule et de regarder ses propriétés, visons directement la propriété que l'on cherche à avoir et reconstruisons l'histoire pour arriver à définir quel type de molécule pourra y répondre. Cette approche ouvre la voie à des perspectives très intéressantes. Les recherches sur ce domaine sont récentes, mais extrêmement prometteuses.

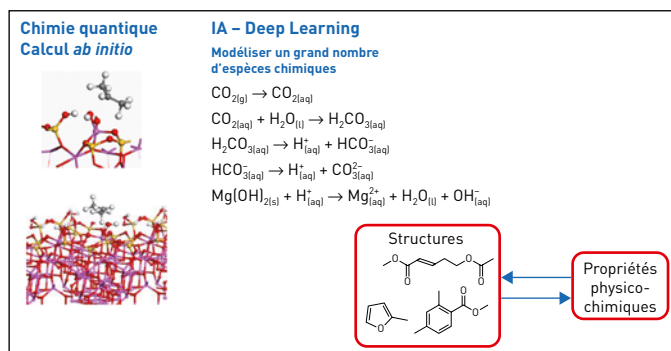


Figure 17

Les nouvelles techniques numériques au service de la chimie.

## Conclusion

Emprunter la trajectoire d'émissions de CO<sub>2</sub> la plus vertueuse et ainsi accélérer la transition énergétique est une absolue nécessité. Cela implique :

- en premier lieu d'augmenter la R&D dans le domaine de l'énergie ;
- également de favoriser le travail collaboratif et soutenir une recherche aux interfaces : génie chimique, génie des procédés, électrochimie, biochimie, chimie-numérique.

Ce qui signifie associer recherche, innovation, valorisation, formation, et encourager les partenariats public-privé, favoriser un travail collaboratif entre acteurs R&D et acteurs économiques (industrie PME, startup).

Cela veut tout simplement dire soutenir l'innovation.