

Les enjeux de la chimie dans la production d'électricité

D'après l'intervention de Jean-Pierre West

Jean-Pierre West est directeur en charge des domaines d'activités Ingénierie et Production d'EDF Recherche & Développement. Il aborde ici la chimie intervenant dans la production d'électricité.

Pour traiter des apports de la chimie dans la transformation de notre système énergétique, il convient en premier lieu de considérer la nature des enjeux énergétiques eux-mêmes.

1 Les enjeux énergétiques des prochaines décennies

1.1. La nécessité d'un mix énergétique

Notre futur énergétique, c'est admis par tous, fera appel à toutes les solutions réalistes simultanément : un montage, que l'on appelle un « mix », et qui est un bouquet diversifié utilisant les énergies renouvelables, le nucléaire, le thermique (charbon, gaz ou pétrole), mais faisant éga-

lement appel aux économies d'énergie et à l'amélioration de l'efficacité énergétique.

Ces évolutions sollicitent tous les acteurs de l'industrie de l'énergie – l'ingénierie, les technologies – mais aussi la R&D qui a la tâche de préciser et de quantifier les enjeux de ces différentes sources de production d'électricité en termes de sûreté, de sécurité, d'impact environnemental, tout en évaluant l'incidence des options sur la compétitivité.

1.2. Des programmes de recherche et développement

Pour EDF, cela entraîne des programmes selon trois axes qui constituent son plan stratégique (**Figure 1**).

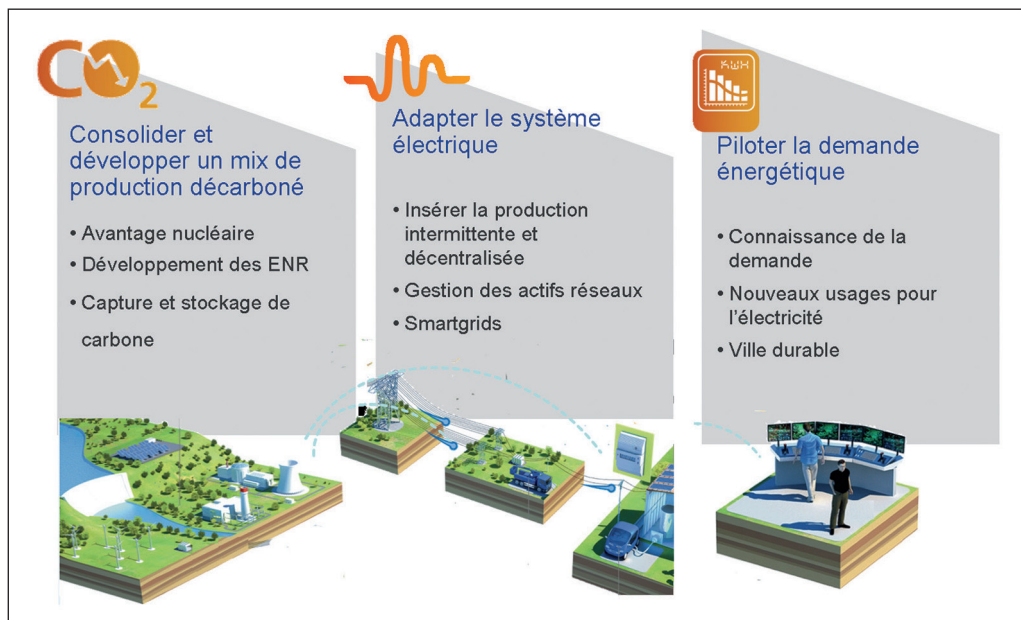


Figure 1

Notre futur énergétique sera composé d'un mix diversifié. Il est nécessaire pour la R&D de traiter les enjeux de compétitivité et environnementaux des différentes technologies.

Le premier axe vise à **mettre au point et à développer un mix de production décarboné**, en réponse au vigoureux engagement qui a été pris aux niveaux national, européen et international (voir les *Chapitres de B. Bigot et de P. Criqui*). Cet axe entraîne trois types d'actions : mettre à profit l'avantage que confère le parc nucléaire existant et en assurer le futur ; développer les énergies renouvelables ; travailler sur les technologies de la capture et du stockage du gaz carbonique. Ce dernier domaine connaît aujourd'hui des contestations. On voit des projets de démonstrateurs ou de grandes installations reportés ou annulés pour des raisons technologiques ou financières ; on voit aussi des objections techniques nouvelles apparaître, comme celles de l'impact de ces techniques sur le régime de

consommation et de disponibilité de la ressource en eau. Cependant, on ne peut ignorer l'importance considérable – et croissante ! – que revêt aujourd'hui l'utilisation du charbon dans le mix énergétique mondial. Cela est par exemple présenté dans le *Chapitre de P. Criqui*, qui rappelle que la satisfaction des besoins énergétiques de la Chine repose à 75 % sur le charbon, et pour un pays comme les États-Unis (avant l'entrée en exploitation des gaz de schistes) à près de 30 %. Les voies techniques de la capture et du captage du CO₂ doivent absolument être considérées sérieusement, compte tenu des engagements de « décarbonisation » de l'énergie qui ont été pris. Le deuxième axe stratégique de la R&D sur les enjeux énergétiques porte sur **l'adaptation du système électrique** aux données nouvelles.

L'utilisation des énergies renouvelables, engagée dans le cadre de politiques à long terme, amène à gérer une production intermittente qui nécessite d'adapter les systèmes électriques en développant les réseaux dits intelligents.

Le troisième axe concerne **la connaissance puis le pilotage de la demande énergétique**. À côté des difficultés liées à l'intermittence des sources d'électricité, il faut prendre en compte le contexte social actuel où les consommateurs de l'électricité, particuliers, entreprises ou institutions, cherchent à devenir acteurs de leur production. Par ailleurs, de nouveaux usages de l'électricité apparaissent, comme le transport électrique, la voiture électrique (voir le **Chapitre de M. Perrin**), qui ne peuvent que renforcer ces évolutions des comportements des consommateurs (voir le **Chapitre de B. Bigot**).

On doit également prendre en compte les facteurs démographiques qui vont conduire à un fort accroissement des populations dans les décennies à venir ainsi, comme on peut déjà l'observer, qu'à une urbanisation croissante – réunissant déjà plus de 50 % de la population mondiale, les villes pourraient en héberger plus de 75 % à l'horizon 2030-2050. Ces modifications de grande ampleur réclament des réponses à toute une série de questions sur la production et la distribution, non seulement de l'électricité mais de toutes nos ressources : l'eau (voir le **Chapitre de L. Duvivier**), l'énergie distribuée, par

exemple celle qui est produite sur les toits des habitations, le gaz, les déchets, les transports.

De nombreuses études visent à évaluer comparativement les avantages et les inconvénients de différents schémas d'organisation. Avec des grandes villes françaises comme Nice et Lyon, des expériences et des simulations sont menées en collaboration avec les responsables locaux ; des accords de coopération sont passés, en commun avec Veolia, avec de grandes mégapoles mondiales comme Mexico et Singapour.

2 La chimie et les filières énergétiques

Au cours des années récentes, les préoccupations environnementales se sont imposées à toute l'industrie énergétique, conduisant à l'objectif **de réduire l'impact de nos installations sur l'environnement et l'impact de l'environnement sur nos installations**.

Ainsi la maîtrise de la gestion des rejets des installations – chimiques, thermiques, radioactifs – devient un sujet clé, domaine où la chimie joue évidemment un rôle majeur, car nombre des paramètres qui contrôlent la génération et le transfert de ces rejets dans la biosphère en dépendent.

Sans faire ici une revue complète du domaine « chimie et énergie » qui risquerait d'être fastidieuse et qui serait dans tous les cas fort longue, trois secteurs seront abordés : l'importance de la chimie pour le secteur nucléaire, les défis de la capture et du stockage de gaz carbonique (CO₂) et la

présentation de perspectives pour la production d'électricité à l'aide de cellules photovoltaïques.

2.1. L'importance de la chimie dans le secteur nucléaire

La **Figure 2** donne une représentation simplifiée d'une centrale nucléaire avec ses trois circuits d'eau. Le principal phénomène d'usure des circuits est **la corrosion des matériels** (pompes, vannes, tuyaux) par l'eau circulante, chauffée à température élevée. Afin de limiter cette corrosion, il est nécessaire de bien comprendre et de maîtriser la chimie à l'œuvre dans les trois circuits.

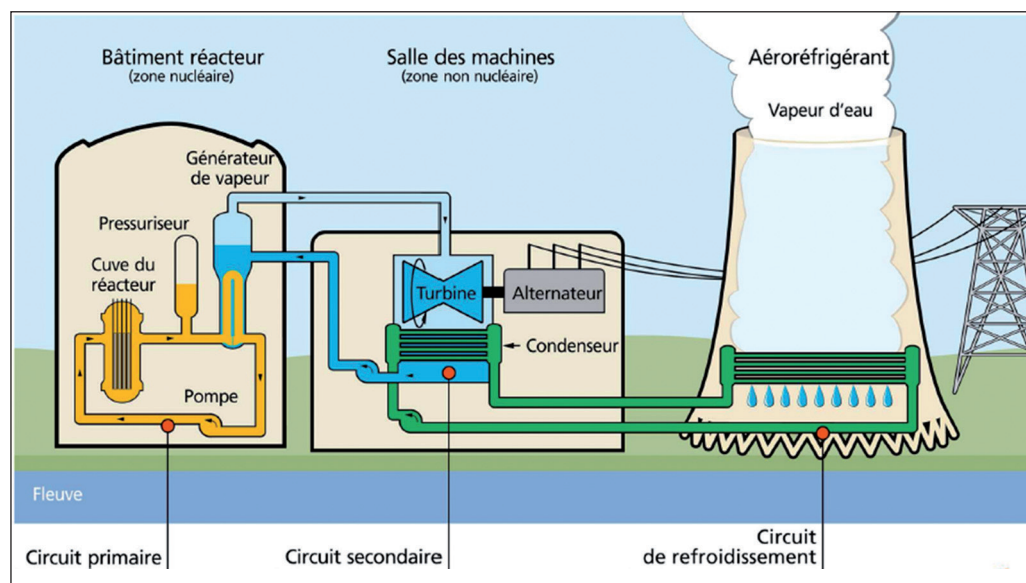
Dans le **circuit primaire**, l'eau sous pression (monophasée) est chauffée dans le cœur du réacteur par l'énergie issue de la fission nucléaire, au contact des gaines métalliques qui confinent le combustible. L'eau y joue le rôle

de caloporteur mais aussi de contrôle neutronique grâce à l'addition de bore (neutrophage) sous forme d'acide borique, lui-même neutralisé par l'addition de lithine. Elle passe dans des générateurs de vapeur où elle transfère sa chaleur à un deuxième circuit puis est réintroduite dans le réacteur.

Une partie des produits de corrosion (oxydes métalliques) formés dans le circuit primaire peut donner naissance, lors de leur passage dans le cœur et sous l'effet des neutrons, à des produits radioactifs (principalement ^{58}Co et ^{60}Co), susceptibles de se déposer hors du cœur sur des composants, tuyaux, pompes, ou échangeurs. Bien que la corrosion soit extrêmement faible ($< 0,1 \mu\text{m}/\text{an}$ sur l'épaisseur des conduits), ce phénomène revêt une grande importance pour l'exploitation du réacteur car il détermine la contamination des

Figure 2

Schéma de principe d'une centrale nucléaire. Il s'agit de comprendre et contrôler la chimie de l'eau des trois circuits.



composants et donc la dose que vont recevoir les intervenants chargés de la maintenance. La chimie de ce circuit (composition chimique, pH, pureté, potentiel d'oxydo-réduction – qui contrôle la radiolyse de l'eau), la qualité de son eau, son suivi et sa propreté sont des enjeux cruciaux qui déterminent la fréquence et la durée des opérations de maintenance et donc la disponibilité de la centrale. L'exploitant de la centrale les suit de près au quotidien.

À côté de cet impact sur la disponibilité de la centrale, la corrosion dans le circuit primaire joue aussi un rôle sur la sûreté. En effet, les produits de corrosion sont susceptibles de se déposer le long de l'assemblage combustible, ce qui peut conduire dans les cas extrêmes à des distorsions de la distribution de flux neutronique, influençant la réactivité et le fonctionnement même du réacteur. La chimie du circuit primaire vise donc pour l'essentiel à contrôler la réactivité, à éviter les dépôts sur le combustible, à minimiser la contamination radioactive du circuit, et enfin à éviter ou à ralentir certains phénomènes de corrosion spécifiques (corrosion sous contrainte) qui peuvent altérer l'intégrité des systèmes. On le voit, la chimie a un fort impact en termes de disponibilité et de sûreté.

Le **circuit secondaire** contient de l'eau très pure avec un conditionnement qui permet de fixer le pH et d'imposer un potentiel réducteur. Il alimente le générateur de vapeur ; cette vapeur fournit à la turbine une énergie mécanique ensuite transférée à l'alter-

nateur pour être transformée en énergie électrique ; la vapeur retourne finalement en eau dans le condensateur. Le circuit secondaire peut être le siège de diverses formes de corrosion interdépendantes : la corrosion-érosion, l'attaque intergranulaire et la corrosion sous contrainte, l'encrassement des tubes de générateurs de vapeur et le colmatage.

La principale source des produits de corrosion est la corrosion-érosion – forme de corrosion généralisée accélérée par la vitesse de l'eau – des aciers peu alliés du circuit. Elle se produit lorsque le pH est trop bas, ce qui peut arriver lorsque la présence d'alliages cuivreux au condenseur demande un pH moins élevé pour éviter leur corrosion.

Les produits de corrosion ainsi générés peuvent donner naissance à des dépôts sur divers composants du circuit ; l'un des dommages les plus nocifs est la dégradation de la performance des générateurs de vapeur par encrassement et colmatage. L'encrassement est le dépôt généralisé des oxydes sur la surface des tubes ; le colmatage est l'obturation des trous qui permettent le passage de l'eau à travers les plaques qui maintiennent les tubes. On a vu certaines situations où des générateurs de vapeur ont été colmatés par ces produits de corrosion de façon significative et qui ont dû être remplacés – opérations longues et coûteuses.

Les produits de corrosion du circuit secondaire ne sont pas radioactifs mais jouent sur la performance et la disponibilité

du réacteur. Maîtriser ces phénomènes est un enjeu crucial de la chimie, et les spécifications chimiques du circuit secondaire ont pour but de minimiser les différents phénomènes de corrosion et d'encrassement. Les principaux paramètres de contrôle sont le pH, le potentiel d'oxydo-réduction et la minimisation d'espèces ioniques défavorables. On demande aux études de R&D de comprendre les mécanismes mis en jeu et de quantifier leurs effets afin de minimiser l'encrassement et la corrosion de nos échangeurs.

Le **circuit tertiaire**, ou circuit de refroidissement, fait le lien avec la source froide qui permet la condensation de la vapeur du circuit secondaire. Il présente la particularité d'être ouvert sur l'environnement. Pour les centrales de type « bord de mer », il est en cycle ouvert avec rejet et prise d'eau en mer ; pour des centrales en « bord de rivière », il est en cycle fermé refroidi par des aéro-réfrigérants, dans lesquels la chaleur est généralement extraite par vaporisation de l'eau. Ce sont ces derniers qui constituent le point sensible du circuit tertiaire car la chimie est largement imposée par la nature de l'eau d'appoint, et il y a un apport continu de substances dissoutes susceptibles de précipiter lors de l'échauffement, de matières en suspension, de nutriments pour les organismes vivants. Ils sont susceptibles de s'entartrer selon la nature de l'eau du fleuve concerné ; une dégradation de la performance peut alors

survenir. Par ailleurs, il faut veiller au risque de développement de micro-organismes pathogènes. Les phénomènes chimiques doivent donc être suivis pour limiter l'entartrage, par contrôle du pH de l'eau d'appoint, et la prolifération de micro-organismes, par des procédés biocides.

En résumé, on voit que les principales missions qui reviennent à la chimie pour assurer le meilleur fonctionnement du réacteur touchent les propriétés les plus critiques de son fonctionnement et de sa rentabilité – sa disponibilité, sa performance et la radioprotection. Plus précisément, on a vu l'importance de la chimie dans les questions suivantes :

- contrôle de la réactivité, maintien du refroidissement du cœur ;
- maintien de la performance du réacteur – intégrité des matériels, maintien de la propreté, en particulier dans les échangeurs thermiques ;
- **durée de vie du réacteur** selon l'intensité de la corrosion ;
- radioprotection : du personnel d'intervention par maîtrise de la radioactivité des matériels et donc des débits de dose ;
- respect de l'environnement : limitation des développements de micro-organismes pathogènes ; caractérisation des rejets chimiques et connaissance de leur comportement dans l'environnement (transfert dans la biosphère : phases sédimentaires ou atmosphère). La réglementation REACH impose d'ailleurs une vigilance accrue sur ces aspects.

2.2. La capture et le stockage du gaz carbonique

La lutte contre l'effet de serre, et donc contre l'accumulation de gaz carbonique dans l'atmosphère, est l'un des facteurs pris en compte par les scénarios de la fourniture d'énergie pour le XXI^e siècle. Les techniques de captage et de stockage de CO₂ font donc partie des axes d'études.

Aujourd'hui, trois types de technologies sont considérés : l'**oxycombustion**, qui est tout simplement une combustion en oxygène pur permettant une récupération facile du CO₂ ; le **traitement de pré-combustion**, qui repose sur la gazéification du charbon – procédé plus compliqué à mettre en œuvre ; la **post-combustion**, où l'on extrait le CO₂ des fumées à l'aval de la chaudière (Figure 3).

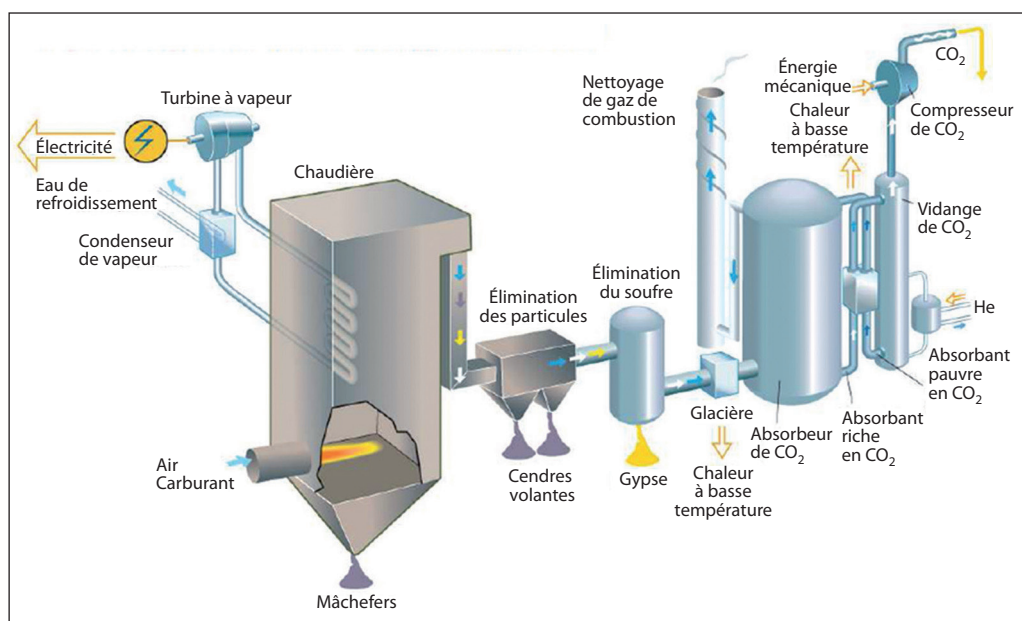
Le captage en **post-combustion**, technologie qui peut être mise en œuvre

rapidement et être installée sur des usines existantes, conduit déjà à une problématique industrielle (voir Encadré « Étude du captage de CO₂ en post-combustion par solvant à base d'amines. Deux thèmes de R&D »). Différents procédés de captage existent (chimiques, physiques, cryogéniques), mais ils doivent être industrialisés à grande échelle pour en assurer l'efficacité et réduire la pénalité énergétique c'est-à-dire la perte de rendement de l'installation. C'est l'objet d'un pilote installé sur la centrale EDF du Havre dans le cadre d'une collaboration avec Alstom. L'enjeu global de cette opération est la démonstration de la faisabilité de cette technologie. Un deuxième objectif est de surmonter les inconvénients des amines que l'on utilise, liés à leur dégradation qui peut conduire à l'émission de polluants gazeux.

Figure 3

Installation de captage de CO₂ par procédé chimique de post-combustion.

Source : Vattenfall



ÉTUDE DU CAPTAGE DE CO₂ EN POST-COMBUSTION PAR SOLVANT À BASE D'AMINES. DEUX THÈMES DE R&D

Laboratoire d'études des mécanismes de dégradation des solvants en présence de CO₂ (LEMEDES-CO₂)

Le captage de CO₂ par un cycle absorption/désorption dans un solvant à base d'amine est mature, mais la dégradation du solvant peut conduire à des émissions de polluants gazeux. Le laboratoire permet de reproduire le phénomène de dégradation des amines sur une boucle expérimentale. L'activité de R&D a pour but d'identifier les produits de dégradation du solvant et d'en comprendre les mécanismes de formation.

Pilote de captage de CO₂ de la centrale du Havre

Le pilote démarré en 2012 offre une capacité de captage d'une tonne par heure par le procédé « Advanced Amine Process » (Alstom/Dow Chemicals) sur les fumées de la centrale Havre 4. Le programme de R&D prévu sur le pilote permettra d'évaluer la technologie proposée : pénalité énergétique, faisabilité technique et économique, opérabilité du procédé, consommation de réactifs et rejets.

2.3. Amélioration de l'utilisation de l'énergie solaire par effet photovoltaïque

L'amélioration de la technologie photovoltaïque actuelle, qui utilise le silicium cristallin, pose un certain nombre

d'enjeux à la R&D : purification du silicium, texturation de la surface des plaquettes, dépôt de couches minces pour améliorer le rendement des cellules¹. La stratégie suivie est de chercher des voies de rupture technologique (voir *l'Encadré « Des enjeux de coûts et de rendements sur l'ensemble de la chaîne de fabrication du photovoltaïque »*).

Deux voies apparaissent possibles : la réduction des pertes résistives (l'hétérojonction) et l'utilisation de couches extrêmement minces (leur épaisseur se compte en microns), qui permettent d'avoir une réduction des matières utilisées. L'argumentaire technique a été présenté en détail dans le *Chapitre de B. Bigot*.

EDF a créé l'Institut photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF),

DES ENJEUX DE COÛTS ET DE RENDEMENTS SUR L'ENSEMBLE DE LA CHAÎNE DE FABRICATION DU PHOTOVOLTAÏQUE

Pour les cellules au silicium cristallin

- purification du silicium pour faire des plaquettes actives ;
- texturation de la surface des plaquettes (pour mieux piéger la lumière) ;
- dépôts de couches minces pour améliorer le rendement des cellules (couches antireflets, correction de défauts de surface...);
- mise au point de pâtes chimiques à l'argent peu résistives pour la fabrication de bons contacts.

Pour les cellules couches minces

- la chimie est omniprésente dans les procédés de dépôts des cellules en couches minces (empilement de matériaux en couches d'épaisseurs nano- ou micrométriques).

1. Voir à ce sujet *La chimie et l'habitat*, Chapitres de D. Lincot et D. Plée. Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2011.

EDF INVESTIT DANS UN NOUVEL INSTITUT DE RECHERCHE SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

EDF, Total, Air Liquide, le CNRS, l'École polytechnique et des PME créent un nouvel Institut de recherche sur le photovoltaïque à Saclay – 180 chercheurs à terme et des équipements de pointe – pour mener la recherche sur les cellules photovoltaïques couches minces (silicium, CIGS).

Objectif : développer les ruptures technologiques pour une énergie photovoltaïque compétitive sur le marché.

récemment labellisé « Institut d'excellence » pour les énergies décarbonées dans le cadre des investissements d'avenir (*Encadré « EDF investit dans un nouvel institut de recherche sur le photovoltaïque »*).

En conclusion de ces trois exemples, on peut constater

que la chimie participe effectivement aux enjeux de la décarbonisation du parc de production et distribution d'électricité, et que ce programme sollicite très largement la recherche et la collaboration avec des partenaires scientifiques (le CNRS, le CEA) et industriels.

La chimie au cœur des enjeux dans la production d'électricité

La chimie participe ainsi largement aux enjeux de décarbonisation du parc de production électrique, sur de multiples aspects :

- pour pérenniser l'avantage nucléaire ;
- développer les énergies renouvelables ;
- développer la faisabilité industrielle de la capture et du stockage du carbone.

Afin d'atteindre ces objectifs, il est nécessaire de développer les actions de recherche avec des partenariats entre industriels et partenaires académiques.