

# Un mix de gaz 100% renouvelable en France en 2050 ?

*Etude de faisabilité technico-économique*

Séminaire Plateforme modélisation – Mines ParisTech  
30/05/2018

Simon Métivier - **Solagro**

- **Contexte**

- Renforcement des objectifs climatiques (LTE, COP21...)
- Transition vers les ENR : Intérêt environnemental + économique (la France importe ses énergies fossiles)
- Etude Mix électrique 100% ENR (ADEME 2015)

- **Objectifs**

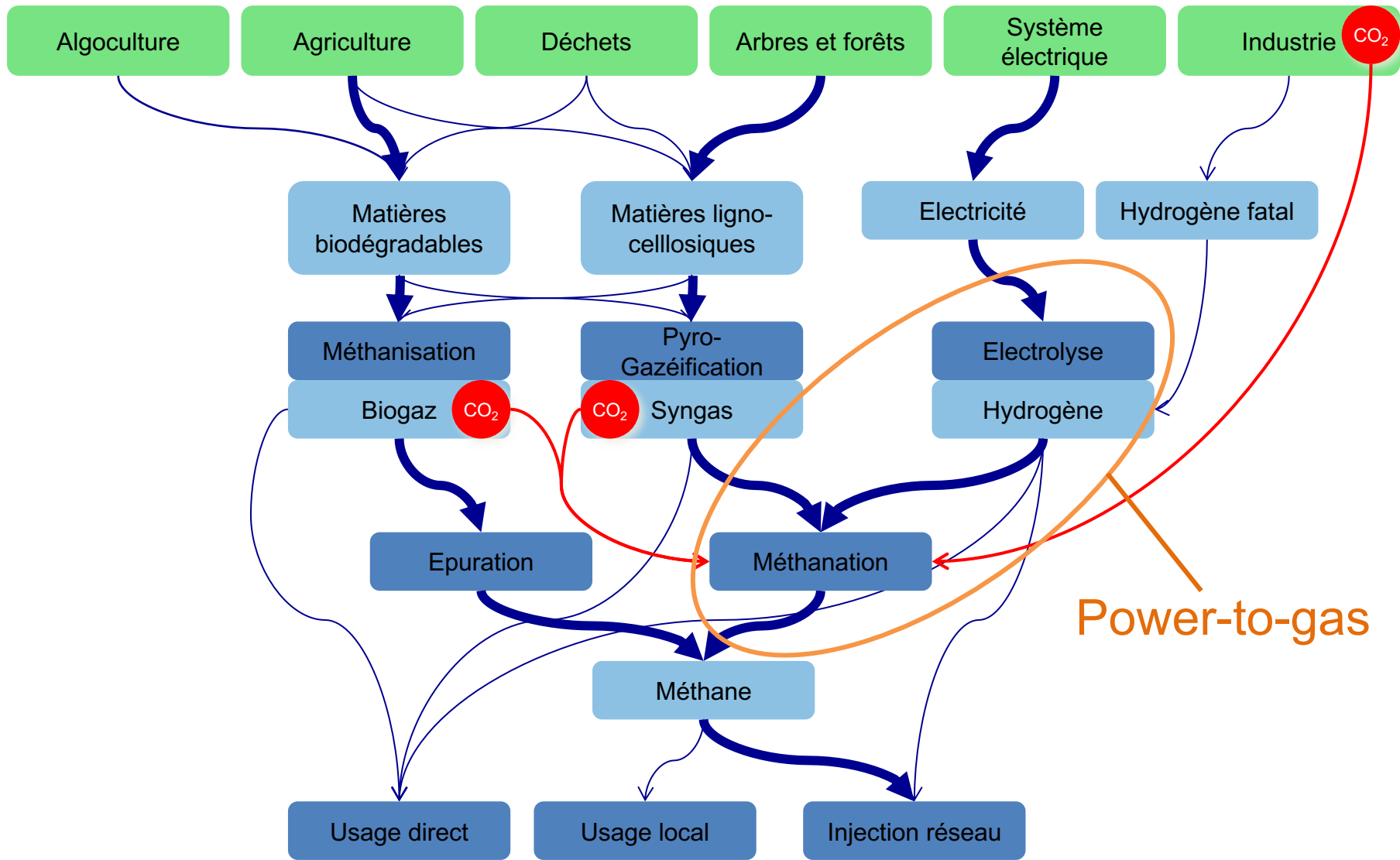
Analyser les conditions de faisabilité technico-économiques d'un système gazier français basé à 100% sur les énergies renouvelables

- Avec quels types de gaz est-ce possible?
- Quelles évolutions du réseau sont nécessaires?
- Quel est l'impact sur le coût moyen du gaz délivré?
- Premières observations sur les conditions de réalisation de ce système

- **Périmètre**

- France métropolitaine – Pas d'imports de ressources
- Focalisé sur gaz de réseau (n'explore pas les usages hors réseau, ou via des réseaux tierces : ex H2)
- Pas d'optimisation du système énergétique globale / Pas de trajectoire

# Les gaz renouvelables et de récupération





# Méthodologie, principales hypothèses et résultats intermédiaires

# Méthodologie globale

## Demande

Cadre prospectif  
scenario ADEME  
2035-2050  
(Actualisation 2017)



### 4 Scénarios Gaz 2050 dépendants de :

- Arbitrages usage ressources
- Limitation ressource/filière
- % ENRR dans mix gaz

## Offre

### Description du potentiel de ressource par intrant

- Répartition géographique
- Coûts d'approvisionnement

### Description des filières de production de gaz

- Performances technico-économiques
- Coûts de transformation

Mobilisation des  
ressources pour usages  
hors gaz

Ressource disponible  
pour production de  
gaz

Demande gaz

Equilibre offre /demande  
annuel

Mobilisation par coût  
croissant

Ressource mobilisée

Coûts de  
production

Demande + géo +  
chrono localisée

Evaluation des coûts du  
réseau + stockage

**Coût total du  
système gazier**

Equilibrage offre-demande

| Nom  | Description   |
|--|---|
| 100% EnR&R   | <p><b>Scénario le plus proche du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Substitution d'une partie de la cogénération biogaz et bois</li> </ul>  |
| 100% EnR&R<br>avec<br>pyrogazéification<br>haute         | <p><b>Vecteur gaz est renforcé :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cogénération biogaz en partie substituée</li> <li>- <b>Cogénération bois supprimée au profit de la gazéification/injection</b></li> <li>- <b>Réseau de chaleur bois supprimé au profit de la gazéification/injection</b></li> </ul>   |
| 100% EnR&R<br>avec biomasse<br>limitée pour<br>usage gaz | <p>Identique « <b>100% EnR&amp;R</b> » + <b>limitation des ressources méthanisables et bois à 80% de leur potentiel</b>, en raison de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulté de mobilisation de la ressource biomasse (impacts environnementaux ou acceptabilité sociale sous-estimés...)</li> <li>- Et/ou difficulté technologique sur les filières les moins matures (ex : gazéification/injection)</li> </ul> |
| 75% EnR&R  | <p>Identique « <b>100% EnR&amp;R</b> » + <b>le gaz naturel est encore présent et représente 25% de la consommation.</b></p>   |

- **Partis pris :**
  - Non concurrence avec l'alimentation (aucune culture dédiée considérée)
  - Non concurrence avec les usages matières
  - Augmentation du stock de carbone stable dans les écosystèmes
  - Augmentation de la vie biologique des sols (nécessite de laisser une partie de la biomasse récoltée sur les sols)
- **Ressources issues de l'agriculture**
  - Cadrage à partir de MOSUT (outil de modélisation utilisé pour Afterres2050)
  - + Evaluation à la maille cantonale (Outil BACUS – Solagro)
  - Scénario compatible « facteur 4 »
    - Contribution du secteurs agricole facteur 2
    - un scénario « tendanciel » permettrait également de mobiliser des ressources équivalentes, mais avec plus d'impacts négatifs

- Bois
  - Bois issu de forêt : Travaux IGN 2035 + Ecofor (2100) Scénario « Sylviculture dynamique »
  - Bois hors forêt : développement Agro écologie
  - Déchets bois : + utilisation du bois et + de recyclage/récupération
- Biodéchet (Collectivité/ménage), IAA, STEU => Etude bibliographique
- Algues : Coproduits de production de filières carburant liquide, valorisés en méthanisation



# Hypothèses Power-to-gas + autres interfaces avec système électrique

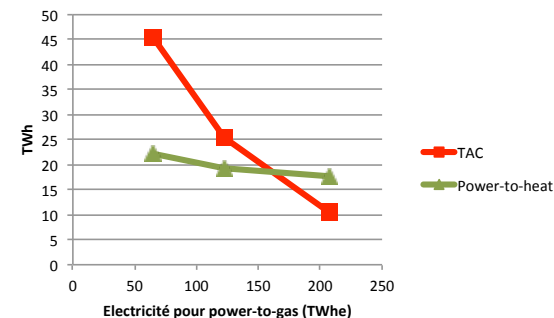
Principales hypothèses issues de l'étude ADEME :

« Un MIX électrique 100% ENR en 2050 – Quelles opportunités pour décarboner les systèmes chaleur et gaz »



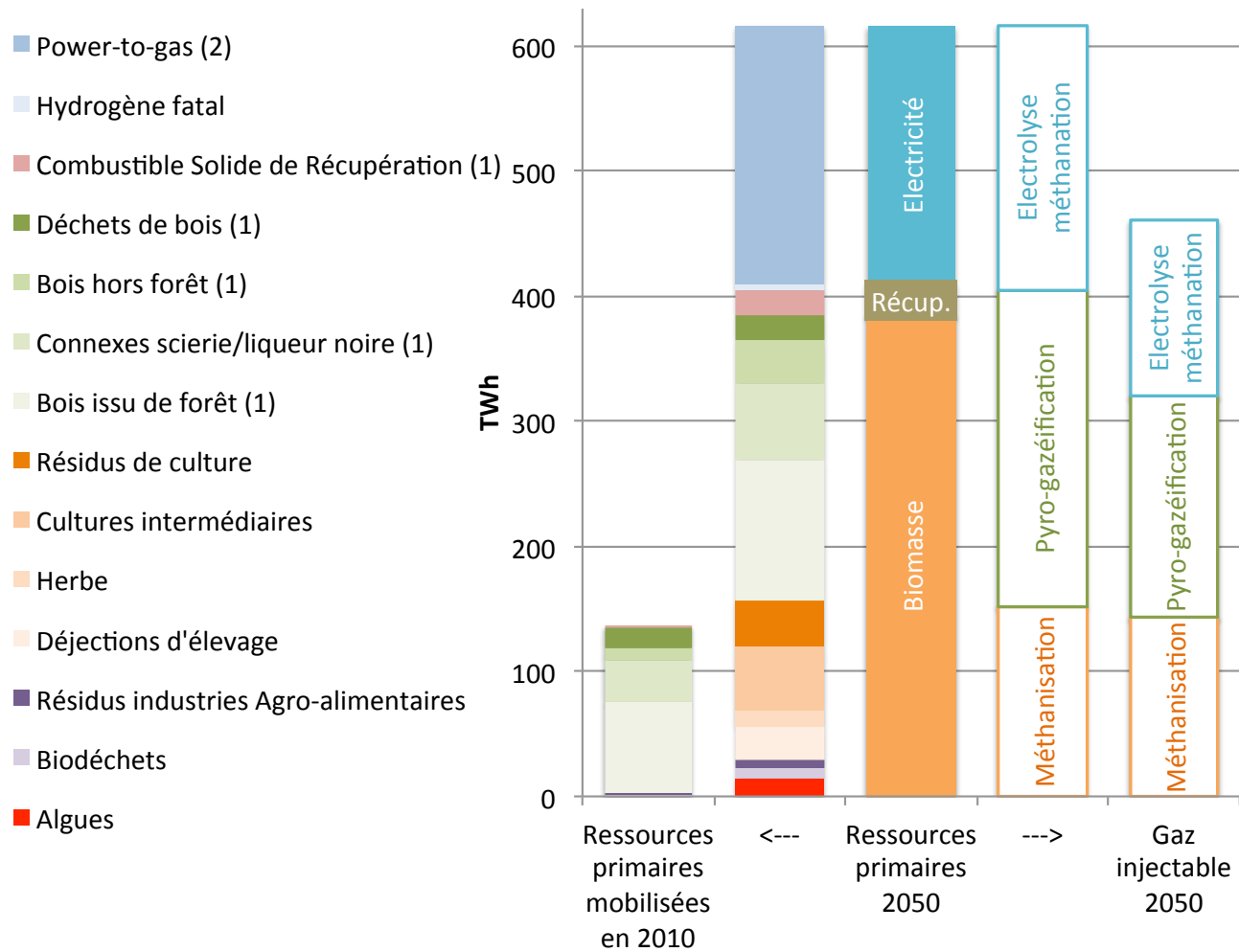
Evalue différentes configurations optimisées du système électrique avec du power-to-gas plus ou moins développé

- Description du power-to-gas (60 à 207 TWhélec)
  - Capacités installées par région
  - Profil horaire de fonctionnement
  - Coûts approvisionnement de l'électricité
- Description des autres interactions avec le système gazier
  - **Power-to-heat** : Chaudière électrique ou pompe à chaleur en substitution d'autres ressources énergétiques dont le gaz, pendant les périodes de forte production électrique
  - Besoin de **Turbine à Combustion (TAC)** gaz pour la production de pointe électrique
    - Capacités installées par région
    - Profil horaire



# Potentiels de gaz renouvelables – 460 TWh<sub>PCS</sub>

Energie en PCS, sauf (1) en PCI et (2) électricité



## Ressources 620 TWh :

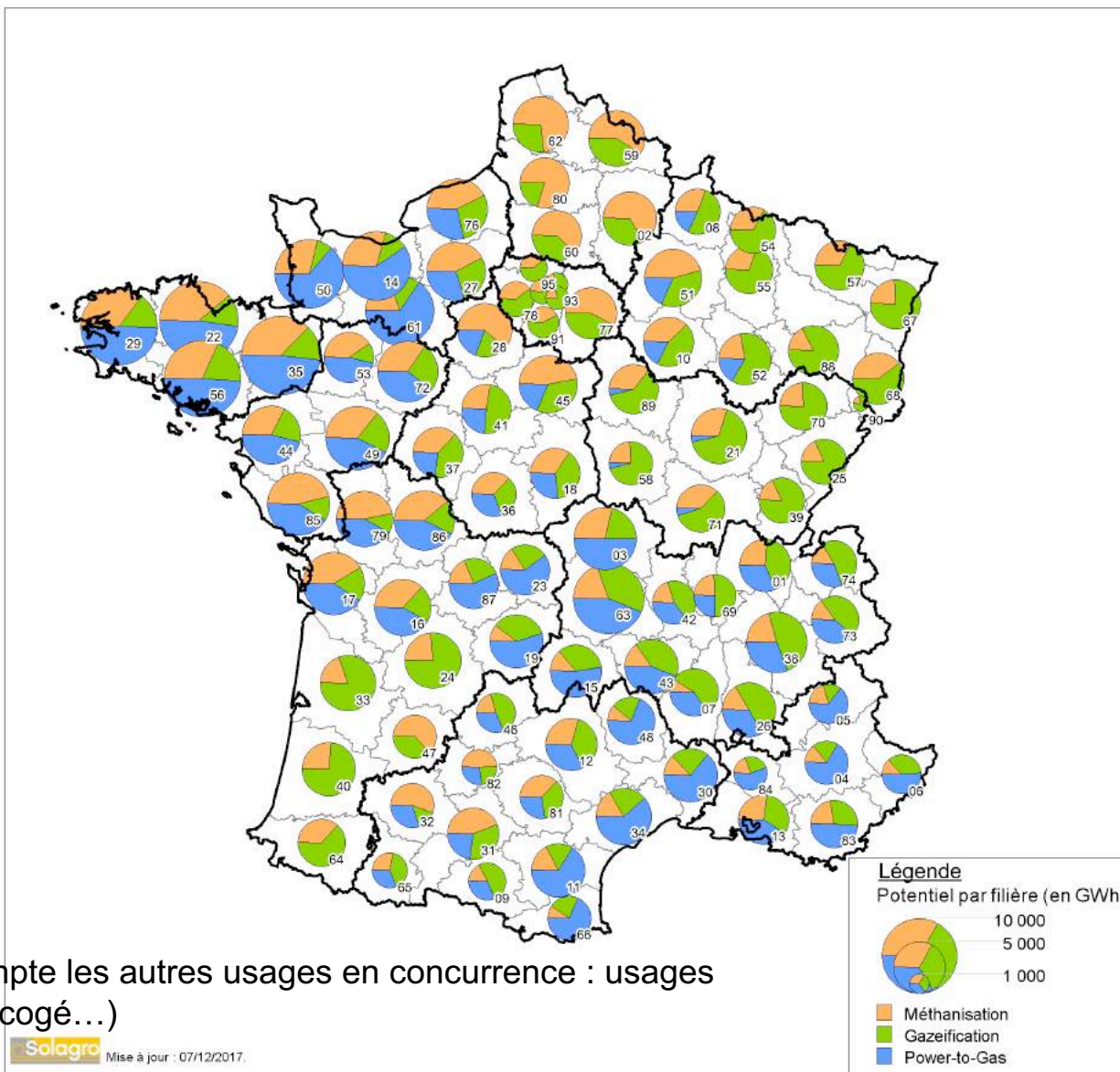
- Agricole : 130 TWh<sub>PCS</sub>
- Bois énergie : 230 TWh<sub>PCI</sub>
- Biodéchet+IAA : 15 TWh<sub>PCS</sub>
- Algues : 14 TWh<sub>PCS</sub>
- CSR : 20 TWh<sub>PCI</sub>
- H2 fatal : 0,3 TWh<sub>PCS</sub>
- Power-to-gas : 210 TWh<sub>e</sub>

## Potentiel injectable 460 TWh<sub>PCS</sub>

- 140 TWh<sub>PCS</sub> par méthanisation
- 180 TWh<sub>PCS</sub> par pyro-gazéification
- 140 TWh<sub>PCS</sub> par power-to-gas

Ne prend pas en compte l'utilisation des mêmes ressources pour d'autres usages que le gaz injectable

# Répartition géographique du potentiel gaz injectable

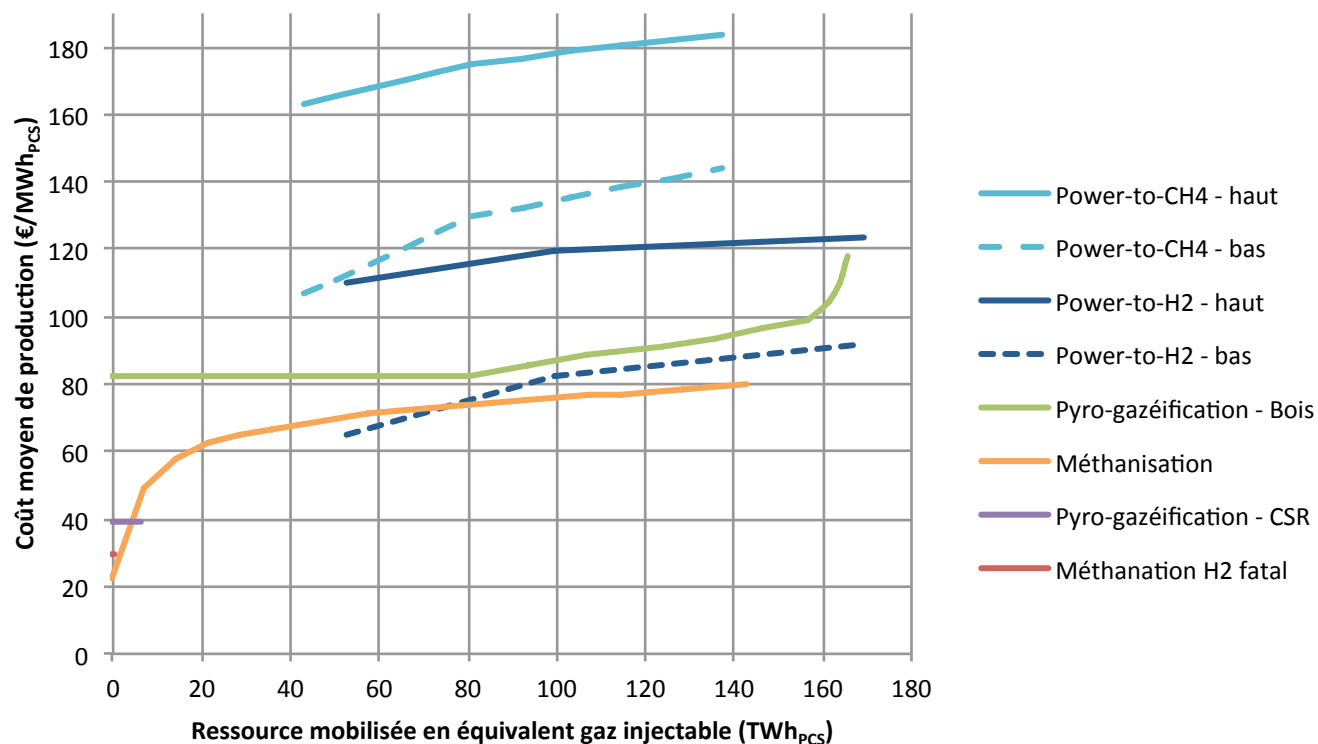


Sans prendre en compte les autres usages en concurrence : usages directs (combustion, cogé...)

Solagro Mise à jour : 07/12/2017.

# Coûts de production des gaz renouvelables

- Méthanisation  $\leq 80\text{€/MWh}$
- Pyrogazéification entre 80 et 120 €/MWh (sauf CSR à 40 €/MWh)
- Power-to-gas entre 65 à 185 /MWh
  - 65-125 €/MWh PtH2
  - 105-185 €/MWh PtCH4

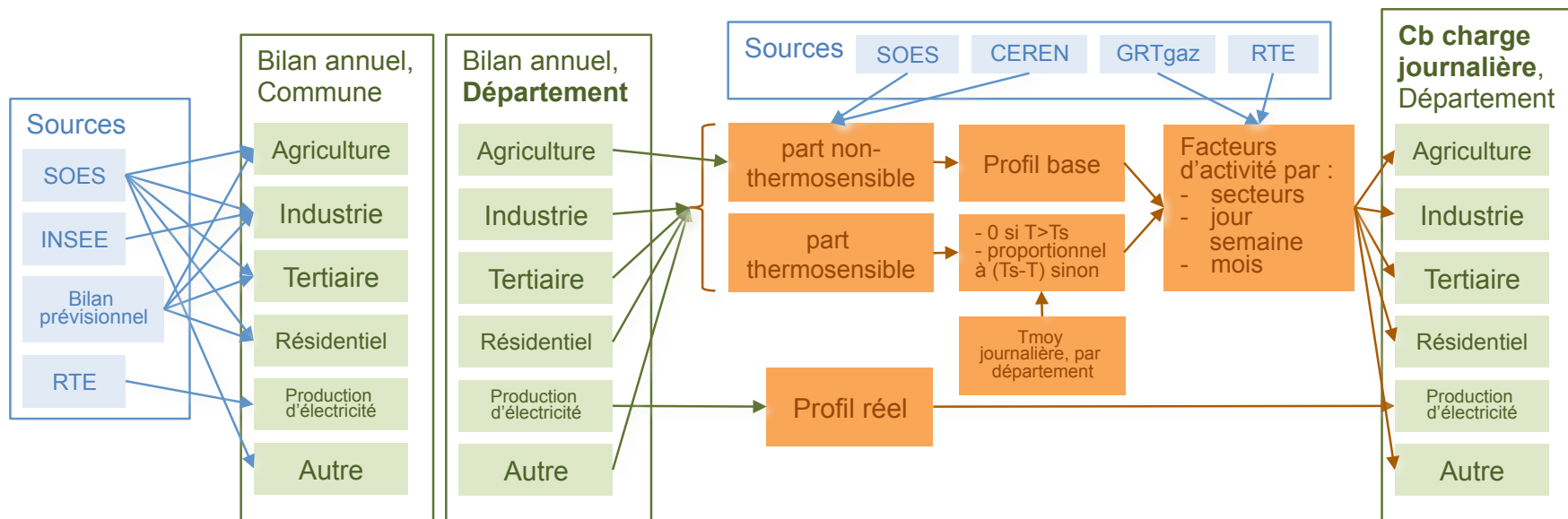


## Notes :

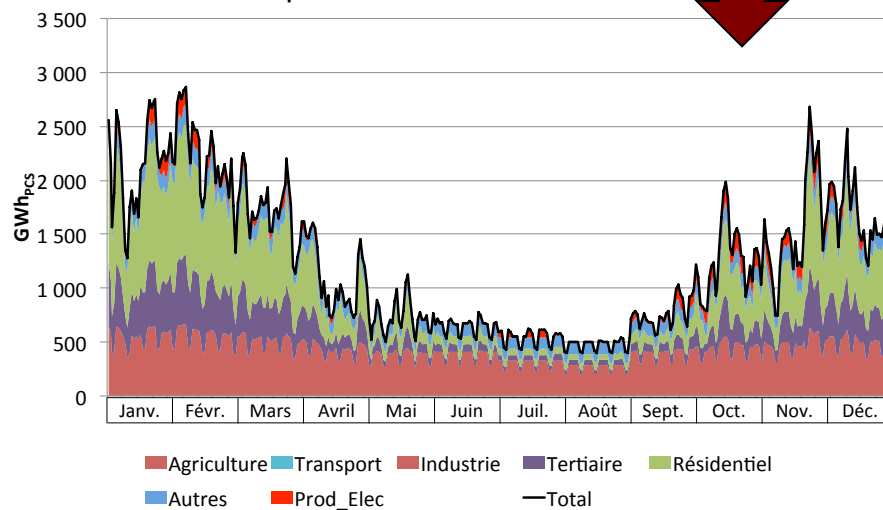
- Pour les filières de méthanisation et de pyrogazéification-bois, les coûts de production dépendent du niveau de mobilisation globale des ressources en biomasses, qui inclut les ressources mobilisées pour d'autres usages que la production de gaz injectable (combustion).

- LCOE avec taux actualisation 5%

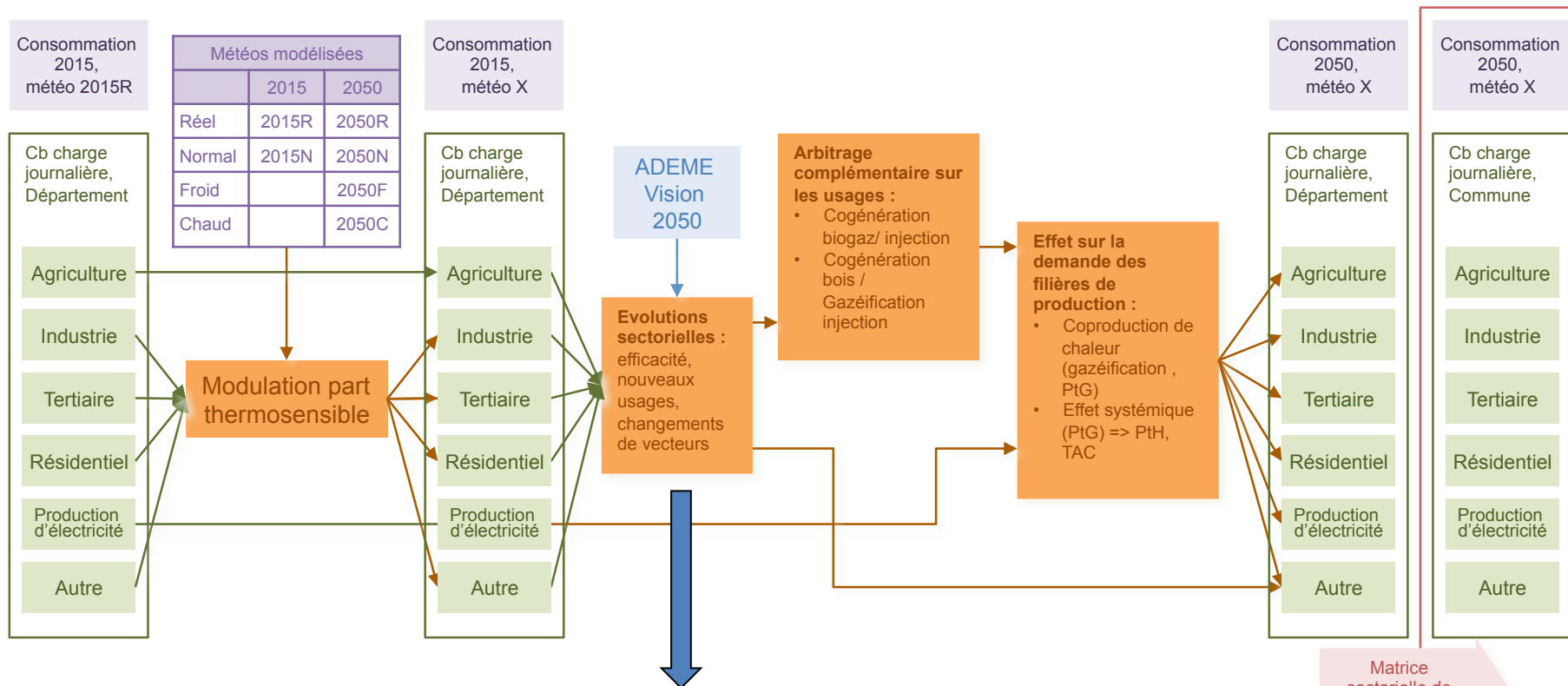
# Modélisation de la demande – Reconstitution courbe de charge



2015 – températures réelles



# Modélisation de la demande – Projection 2050 + variantes météo

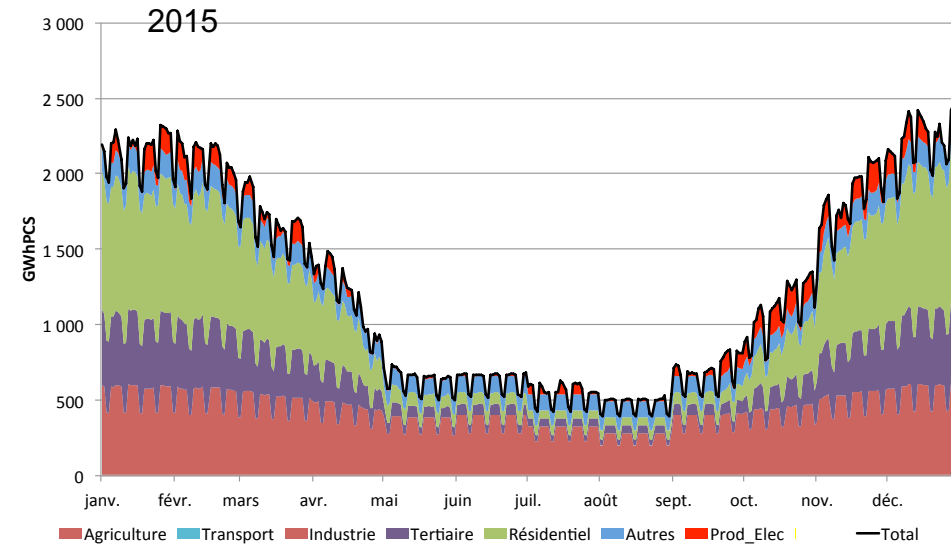


| TWh                         | 2015         | 2050         | Evol        |
|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|
| Agriculture                 | 2,9          | 2,0          | -30%        |
| Industrie                   | 152,5        | 99,3         | -35%        |
| Tertiaire                   | 85,3         | 13,2         | -84%        |
| Résidentiel                 | 150,8        | 49,2         | -67%        |
| Transport                   | 0,0          | 106,1        | -           |
| Autres                      | 45,2         | 16,4         | -64%        |
| <b>Total hors prod élec</b> | <b>436,5</b> | <b>286,3</b> | <b>-34%</b> |

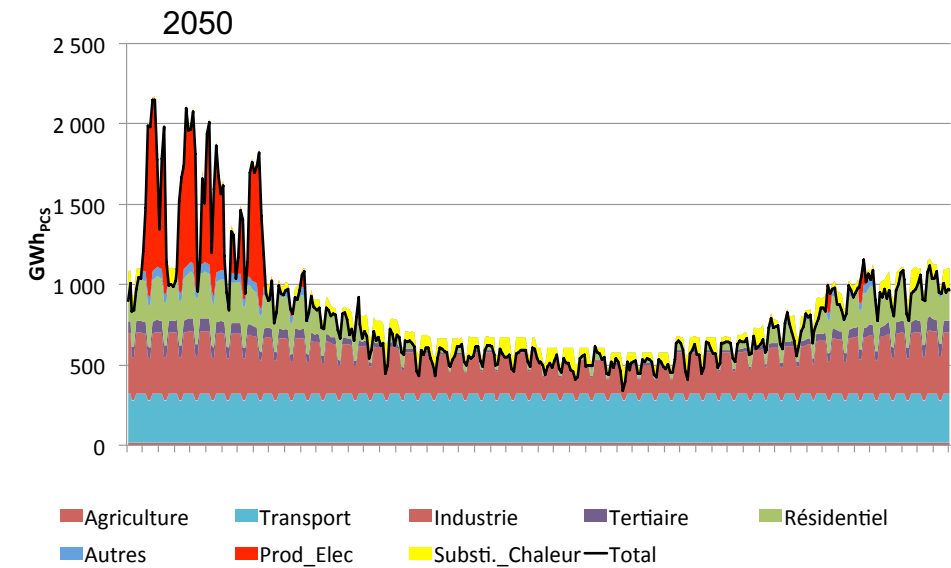
Matrice sectorielle de conversion 2015

4 études de cas départementaux

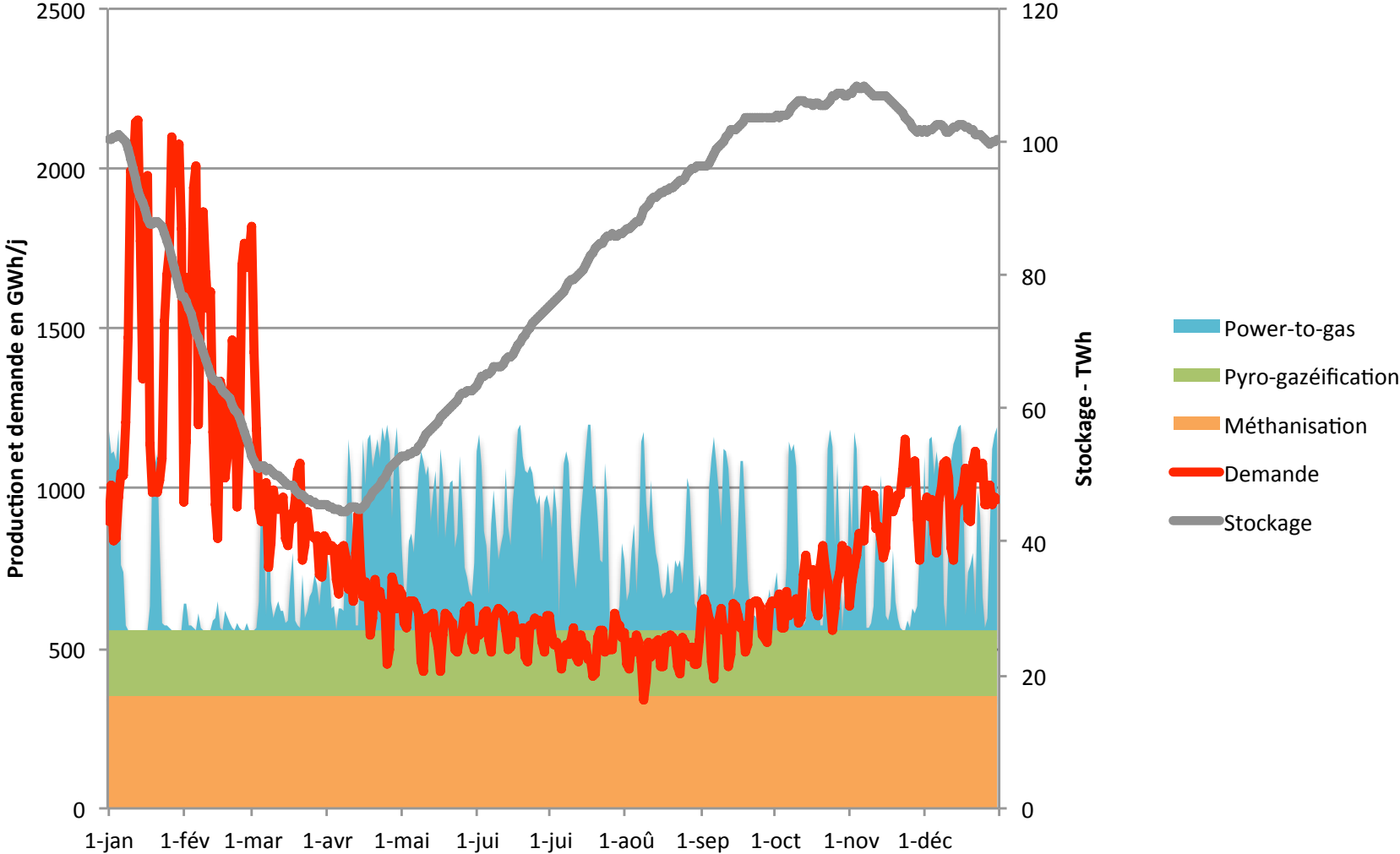
# Courbe de charge - demande



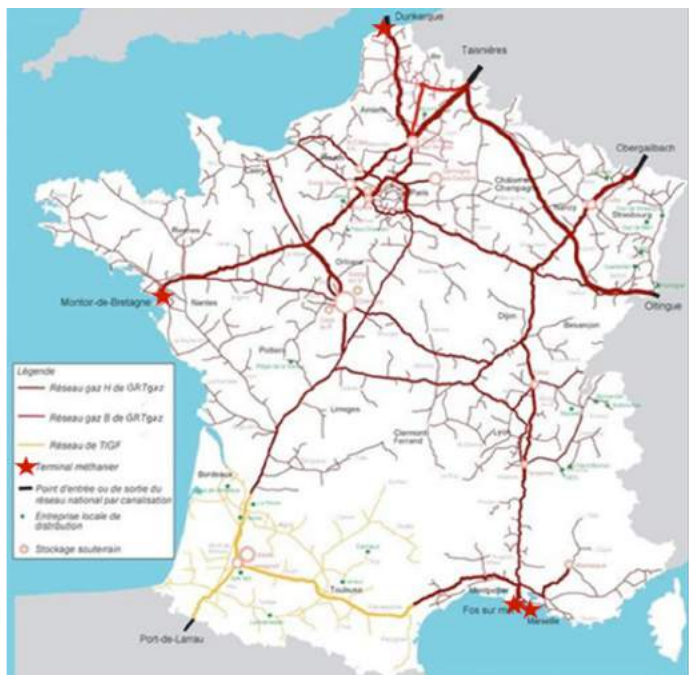
- Forte baisse de la demande en hiver
- En été, la baisse des usages traditionnels est compensée par le nouvel usage « gaz carburant »
- La demande gaz reste importante (dépend des scénarios) pour la production électrique avec des puissances d'appel plus élevées et plus concentrées qu'aujourd'hui



# Equilibrage offre - demande







## Réseau actuel :

- **Infrastructure composée de :**
  - Points d'entrée de gaz : gazoduc ou terminaux méthanier (<10)
  - Réseau de transport (40-70 bar) / réseau de distribution (16-0,4 bar)
  - Stockages souterrains (16 stockages = 132 TWh)
- **Fonctionnement :**
  - Type « écoulement gravitaire » : de la haute pression (points d'entrée / Stockage) vers la basse pression

## Passage au 100% gaz ENRR, 2 principaux enjeux :

- Raccordement de la ressource (méthanisation, gazéification, power-to-gas)
  - => env. 8 000 unités de production
- Equilibrage offre-demande :
  - Temporel
  - Géographique

# Evaluation des coûts de raccordement (inclus maillage et rebours)

## Ressources difficilement transportables

Méthanisation + power-to-gas associé

Evaluation détaillée des coûts de raccordement sur 4 départements type

Positionnement d'unités type de méthanisation en fonction des densités de ressources à la maille cantonales

Algorithme d'optimisation de raccordement du parc

- raccordement réseau de distribution / réseau de transport
- gaz porté
- Maillage
- Rebours

Généralisation des coûts de raccordement à tous les départements par association aux 4 départements type (Somme, Cher, Vendée, Drome)

## Ressources mobiles ou positionnées sur des réseaux de grandes capacités

Pyrogazéification + autre power-to-gas

Hypothèses de raccordement standard (pas d'enjeu sur la capacité d'injection)

### Injection portée



Station de liquéfaction et analyseur



Station de réception et déconditionnement

Poste d'injection sur le réseau de distribution

Réseau de distribution de gaz existant

### Raccordement au réseau de distribution



Poste d'injection sur le réseau de distribution

Réseau de distribution de gaz existant

### Raccordement au réseau de transport



Compresseur

Poste d'injection sur le réseau de transport

Réseau de transport de gaz existant

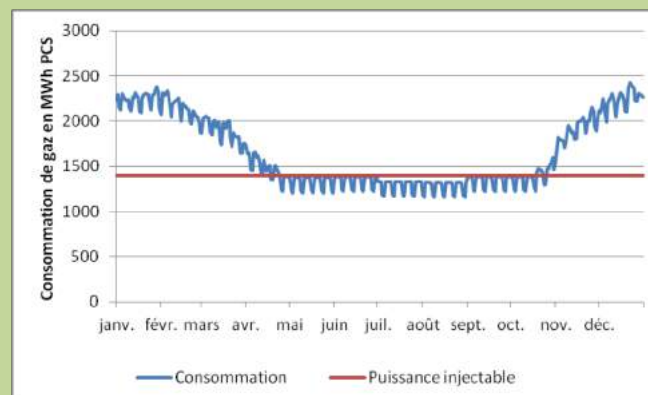
Maillage du réseau de distribution

Poste de détente HP/MP

Rebours

AEC  
expertise & conseil

### Exemple raccordement sur réseau de distribution



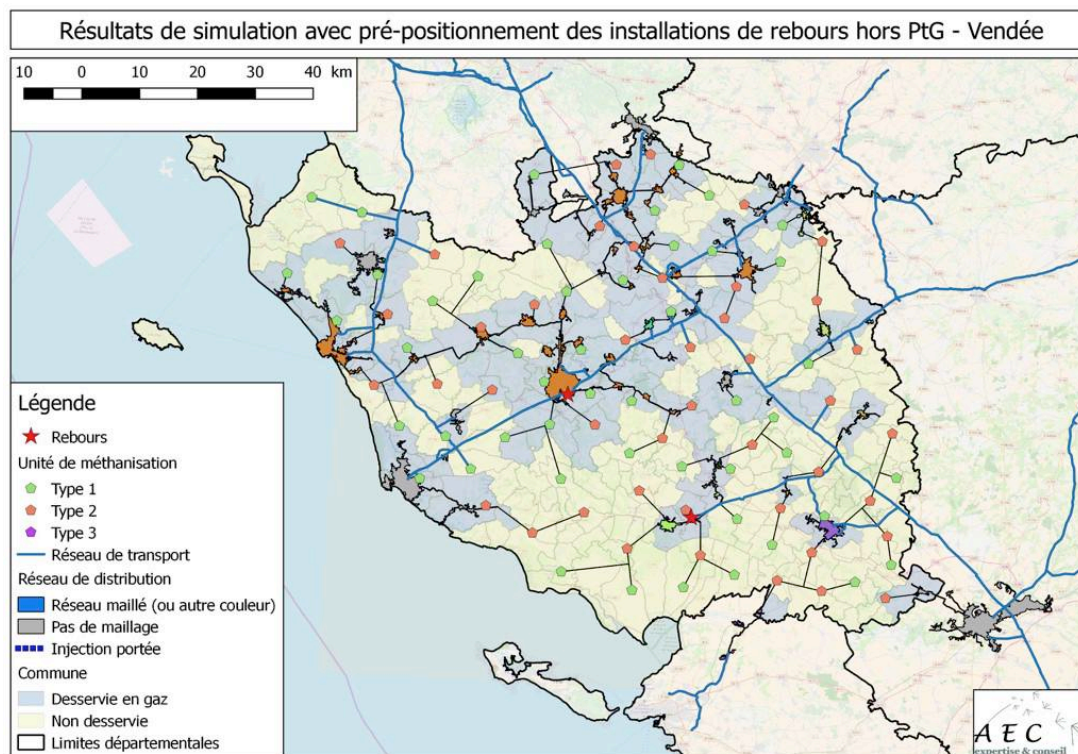
- Pré-positionnement de rebours :

Gains importants sur les coûts de raccordement (Passage de 5,1 €/MWh à 3,0 €/MWh en valeur moyenne pondérée pour la Vendée) => **Intérêt de la planification du développement des réseaux avec mutualisation des coûts de développement ( S3REnR gaziers )**

- Configuration réseau :

Majorité des **raccordements en distribution**

Réseau très maillé, beaucoup d'autoconsommation.

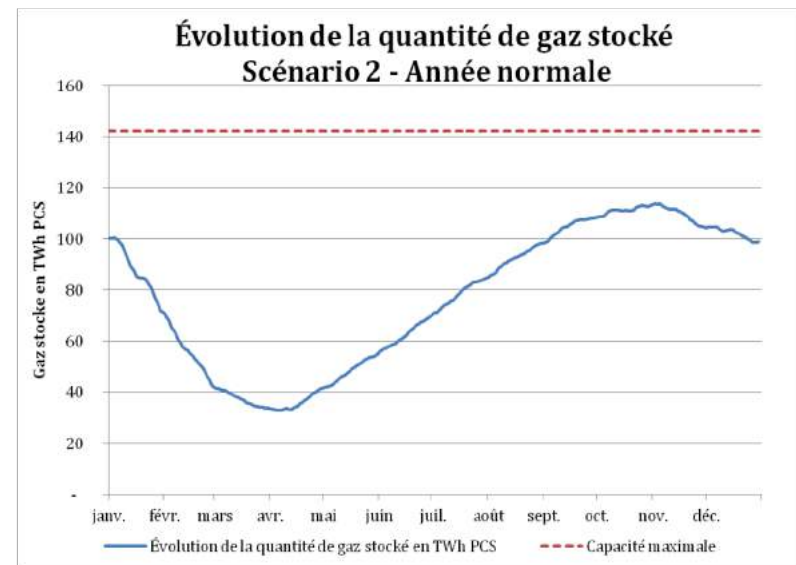
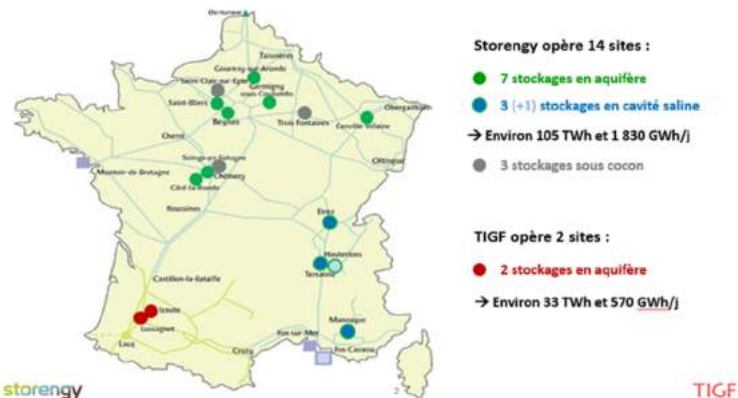


- Capacités de stockage existantes importantes dès à présent.
- Pour tous les scénarios, tous les jeux de données climatiques :
  - **Utilisation partielle en volume et en débit des capacités existantes.**
- Compensation déficit de gaz en année froide/excès de production en année chaude.
  - **Résilience du système**

La Programmation Pluriannuelle de l'Énergie fixe le périmètre des stockages souterrains nécessaires à la sécurité d'approvisionnement en gaz de la France

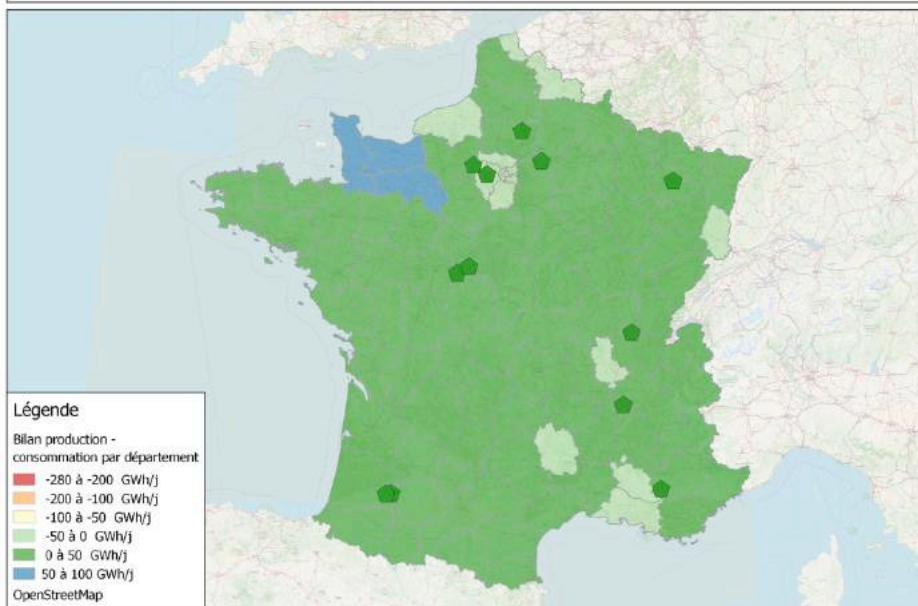
Décret PPE du 27 octobre 2016 (art. 9) :

sites en exploitation : 137,9 TWh en volume et 2 372,5 GWh/j en débit de soutirage de pointe  
→ Ratio volume/débit égal à 58 jours

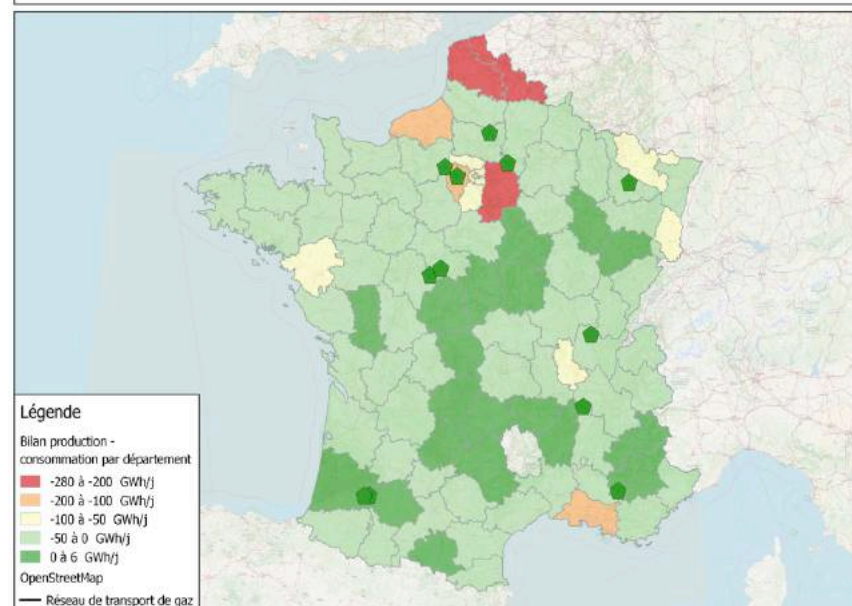


- Au national :
  - Pics de consommation semblables aux pics actuels (localisation et volume)
  - Pics de production diffus
- Pour le réseau de transport :
  - Pas de renforcements majeurs à priori
  - Besoins de **modification des stations de recompression** (bidirectionnel)
  - Volume de **gaz transité plus faible**

Structure du réseau de gaz - Pic de production Scénario 2 climat chaud



Structure du réseau de gaz - Pic de consommation Scénario 2 climat froid

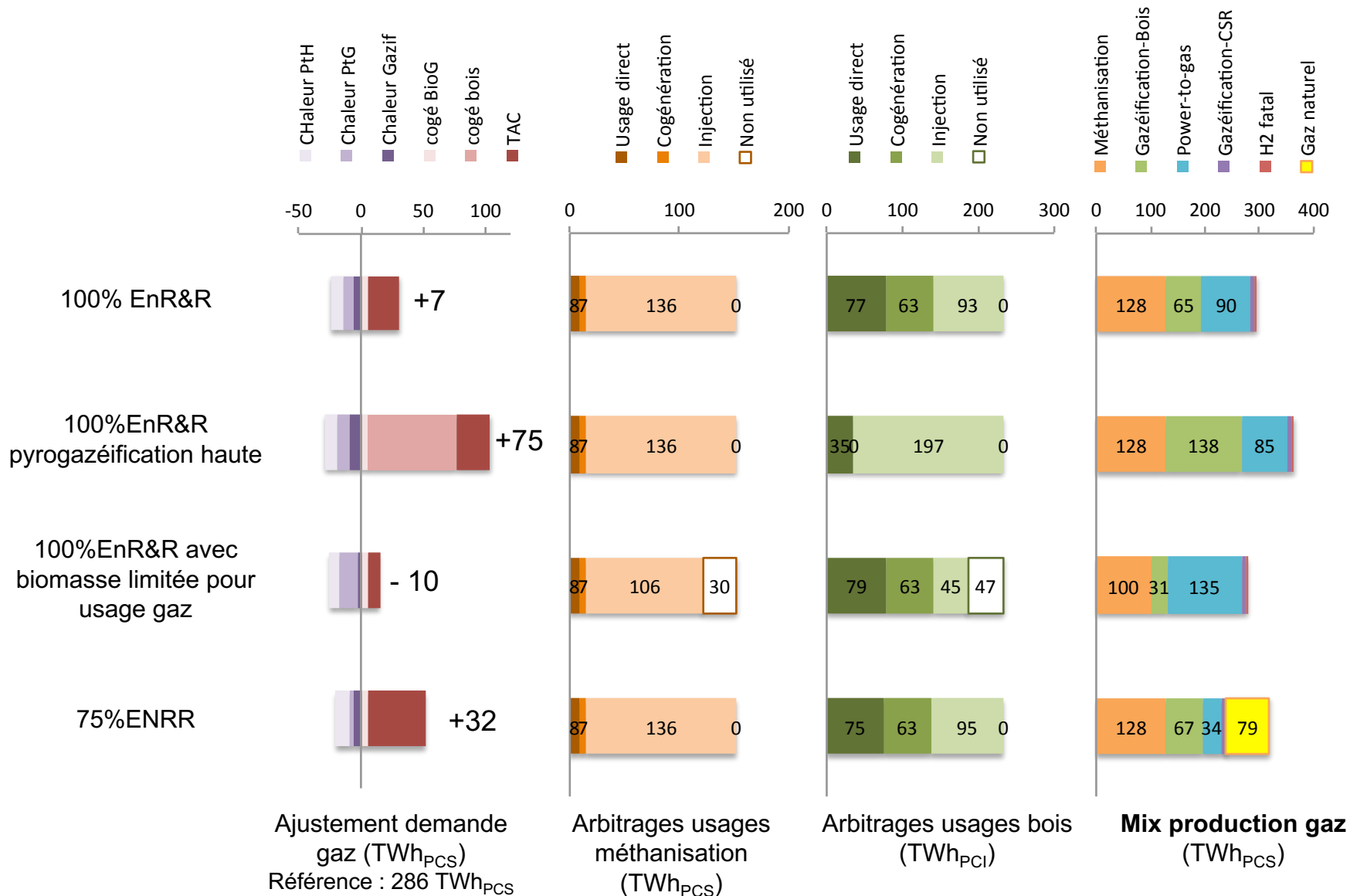




# Résultats et principaux enseignements

| Nom  | Description   |
|--|---|
| 100% EnR&R   | <p><b>Scénario le plus proche du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Substitution d'une partie de la cogénération biogaz et bois</li> </ul>  |
| 100% EnR&R<br>avec<br>pyrogazéification<br>haute         | <p><b>Vecteur gaz est renforcé :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cogénération biogaz en partie substituée</li> <li>- <b>Cogénération bois supprimée au profit de la gazéification/injection</b></li> <li>- <b>Réseau de chaleur bois supprimé au profit de la gazéification/injection</b></li> </ul>   |
| 100% EnR&R<br>avec biomasse<br>limitée pour<br>usage gaz | <p>Identique « <b>100% EnR&amp;R</b> » + <b>limitation des ressources méthanisables et bois à 80% de leur potentiel</b>, en raison de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Difficulté de mobilisation de la ressource biomasse (impacts environnementaux ou acceptabilité sociale sous-estimés...)</li> <li>- Et/ou difficulté technologique sur les filières les moins matures (ex : gazéification/injection)</li> </ul> |
| 75% EnR&R  | <p>Identique « <b>100% EnR&amp;R</b> » + <b>le gaz naturel est encore présent et représente 25% de la consommation.</b></p>   |

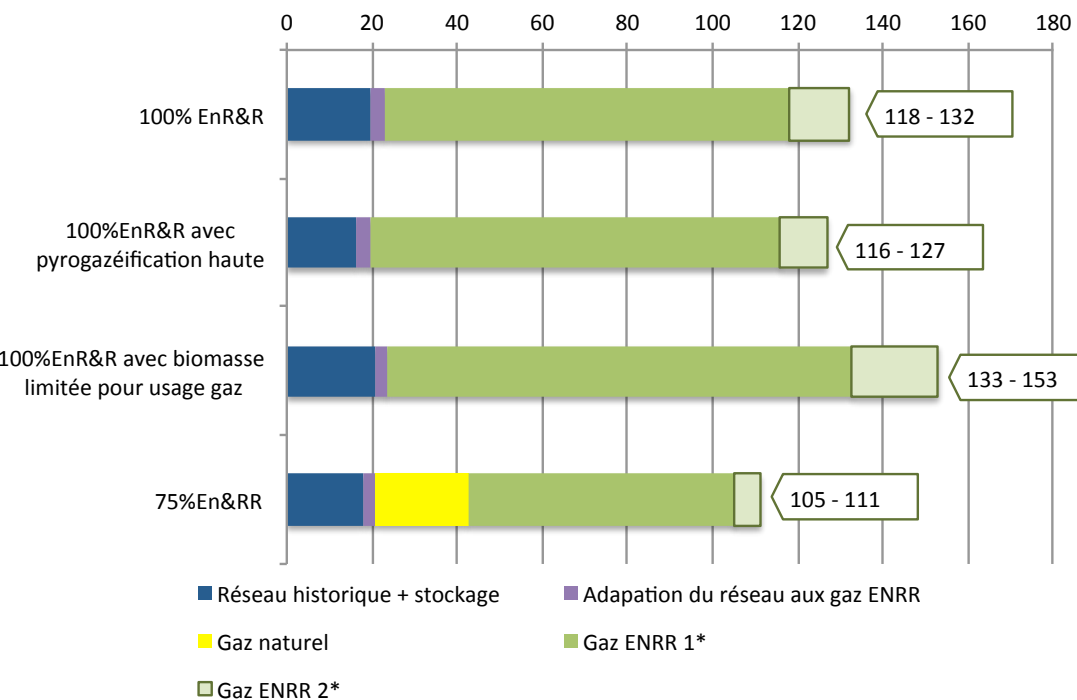
# Résultats scénarios – Composition du mix de production





# Bilan économique du système gazier

Coût du MWh gaz consommé  
€/MWh



- Coût du gaz entre 100 et 150 €/MWh<sub>PCS</sub> selon les scénarios
- Les deux premiers scénarios ont des coûts similaires, malgré un périmètre de l'usage gaz différent (+23% de demande pour « pyrogazéification haute »)
- « 100%EnR&R avec biomasse limitée pour usages gaz », la baisse de contribution par la biomasse est compensé par le power-to-gas plus cher, et induit un surcout de 14%.
- « 75%ENRR » : le maintien du gaz naturel à hauteur de 25% permet réduire les couts de 10 à 20%

- La part réseau est faible entre 15% et 20 % du coût total, et en particulier les seuls coûts de raccordement (dont maillage et rebours) représente que 3%.
- En comparaison à un approvisionnement 100% gaz naturel, les scénarios permettraient d'éviter entre 45 et 67 Mt<sub>CO2</sub>/a (1)

- **Un système gazier compatible avec le 100% gaz EnR&R**
  - Le réseau permet d'aller chercher la majeure partie de la ressource avec un recours faible au gaz porté
  - Différentes solutions technologiques existent déjà pour rendre le réseau de gaz bidirectionnel (rebours, maillage), la maîtrise des coûts nécessite d'anticiper leur déploiement
  - Infrastructure de transport et stockage reste un élément clé pour l'équilibrage offre-demande
- **Interactions fortes entre réseau gazier et électrique**
  - Le gaz sert aux besoins de pointe du système électrique (de 10 à 46 TWh<sub>PCS</sub>)
  - Le power-to-gas permet
    - un stockage inter-saisonnier de l'électricité et une optimisation géographique de son réseau
    - une ressource importante en gaz renouvelable pour le vecteur gaz (de 34 à 135 TWh<sub>PCS</sub>)
- **Le 100% gaz ENR ne se fera pas sans des évolutions importantes au delà du système gazier :**
  - le secteur agricole, avec notamment la généralisation des cultures intermédiaires et du méthaniseur comme outil énergétique et agronomique
  - le secteur forestier et l'industrie du bois avec le développement d'une sylviculture dynamique et durable (bilan carbone positif, maintien de la biodiversité) respectant la hiérarchie des usages (bois matière puis bois énergie).

- Tout comme l'étude « Mix électrique 100% ENR »
  - L'étude « 100% gaz ENRR » n'est pas une optimisation globale du système énergétique
  - L'étude ne modélise pas la trajectoire entre aujourd'hui et 2050
- L'étude n'évalue pas un certain nombre d'externalités positives :
  - Réduction du déficit commercial (actuellement le gaz du réseau est importé à 100% pour environ 10 G€)
  - Augmentation de l'indépendance énergétique
  - Développement d'emplois locaux (environ 8 000 unités de production)
- D'autres scénarios pourraient être modélisés avec des répartitions différentes entre les usages de la biomasse, les usages finaux du gaz...
- Le potentiel de ressource biomasse et sa mobilisation présentent des incertitudes
  - Acceptabilité sociale des projets
  - Bilan environnemental des filières
- L'ADEME prévoit une évaluation macro-économique pour 2019





# Compléments

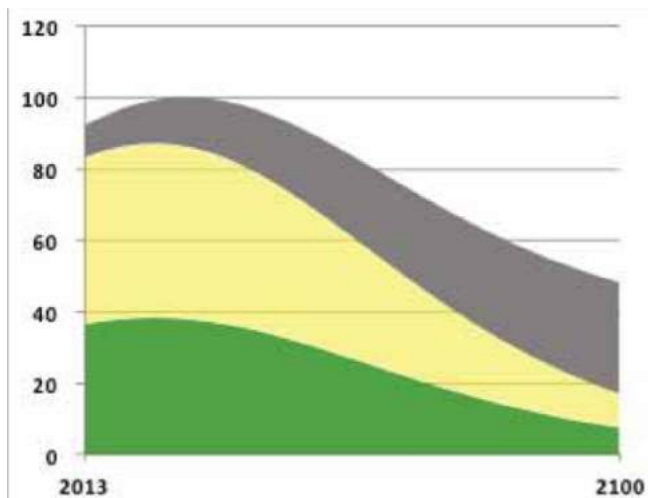
# Puits de carbone forestier : ONF/ECOFOR, 2015

Mm<sup>3</sup>

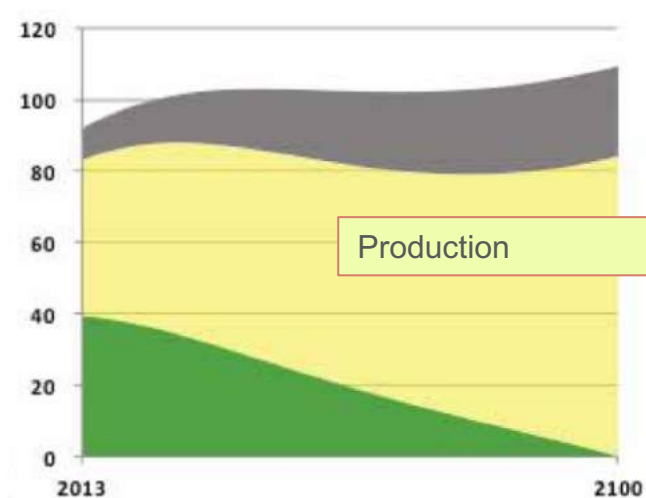
- Mortalité
- Prélèvements
- Accumulation

➤ La prise en compte du long terme favorise les scénarios de type « sylviculture dynamique »

Scénario sylviculture constante

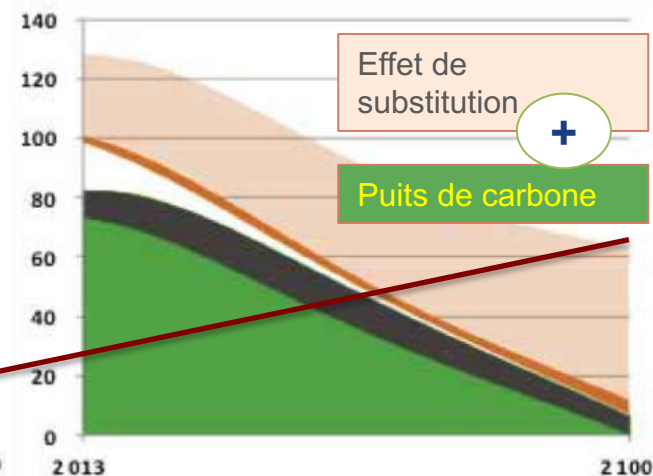
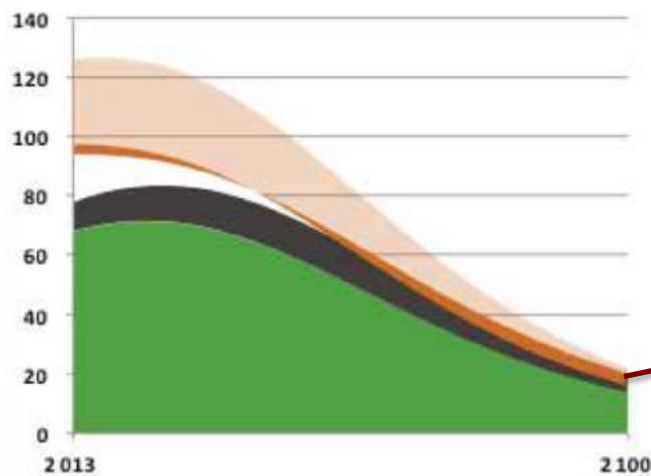


Scénario sylviculture dynamique



MtCO<sub>2</sub>

- substitution
- produits
- sols
- bois mort
- croissance

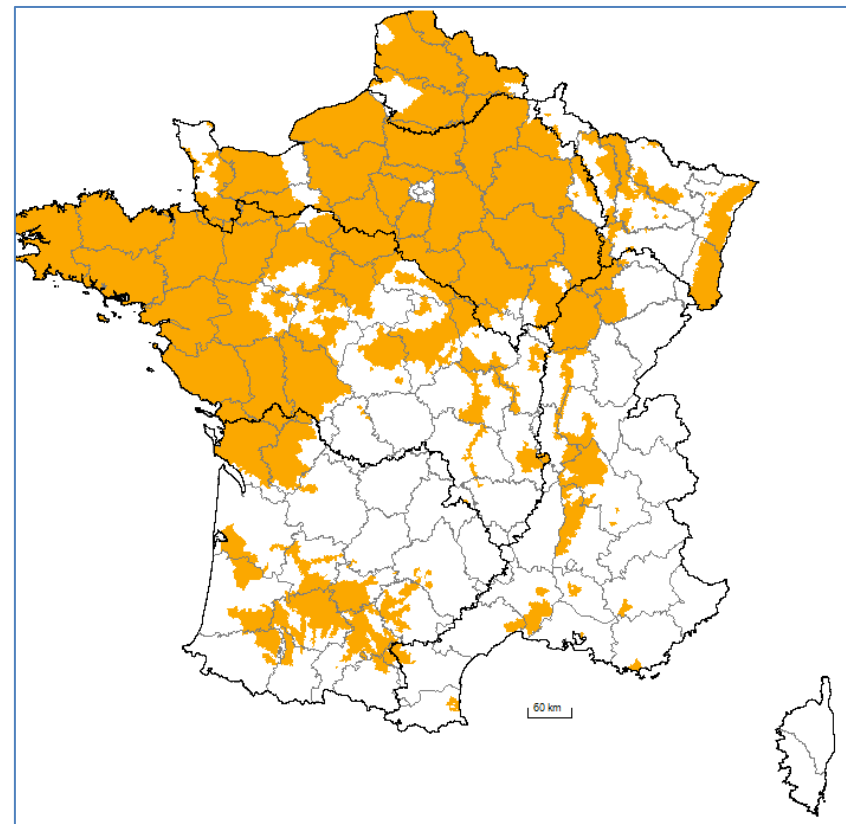


Source : *travaux exploratoires* de J-L. Peyron, ECOFOR, in « Climat, Forêt, Société – Livre Vert », Y. Caulet, Nov. 2015

## Qu'est-ce qu'une culture intermédiaire ?

*Une culture intermédiaire est une culture semée après la récolte de la culture annuelle principale et qui remplit différentes fonctions agro-environnementales (piégeage de l'azote résiduel, lutte contre l'érosion) ou économiques (production de biomasse récoltable).*

- Couverts végétaux : éviter que le sol reste nu après la récolte :
  - Réduire les phénomènes d'érosion,
  - Réduire développement des mauvaises herbes (les adventices)
  - Réduire lessivage des minéraux ;
  - Améliorer la structure du sol et le stockage de carbone par leur système racinaire ;
  - Augmenter la biodiversité
- CIPAN : obligation dans certaines zones
- CIVE : fonction supplémentaire de production de biomasse
- **CIMSE : Culture intermédiaire multi-services environnementaux**



Carte des zones vulnérables 2012 (developpement-durable.gouv.fr)

## Quelle différence entre CIPAN et CIVE ?

*A la différence d'une CIPAN, une CIVE est implantée dans l'optique d'une récolte, son itinéraire technique est raisonné de façon à maximiser la biomasse produite.*

- CIPAN : obligation dans certaines zones
- CIVE ou CIMSE : fonction supplémentaire de production de biomasse
  - Différences :
    - choix de variétés,
    - techniques de semis,
    - date d'implantation, de récolte, de fertilisation,
- Une CIVE ou CIMSE peut fréquemment atteindre voire dépasser 6 tMS/ha, tandis qu'un couvert implanté dans une logique CIPAN produit généralement de l'ordre de 1 à 2 tMS/ha.



**Photo Sylvain Marsac, ARVALIS,**  
Semé avant le 15 juillet et avec une bonne disponibilité en eau, le rendement du sorgho CIVE dépasse 6 t MS/ha.



# Bilan simplifié flux de carbone



tMS / ha

- Matière
- CIMSE
- Gaz
- Digestat

