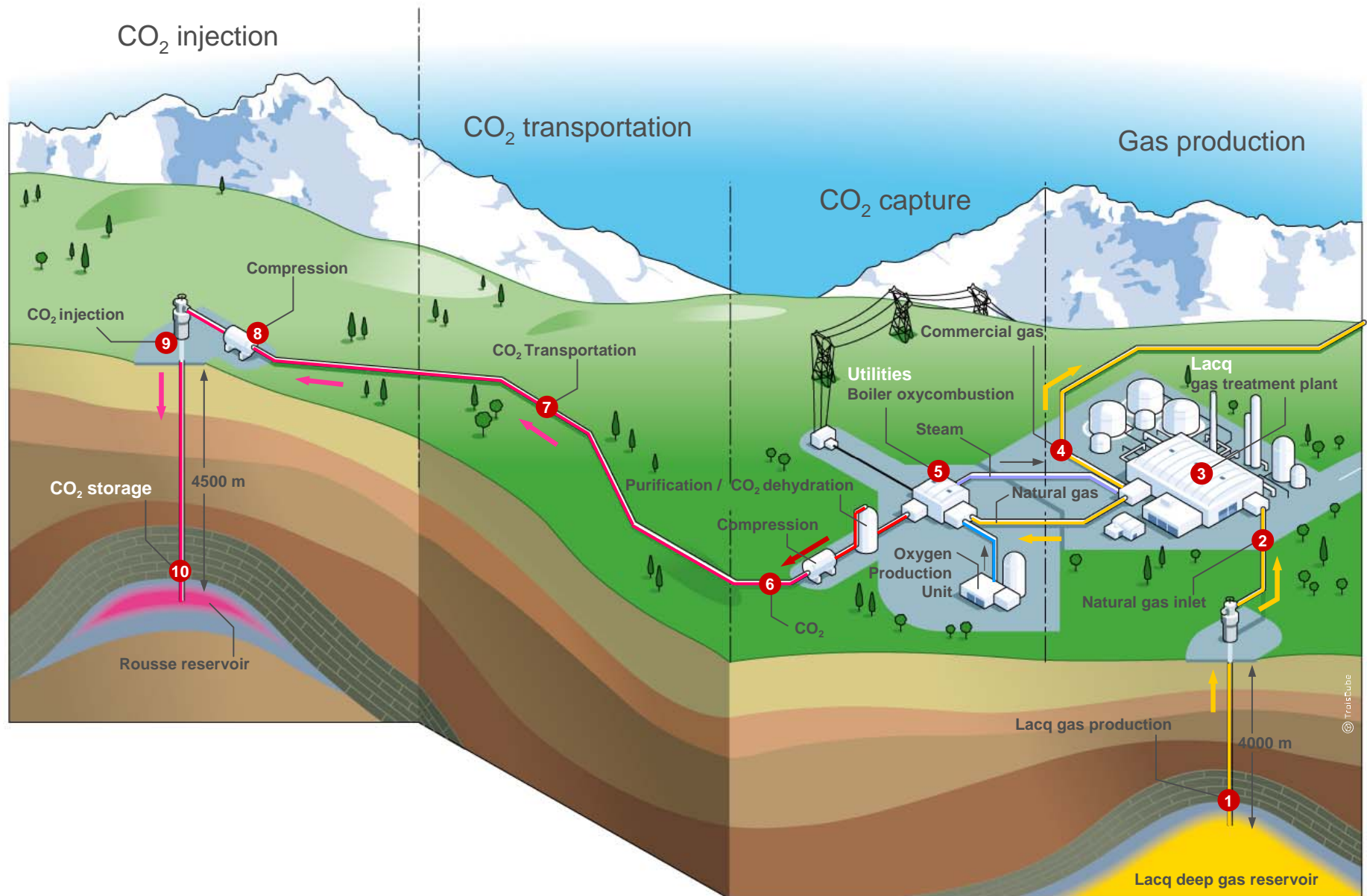


Le programme du pilote de démonstration de captage et de stockage géologique de Lacq

**Conférence - débat: La séquestration du CO2
Académie des Sciences - Paris - 19 Mai 2009**

Nicolas Aimard
Total Exploration Production – Recherche et Développement
Chef du projet Maîtrise des Gaz Résiduels

Un projet intégré de démonstration de captage et stockage géologique de CO₂ lancé en 2007

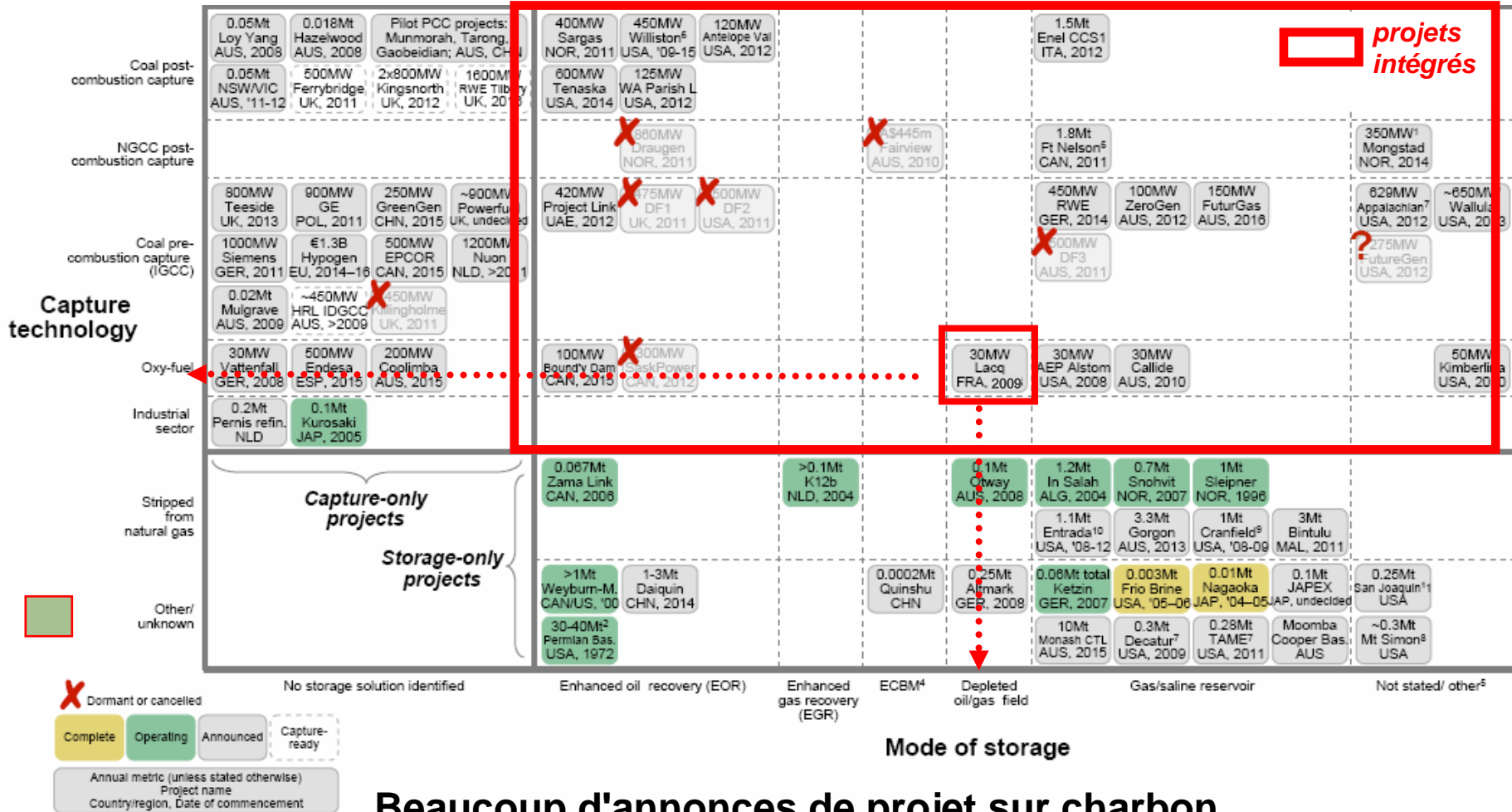


Un pilote industriel porté par la Recherche et Développement de Total Exploration Production



- ▶ **Tester à l'échelle industrielle l'oxycombustion comme procédé innovant de production de vapeur associée au captage du CO₂ dans des applications de production chaude d'huile extra lourde**
 - ✓ 50% d'amélioration de l'efficacité énergétique du captage par rapport aux amines classiques
 - ✓ 50% de réduction des coûts unitaire de captage par rapport aux amines classiques
 - ✓ Faisabilité du revamping sur chaudières existantes
- ▶ **Développer et mettre en oeuvre sur un cas réel une méthodologie de qualification et de surveillance d'un site de stockage du CO₂ pour les applications futures à grande échelle**
- ▶ **Tester et démontrer la faisabilité d'une chaîne complète de captage, transport et stockage du CO₂**

Un projet parmi d'autres projets de démonstrations annoncées, en cours ou en opération

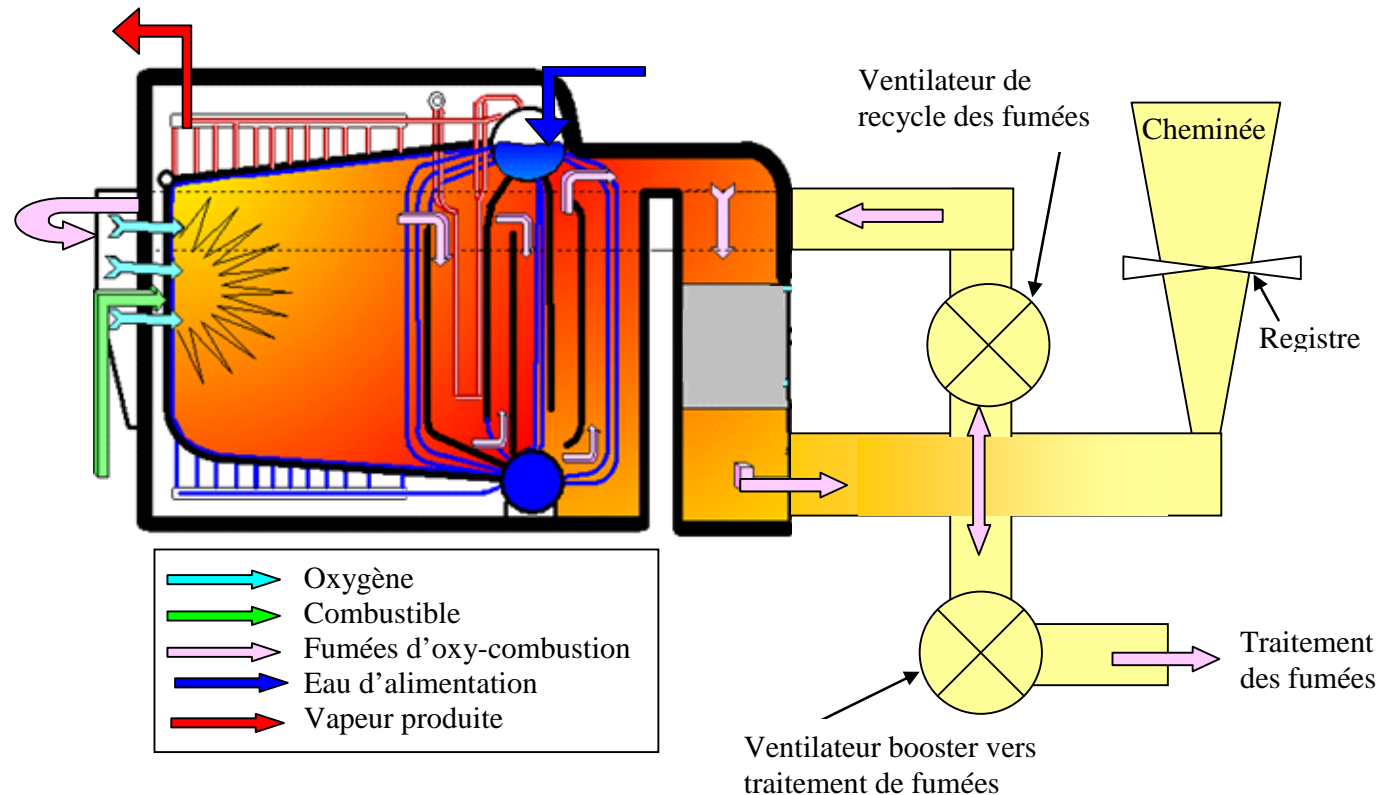


**Beaucoup d'annonces de projet sur charbon,
peu sur le gaz naturel ou autre combustible
quelques projets en suspend
et très peu de réalisations concrètes avant 2011**

La conversion d'une chaudière en oxycombustion

➤ Conversion d'une chaudière en combustion à l'air en chaudière combustion à l'oxygène

➤ 40 t/h de vapeur
60b/450°C (30MW_{th}) pour le réseau vapeur HP de Lacq



- Mise en service 1957.
- Modifications réalisées par Alstom
- Oxybrûleurs développés et fournis par Air Liquide

Construction à Lacq en 2008



Air Separation Unit



30 MW Oxyboiler



CO2 treatment: scrubbers



CO2 compressor

Lacq construction site end 2008

Site de Lacq en Mars 2009

Lacq : ensemble compression



Lacq : Système de traitement des fumées



Lacq : unité déshydratation CO₂

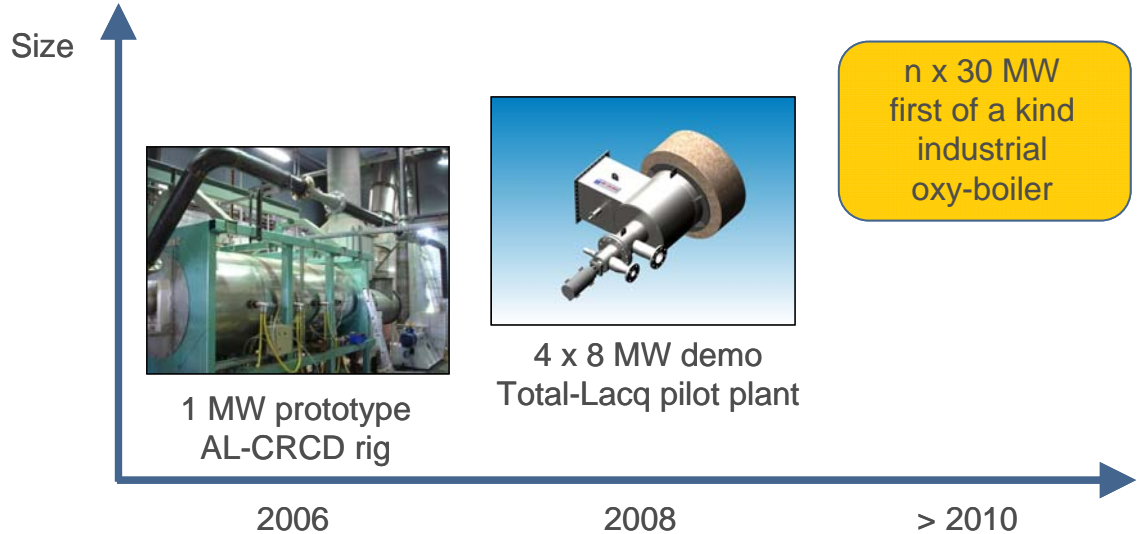
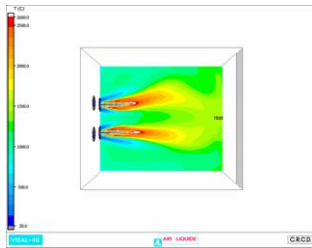


Oxycombustion : du Pilote de Lacq à l'échelle industrielle

Passer de 30 MW à 300-500 MW à l'horizon 2015

► Upscaling des brûleurs:

- Design
- Modélisation CFD



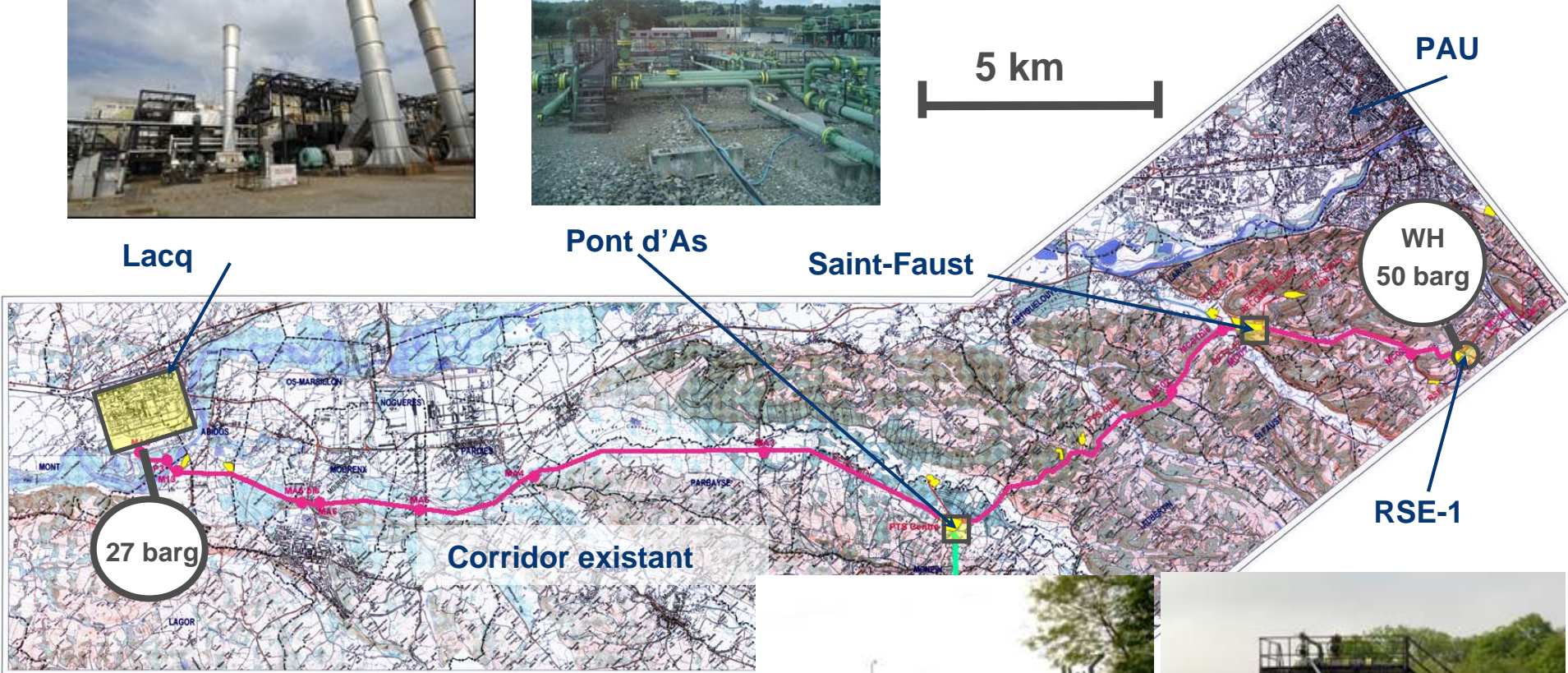
► Mise à l'échelle industrielle d'une chaudière à oxy-combustion:

- Expérience pilote de Lacq: calage des modèles de transfert thermique chaudière, opérabilité, taux de charge, taux de recycle, arrêt/redémarrage
- Coopération Total / Air Liquide / Chaudiériste

Le transport du CO2



5 km



CO2	92,0%
O2	4,0%
Ar	3,7%
N2	0,3%



Injection sur le site de Rousse



Le stockage à Rousse: un pilote en réservoir déplété

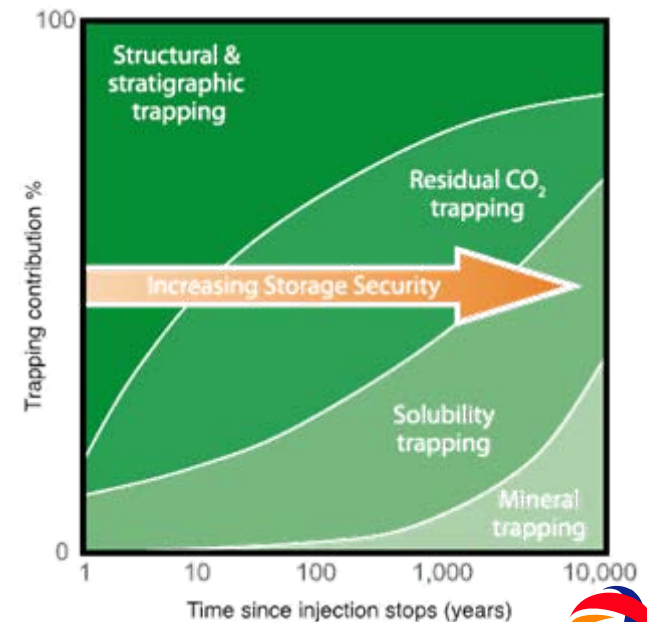
► Permet la mise en oeuvre de méthodes et d'outils

- de sélection de site de stockage
- de qualification d'un stockage
- de surveillance

► Utilisation large du savoir faire de production des gisements et de stockage de gaz naturel

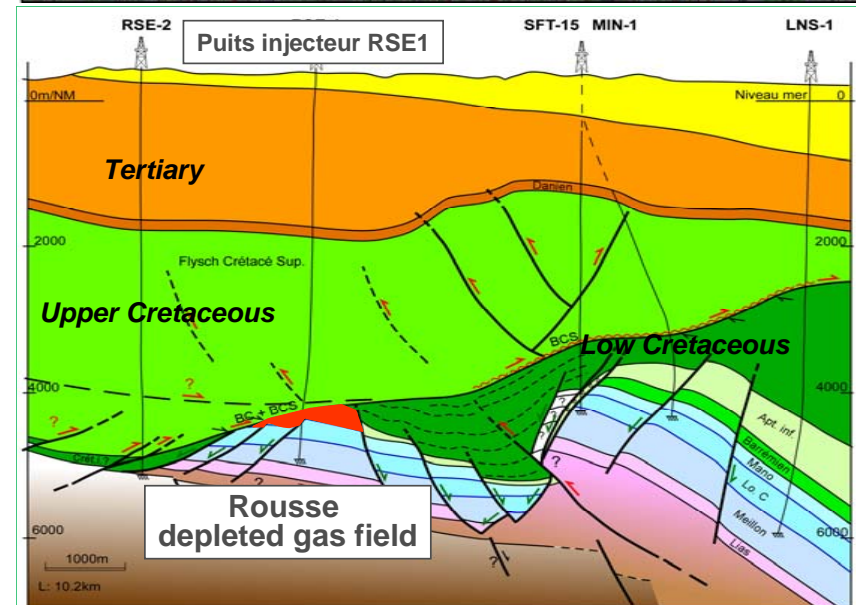
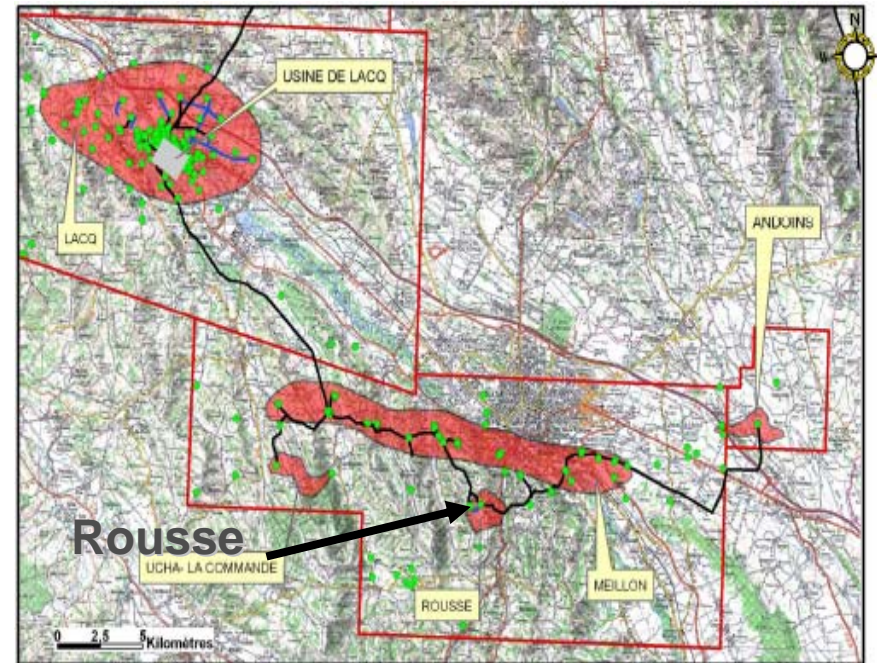
- **mais** données de site spécifiques à acquérir
- analyse de scénario de défaillance du stockage
- méthode de surveillance et base line spécifique
- enjeux de la prédiction effets long terme
- attention particulière aux puits (logging, ciments, ..)

*Principes de
l'évolution du piégage
du CO₂ à long terme*



Des conditions très conservatives

- ▶ Rousse est un site qui a démontré sa fiabilité en terme de production de gaz acide
- ▶ Pas de nouvelles installations en dehors des sites existants et risque du projet inscrit dans les risques gérés actuellement
- ▶ Cadre géologique
- ▶ Connaissance historique du gisement (35 ans de production)
 - données de production
 - Données de forage
 - échantillons du réservoir et de la couverture
- ▶ Pas d'aquifère actif connecté et présence de CO₂ dans le gaz (> 4%)
- ▶ Un puits unique en très bon état
- ▶ Niveau de pression faible en fin d'injection par rapport à la pression initiale
- ▶ Les failles ne traversent pas la couverture
- ▶ Une épaisseur de couverture de 2000m



Planning général du projet












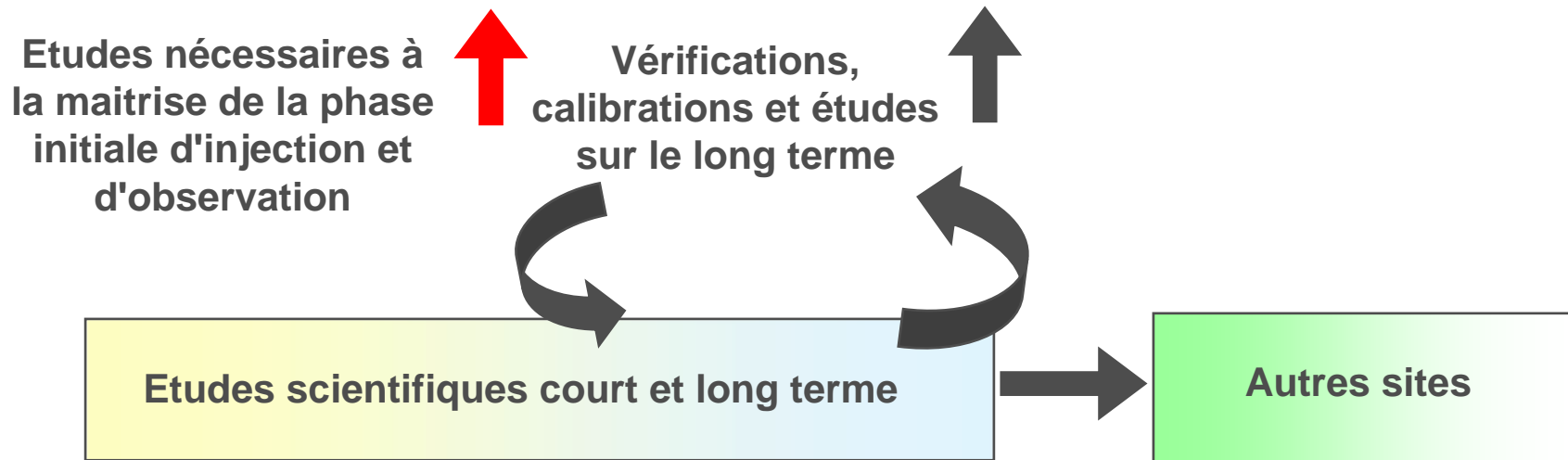
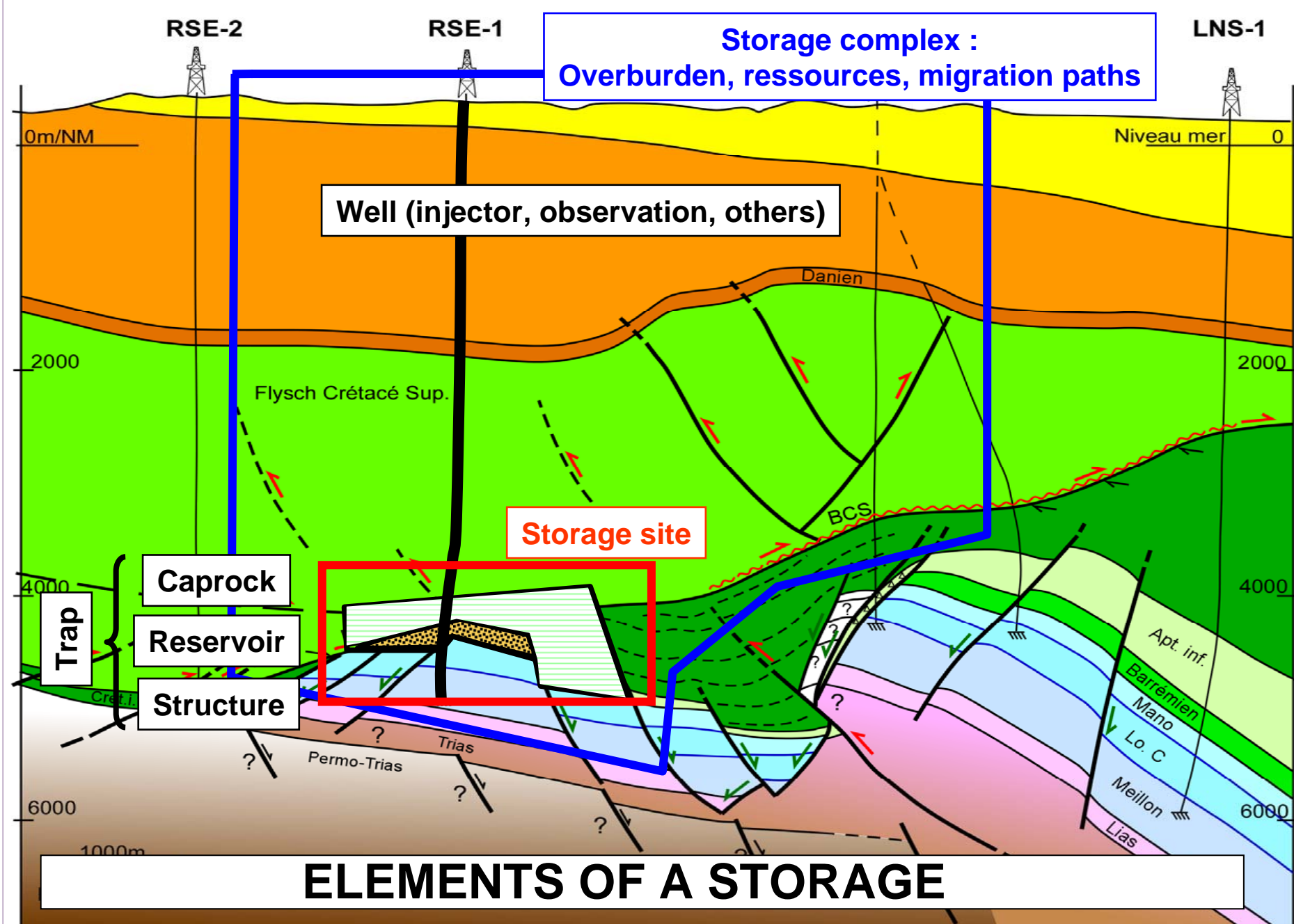
	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Etudes conceptuelles		★				
Etudes d'Ingénierie de base						
Etudes de détail et approvisionnement						
Construction						
Reprise du puits Rousse 1						
Injection				★ 		
Etats de référence et surveillance						
Information et concertation					Information publique	
Instruction administrative				★		

Schéma administratif en 2 phases:

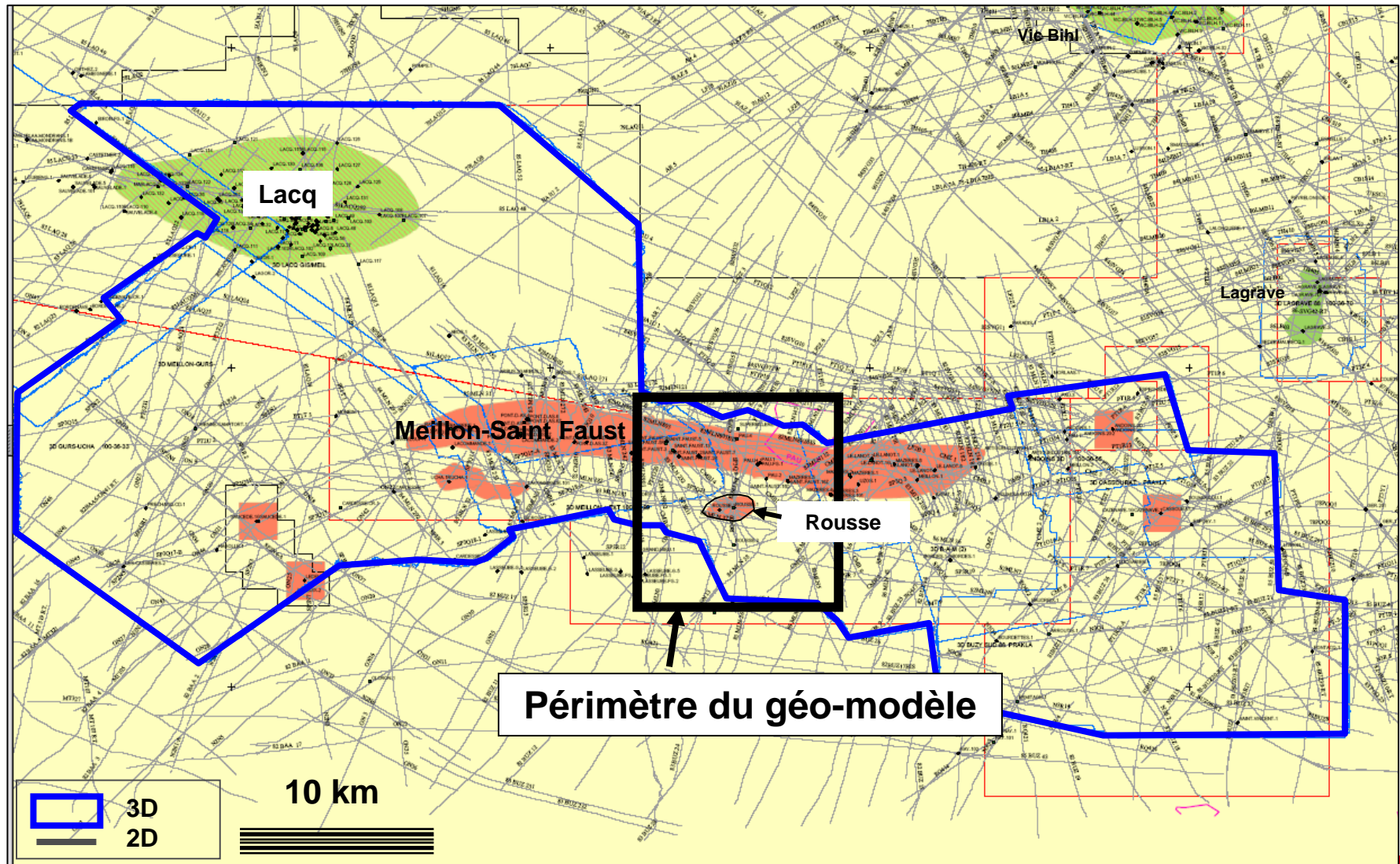
Importance des études en parallèle du pilote pour la phase définitive de stockage et de la qualité du monitoring

Phase préparatoire	Phase d'injection et 1 ^{ère} phase observation	Phases ultérieures d'observation et de contrôle ou de retrait du CO2
2006 - 2008	2 ans injection 3 ans observation Demande d'autorisation Réversibilité	Pas de nouvelles injections mais révision du schéma de monitoring et d'abandon

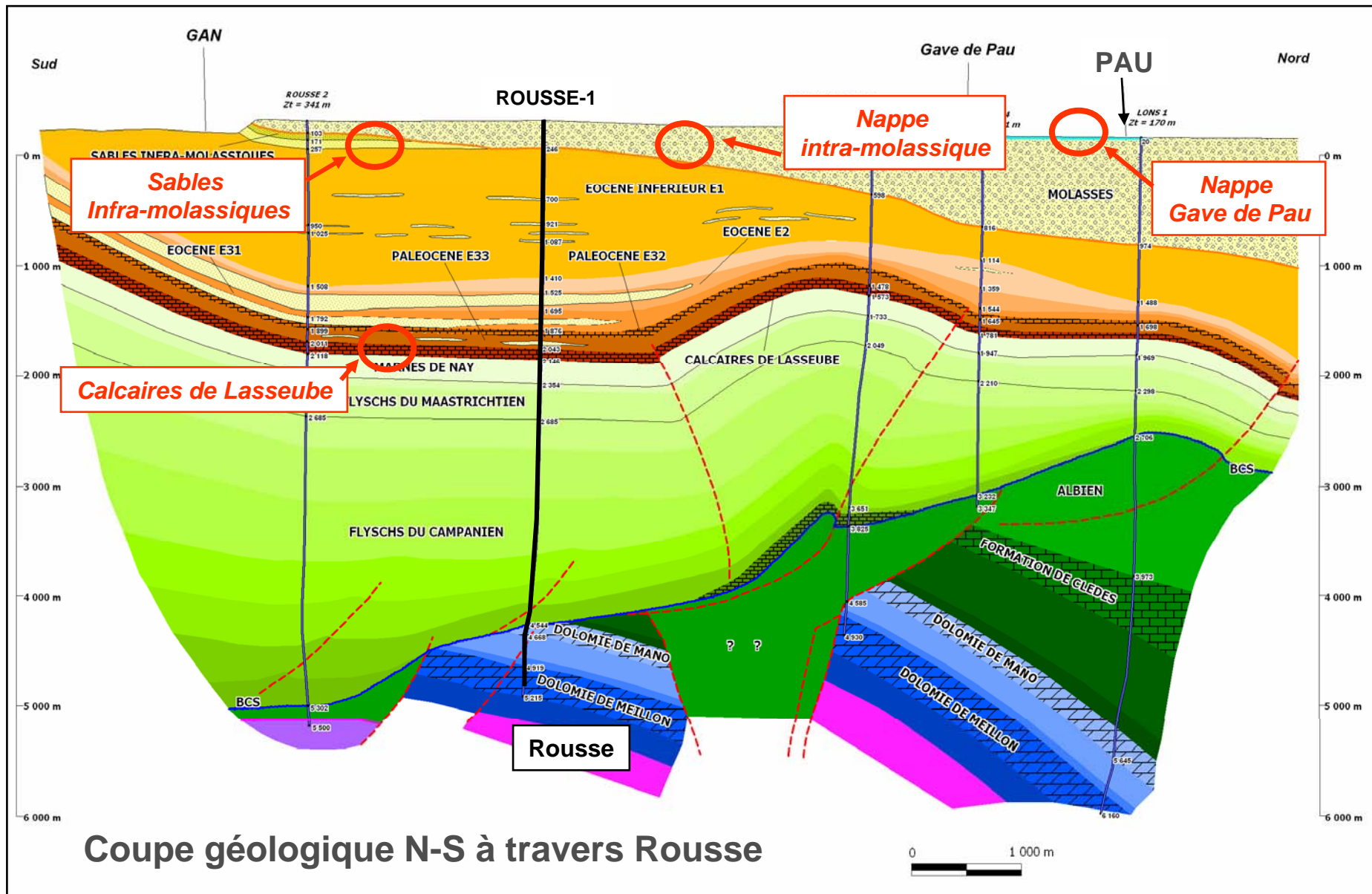




Données sismiques et puits disponibles



Inventaire des aquifères du complexe de stockage



Les scénarios de l'étude de danger

1 – Fuite par un défaut d'étanchéité de la couverture

2 – Fuite par des failles existantes

3 – Fuite latérale du gaz

4 – Fuite du puits au niveau des aquifères supérieurs sus-jacents

5 – Fuite le long du puits vers la surface

6 – Dérangements mécaniques du réservoir dus aux réactions géochimiques dans le réservoir (entraînant une modification significative des caractéristiques mécaniques du réservoir)

7 – Dérangements mécaniques des terrains dus à l'injection

8 – Dérangement mécanique des terrains sous l'effet des séismes

9 – Effet d'un séisme sur le puits

10 – Forage ultérieur d'un puits perforant

(11 – Puits éruptif)

3 types de scénarios

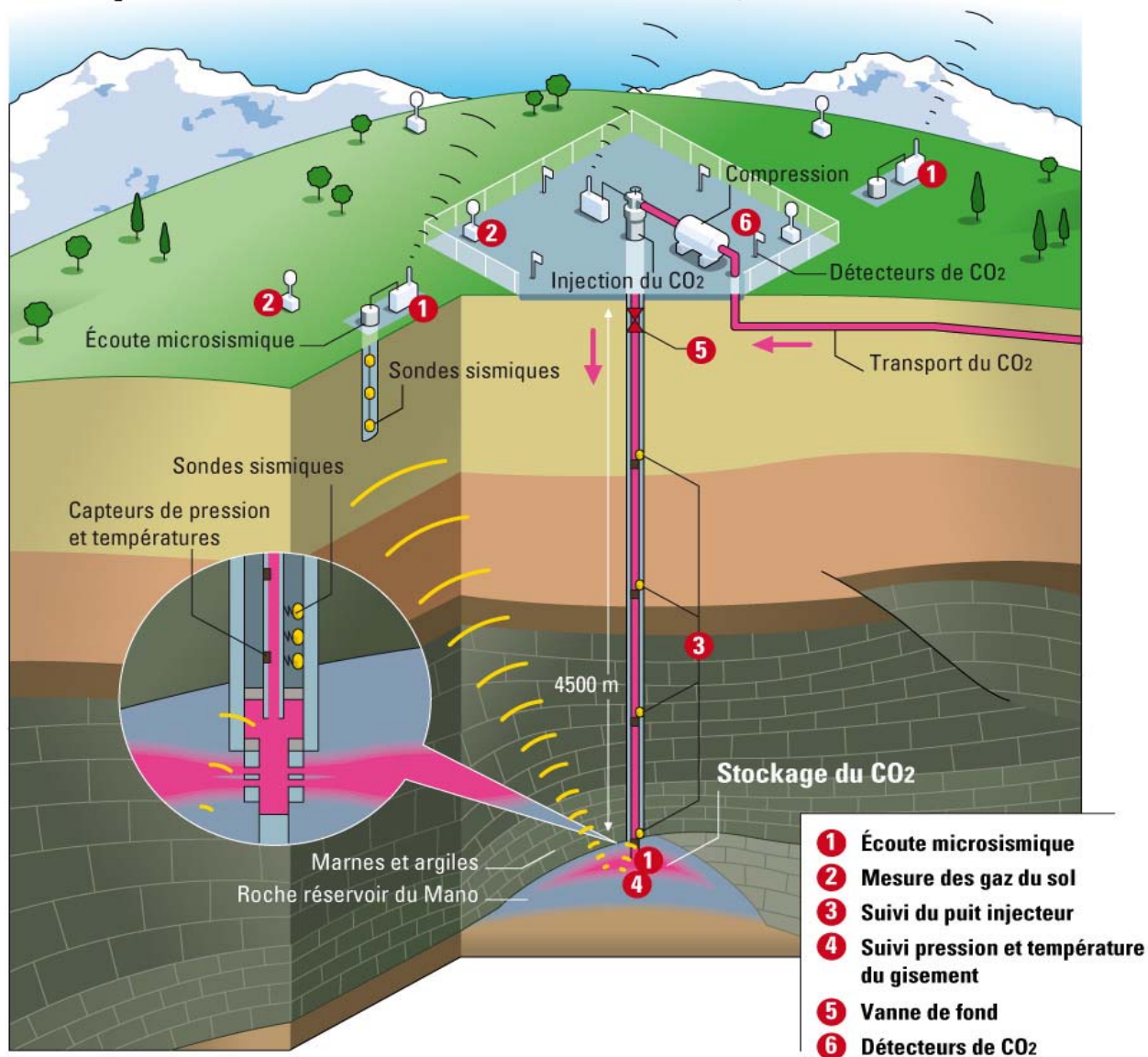
Perte d'intégrité du réservoir (1,2,3,10)

Dérangements mécaniques des terrains (6,7,8)

Perte d'étanchéité du puits (4,5,9)

Tierce expertise du BRGM et itérations sur le contenu des études associées avec l'Administration et le BRGM

Dispositif de surveillance de l'injection de CO₂



Descente de la nouvelle complétion avec fibre optique et capteurs P/T/sismiques



La mise en oeuvre d'un suivi microsismique

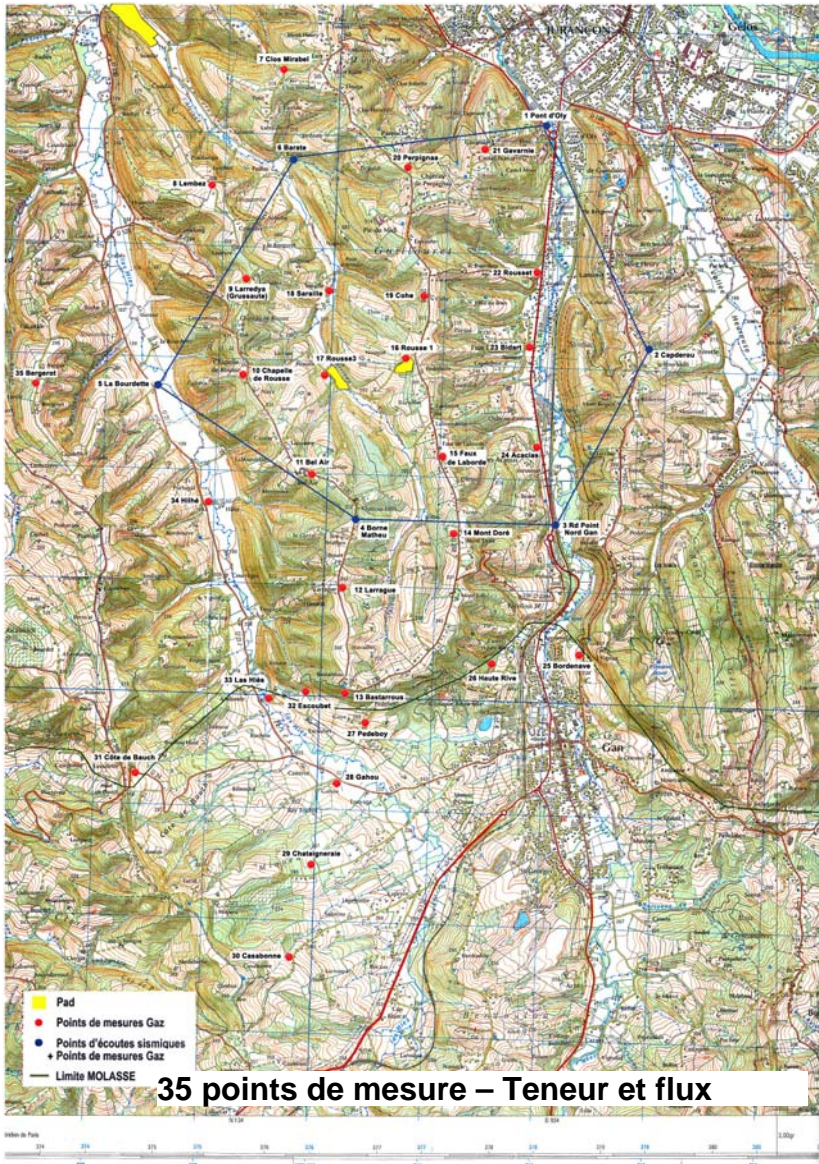
Puits Barate :

- En fonctionnement depuis mars 2009
- Equipé d'un sismomètre basses fréquences permettant l'enregistrement des séismes régionaux

6 puits de suivi microsismique à finaliser



Les mesures des gaz du sol



Objectif

Etat initial des gaz en surface
et dans le réservoir

« Déceler migrations de gaz en
surface »

Programme

Mesure des flux gazeux CO₂ et
CH₄ émanant du sol

Mesure des teneurs en CO₂,
CH₄, Rn, ... dans les sols

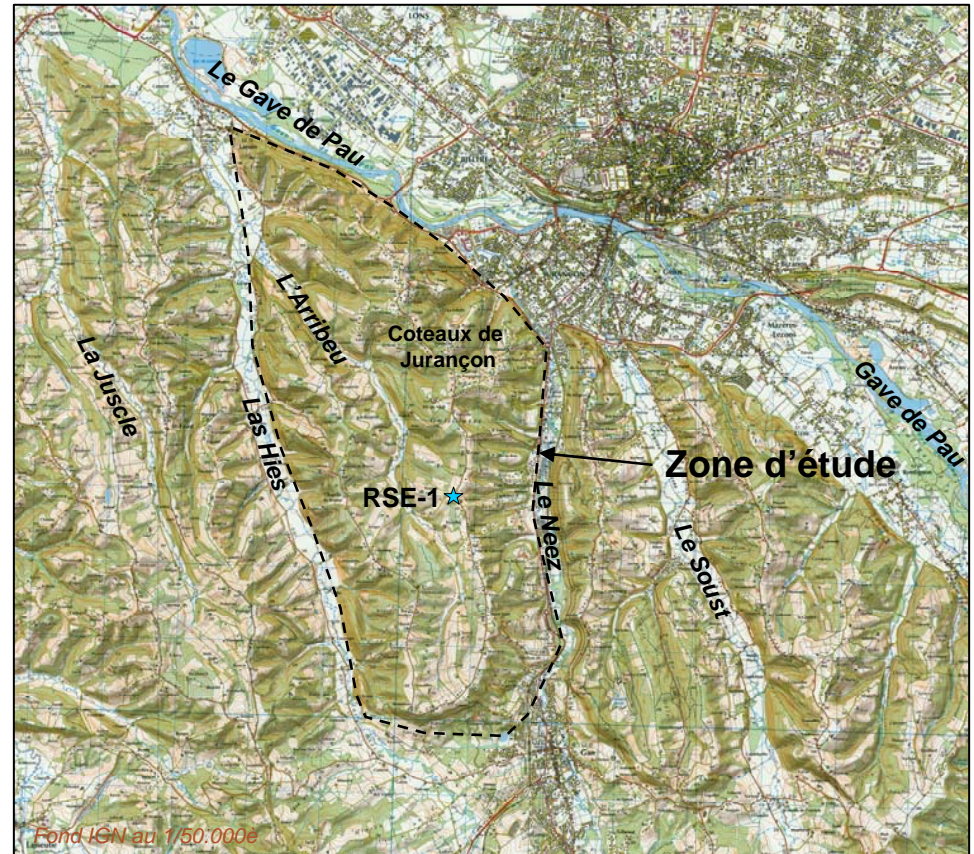
Dosage et isotopie des gaz
rares (He, Ne, Ar, Kr, Xe)
réservoir Rse-1, Rse-3

réseau

gaz des sols.

Un programme de suivi environnemental

- ▶ Une zone d'étude d'environ 3000 ha (approx. 6 km sur 5 km) correspondant globalement aux coteaux de Jurançon et limitée par :
 - le Gave de Pau,
 - la vallée de las Hies
 - la vallée du Neez
 - la RD 24
- ▶ Une zone périphérique qui servira de référence et permettra d'identifier les effets globaux ayant une d'origine «extérieure au projet» (variations saisonnières ou climatiques).



Des projets ANR qui s'appuient sur le pilote de Lacq

- SOCECO2 :** Économie et Sociologie de la filière capture et stockage géologique du CO2
CIREN, Alstom, APESA, BRGM, GDF, IFP, INERIS, Université de Troyes
- CRISCO2 :** Critères de sécurité pour le stockage du CO2 : approche qualitative / quantitative de scénarios de risques
BRGM, ARMINES, Université de Toulouse, Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel
- GAZ ANNEXES :** Rôle des gaz annexes sur l'injection du CO2: simulation des propriétés thermodynamiques des mélanges eau-gaz-sels en conditions de stockage géologique
Institut polytechnique de Lorraine, Ecole des mines de Paris, BRGM, IFP
- SENTINELLE :** Monitoring de surface de sites de stockage de CO2: Bilan des flux et traçage des sources sur les compartiments superficiels: couverture supérieure, sol, biosphère et proche atmosphère
Institut National Polytechnique de Lorraine, Kaiser Optical, IFP, INERIS, Institut Pierre Simon Laplace/Laboratoire de Météorologie Dynamique, INRA

Démarrage d'actions de recherche en collaboration

► Collaboration IFP – TOTAL

- Propriétés pétrophysiques des couvertures (avec l'UPPA) (mesures sur carottes)
- Monitoring géochimique (mesures surface composition, isotopie, gaz rares)
- Modélisations géochimiques (Études comparatives)
- Thermodynamique (propriétés des mélanges)

► Collaboration BRGM – TOTAL

- Modélisations géochimiques (Études comparatives)
- Étude Seiscor : Impact d'un séisme naturel sur l'intégrité du stockage géologique de CO₂ dans le gisement de Rousse

► Collaboration INPL - TOTAL

- *Stéphane Renard*, Rôle des gaz annexes sur l'évolution géochimique d'un site de stockage de CO₂. Application à la région de Lacq

► Modélisation géochimique

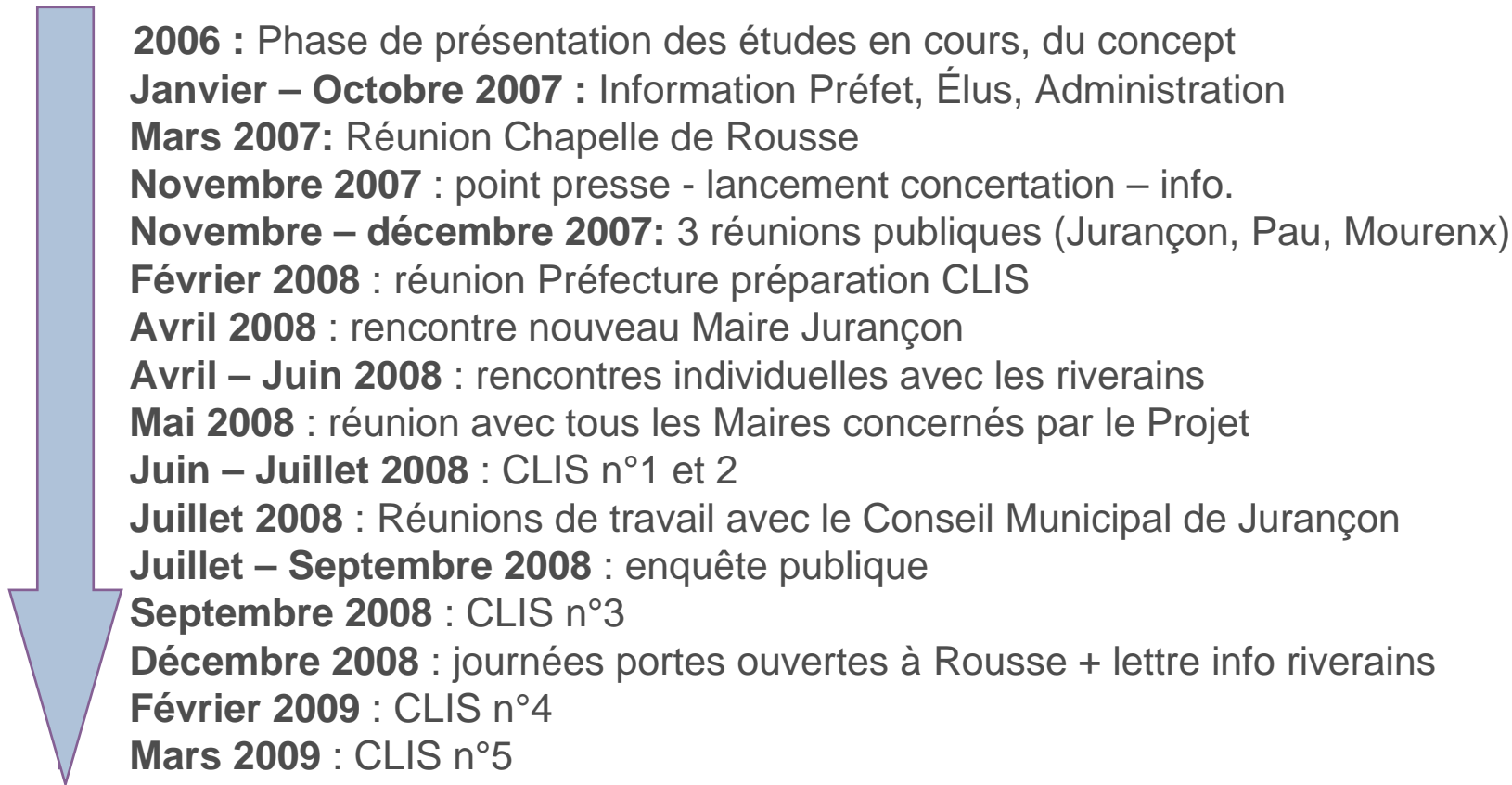
TOTAL, BRGM, IFP, INPL

Confrontation des résultats – Mise en évidence des incertitudes – Recommandations

► Programme CO₂ IPGP

- Suivi isotopique des eaux souterraines
- Analyse des données du suivi microsismique

La nécessité de la pédagogie



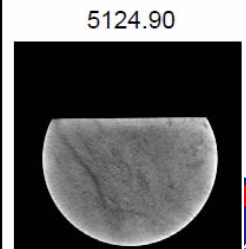
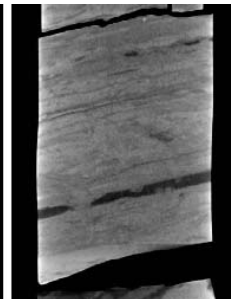
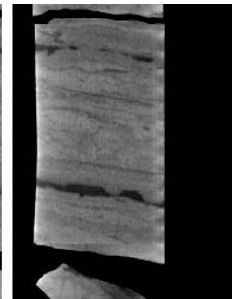
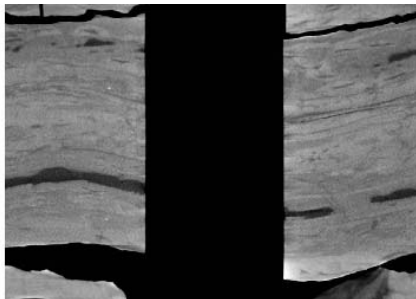
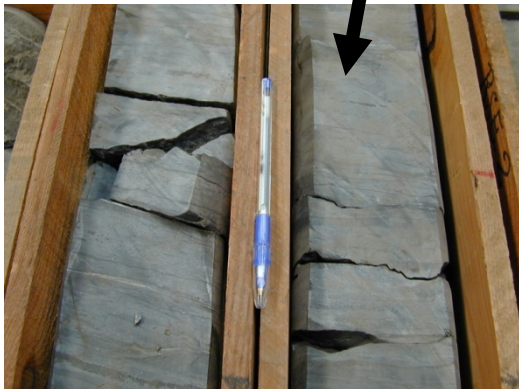
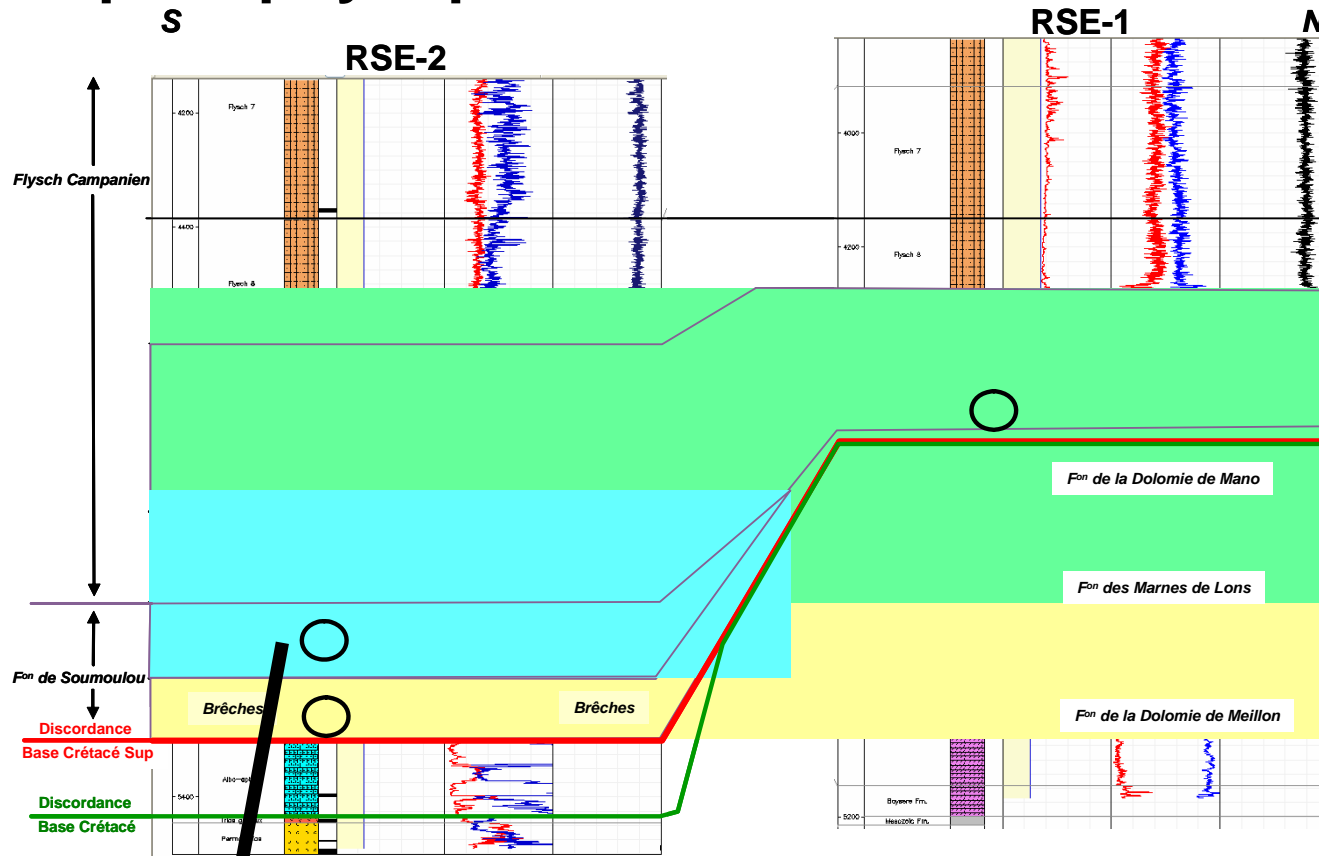
► Charte de la concertation

- Engagement d'une information complète, sincère, pédagogique
- Projet sous le regard d'experts scientifiques et techniques
- Réponses aux questions du public
- Compte-rendus publics (www.total.com)
- Informer le public et les parties prenantes de l'évolution du calendrier du projet

Work over de Rousse-1 (rig SMP 101)



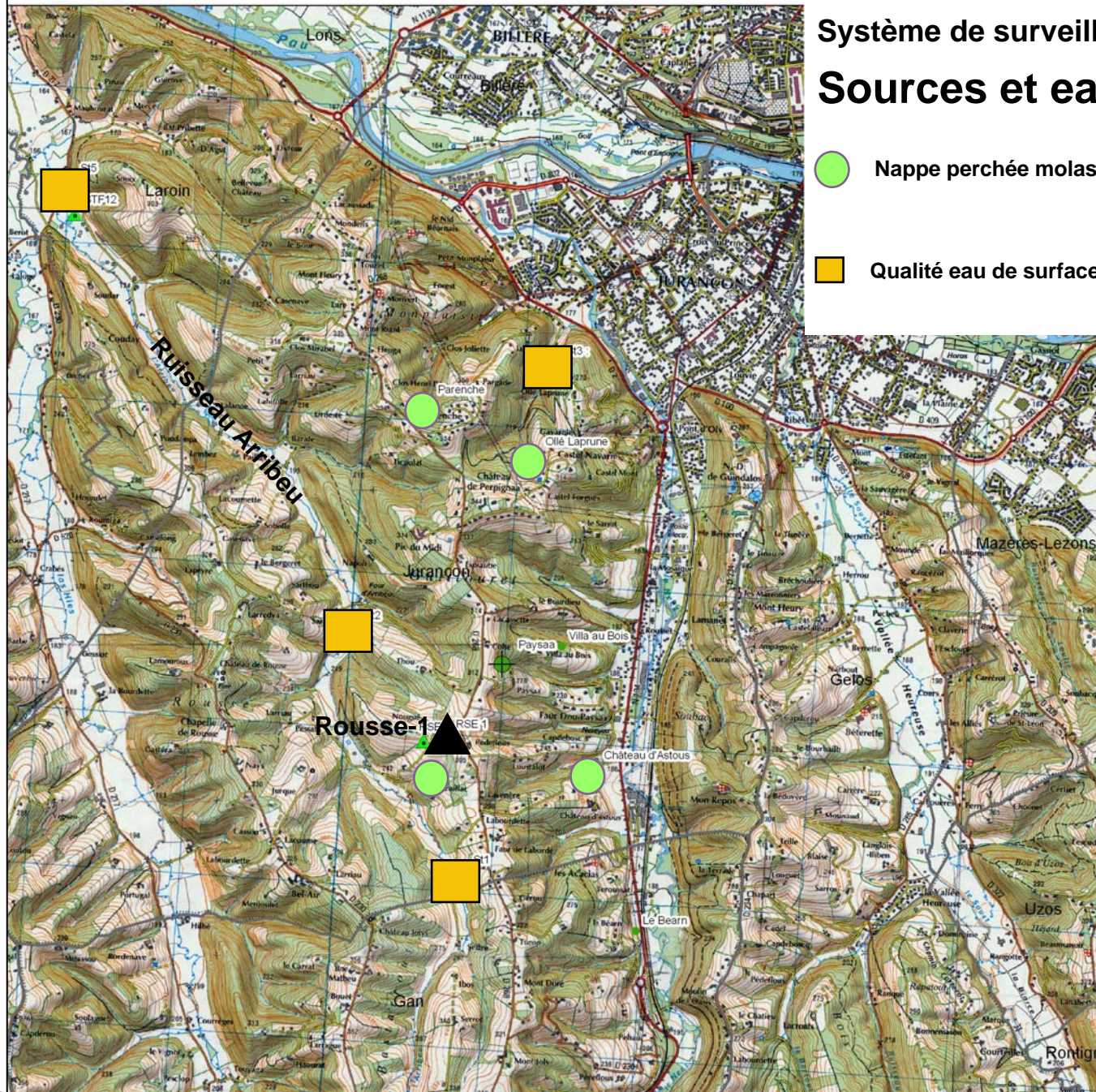
Mesures pétrophysiques sur la couverture de Rousse



Système de surveillance des aquifères Sources et eaux de surface

 Nappe perchée molassique

 Qualité eau de surface



Mesures des gaz du sol - Procédure

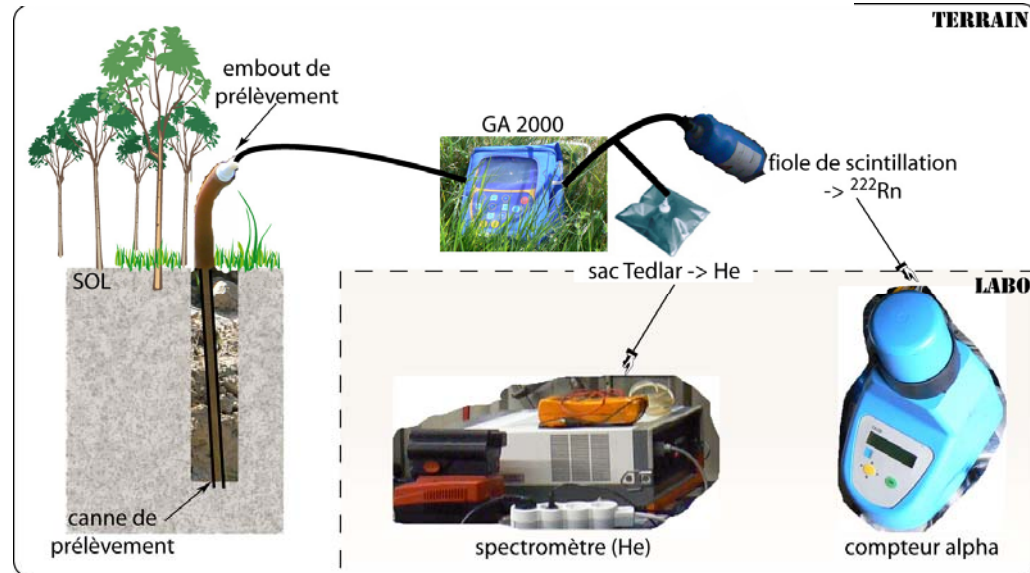
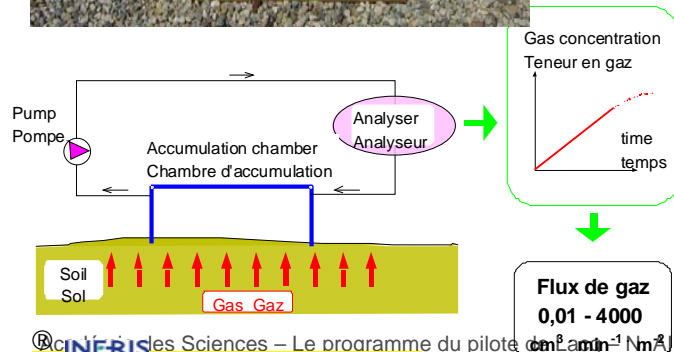
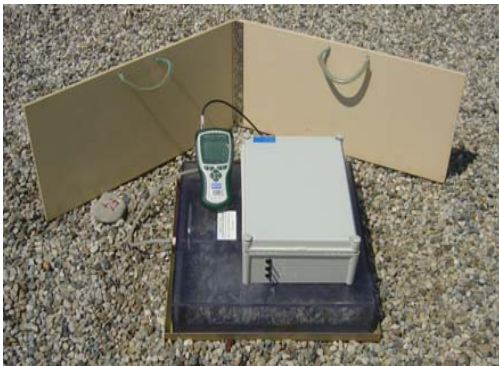
35 points de mesure

- Quadrillage assez régulier au dessus du site
- Prolongement à l'extérieur du quadrillage sur un axe Nord-Sud et sur un axe Ouest- Est (moins étendu)
- Points complémentaires à la base de l'affleurement de la Molasse au Sud du site
- Autres critères pour identifier précisément les lieux de mesures

Mesure des teneurs en gaz des sols

- teneurs en CO₂, O₂, CH₄ directement sur site
- He et activité ²²²Rn réalisées en laboratoire

Mesure des flux gazeux (gaz carbonique et méthane)

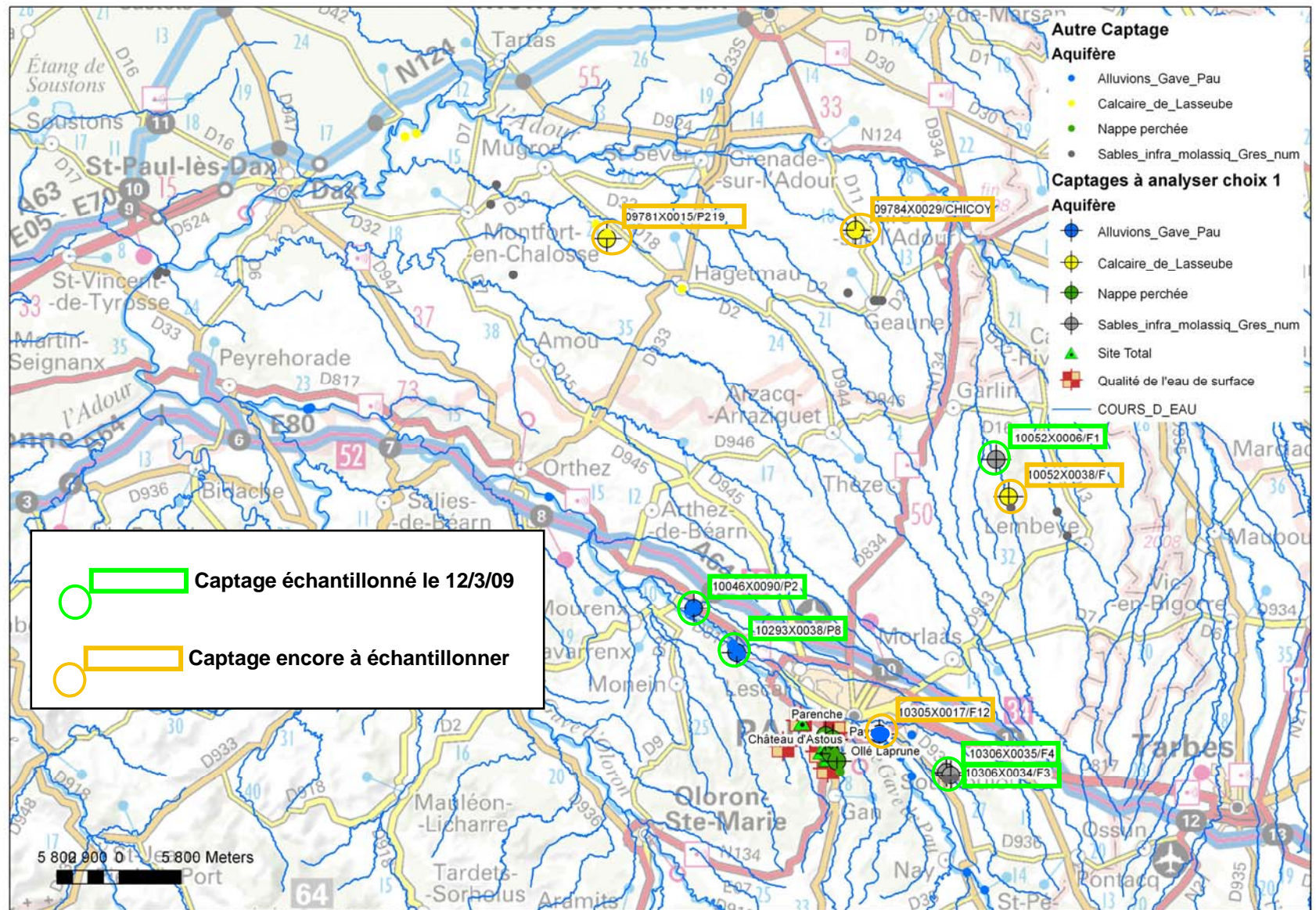


Fréquence des mesures

- Quatre campagnes seront réalisées la première année pour disposer d'un ligne de base saisonnière des teneurs et flux des gaz du sol (CH₄/CO₂/O₂/He/Rn)
- Deux campagnes annuelles lors de la période d'injection (2 ans) (CH₄/CO₂)
- Une campagne annuelle après la fermeture du puits durant les trois ans d'observation (CH₄/CO₂)

Système de surveillance des aquifères

Localisation des captages d'eau souterraines



Système de surveillance des aquifères

- Les prélèvements d'eau de surface ainsi que les analyses réalisés selon normes en vigueur pour chacun des paramètres physico-chimiques considérés.
- Etat de référence : un échantillonnage par saison en 2009
- Caractéristiques visuelles et paramètres mesurés *in situ* : température, pH, Eh, conductivité, Oxygène dissous, CO2 dissous, Ammonium.
- Analyses complémentaires complétées par un laboratoire certifié COFRAC et agréé par le ministère
- Analyses :
 - Nitrates, phosphates et sulfates
 - Bicarbonates
 - Carbonates
 - Carbone Minéral Total
 - Carbone organique total, DCO, DBO5
 - Métaux lourds : Ba, Fe, Cu, Pb, Zn, Al
 - Hydrocarbures totaux
 - HAP
 - Outre les polluants habituellement recherchés, le programme analytique met l'accent sur la chimie du carbone dans l'eau.

Le programme d'études environnementales

► Mise en place d'un programme de suivi environnemental autour du site de Rousse qui comprendra :

- Un état et un suivi de la biodiversité de la faune et de la flore ;
- Un suivi de la qualité des eaux (eaux de surface et eaux souterraines).

► Programme en deux phases :

- L'établissement de l'**état de référence** au cours de l'année 2009 ;
- Le **suivi environnemental**, les années suivantes, dont le programme sera précisément établi à partir de l'état de référence.

Principales conclusions des réunions d'information et de concertation en 2007-2008

► Points de convergence

- Urgence climatique et nécessité de développer des solutions rapidement
- Priorité aux économies d'énergie et le développement des énergies renouvelables
- Volonté partagée de gouvernance approfondie (CLIS)
- Opportunité économique et d'image pour le territoire
- La sécurité et la maîtrise des risques est une priorité pour tous

► Points de divergence

- Le potentiel du CSC dans la lutte contre le changement climatique
- L'encadrement réglementaire par le code minier

► Actions réalisées

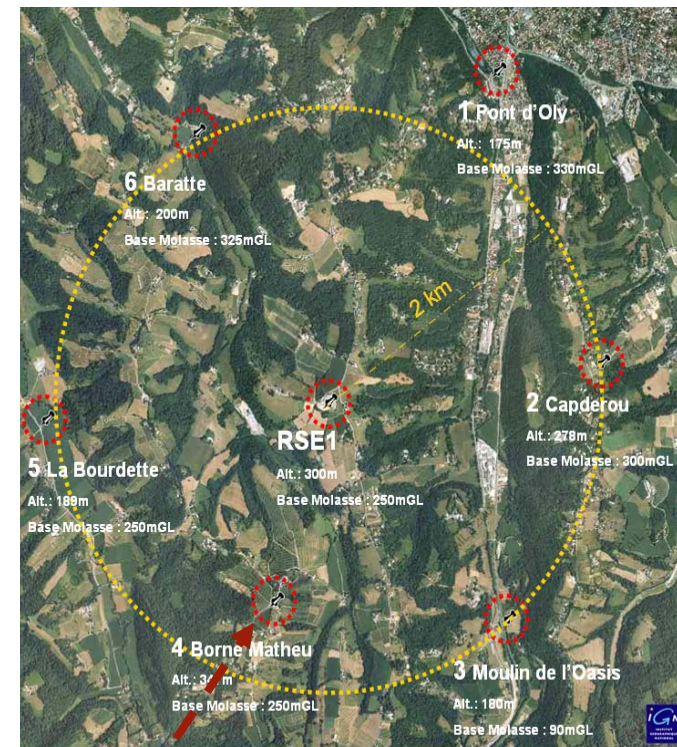
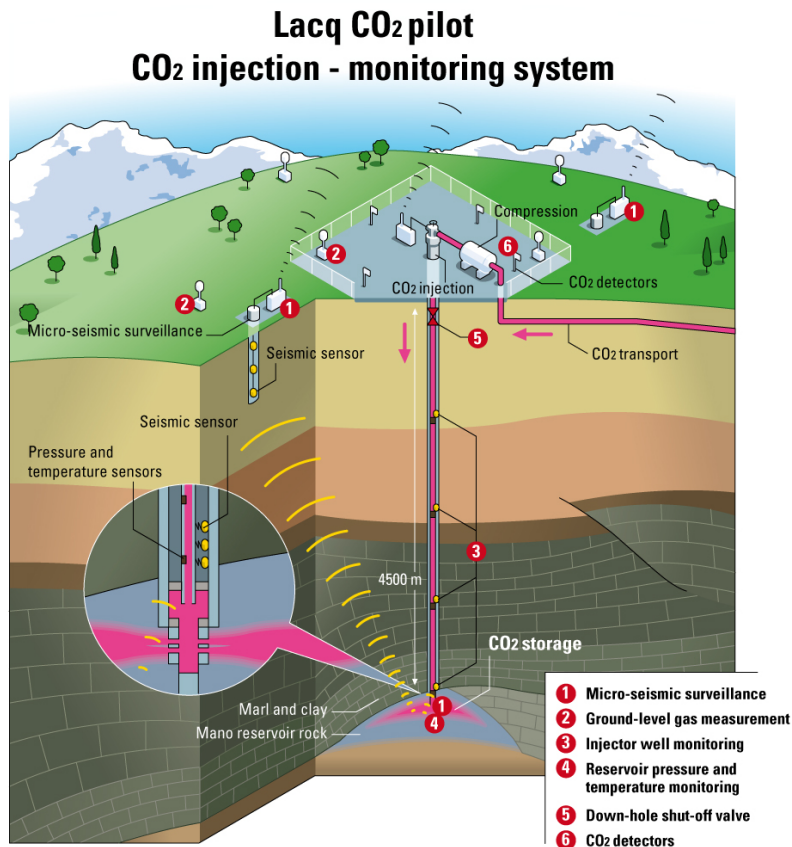
- Soutien à la mise en place de la CLIS
- Revue de l'insertion paysagère du projet
- Revue systématique des scénarios de risques liés au projet avec la CLIS
- Ouverture à des projets d'accompagnement autour du thème du changement climatique et soutenus par des communes

“Dolomie de Mano” : a fractured reservoir



4 - Puits microsismiques

- Un réseau de 7 antennes de 4 sondes triaxiales (géophones SM4, fréquence 10 Hz et sensibilité 22 V/ms-1) à des profondeurs comprises entre 130m et 190m (20 m d'espace entre chaque sonde). Six antennes sont disposées approximativement sur un cercle de 2 km de rayon autour du puits RSE1, et une antenne centrale se situe à proximité du puits RSE1.
- Dans le puits Rousse-1, une antenne composée de 3 stations sismiques (3 composants) situées respectivement à 4180 m, 4280 m et 4380 m fabriquées et fournies par Weatherford. Il faut noter que du fait de la limitation de la fibre en terme de transmission de données, seulement 8 des 9 mesures effectuées sont remontées en surface.



Forage en cours

5 puits du réseau sismiques forés (sur 7)
dont un en fonctionnement

Directive européenne – Annexe 1

Critères de caractérisation et d'évaluation du complexe de stockage et des environs

- ▶ "stockage géologique du CO₂", l'injection accompagnée du stockage du CO₂ dans des formations géologiques souterraines
- ▶ "site de stockage", une zone définie au sein d'une formation géologique utilisée pour le stockage géologique du CO₂ et les installations de surface et d'injection qui y sont associées
- ▶ "complexe de stockage", le site de stockage et les domaines géologiques environnants qui sont susceptibles d'influer sur l'intégrité et la sécurité globales du stockage (c'est-à-dire les formations de confinement secondaires)

TOTAL WORKFLOW FOR CO2 STORAGE QUALIFICATION STUDIES

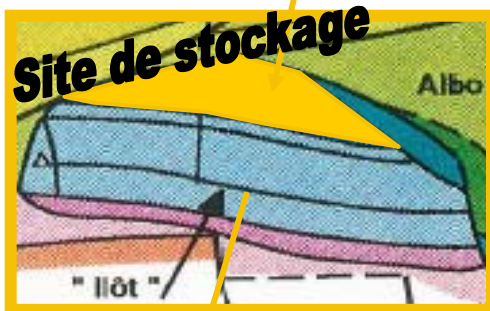
3 “outils” à différentes échelles de modélisation

pour répondre à quelles questions ?

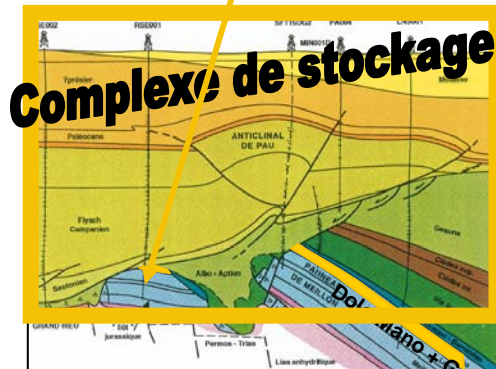
(mise en parallèle avec la directive européenne)



- f) la pression et la température de la formation de stockage en fonction du débit d'injection et de la quantité injectée cumulée dans le temps
- g) la superficie et la hauteur de la formation de stockage en fonction du temps
- h) la nature du flux de CO₂ dans le réservoir, ainsi que le comportement des phases
- i) les mécanismes et les taux de piégeages du CO₂
- q) les modifications dans la chimie des fluides, ainsi que les réactions subséquentes intervenant dans les formations (par ex. modification du pH, formation de minéraux) et l'intégration de modélisation réactive pour évaluer les effets



- k) la capacité de stockage et les gradients de pression du site de stockage
- l) le risque de fracturation des formations de stockage et de la roche couverture
- m) le risque de pénétration du CO₂ dans la roche couverture
- p) les vitesses de colmatage des fractures
- r) déplacement des fluides présents dans les formations



- j) les systèmes de confinement secondaires au sein du complexe de stockage global
- n) le risque de fuite à *partir du site de stockage* (par exemple, par des puits abandonnés ou mal scellés)
- r) déplacement des fluides présents dans les formations
- s) l'accroissement de la sismicité et de l'élévation au niveau de la surface

Monitoring microsismique

Puits Barate :

- En fonctionnement depuis mars 2009
- Equipé d'un sismomètre basses fréquences permettant l'enregistrement des séismes régionaux



Le programme d'études environnementales

► Mise en place d'un programme de suivi environnemental autour du site de Rousse qui comprendra :

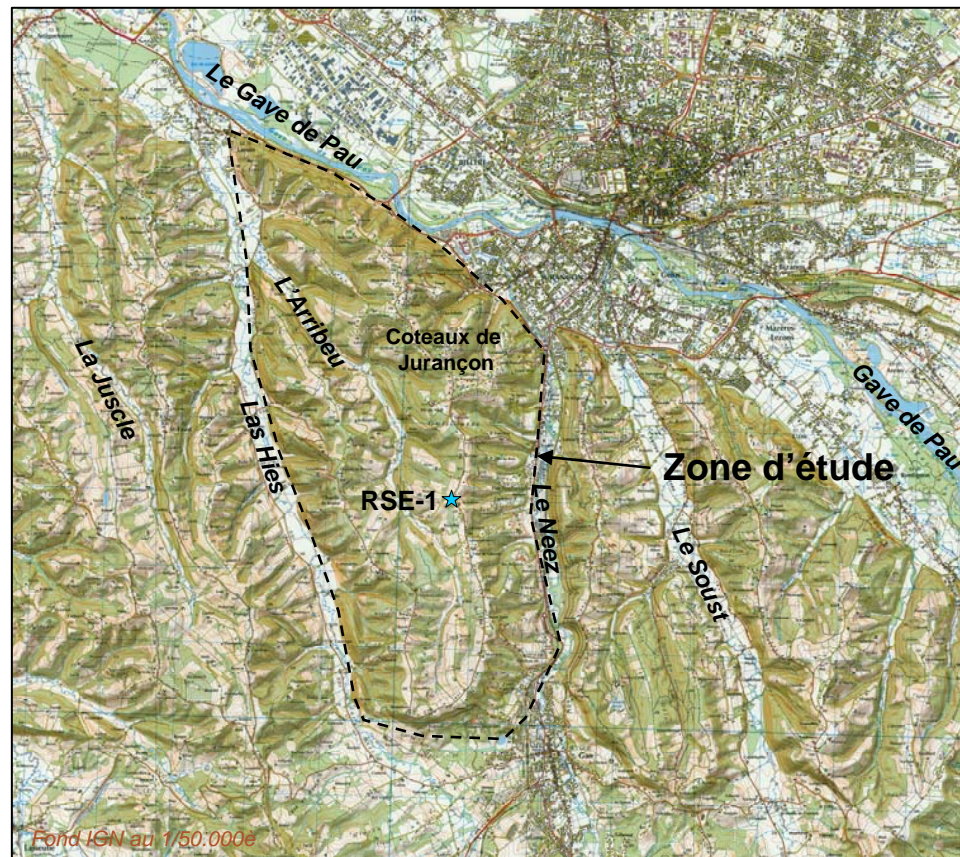
- Un état et un suivi de la biodiversité de la faune et de la flore ;
- Un suivi de la qualité des eaux (eaux de surface et eaux souterraines).

► Programme en deux phases :

- L'établissement de l'**état de référence** au cours de l'année 2009 ;
- Le **suivi environnemental**, les années suivantes, dont le programme sera précisément établi à partir de l'état de référence.

La zone d'étude

- ▶ Une zone d'étude d'environ 3000 ha (approx. 6 km sur 5 km) correspondant globalement aux coteaux de Jurançon et limitée par :
 - le Gave de Pau,
 - la vallée de las Hies
 - la vallée du Neez
 - la RD 24
- ▶ Une zone périphérique qui servira de référence et permettra d'identifier les effets globaux ayant une d'origine «extérieure au projet» (variations saisonnières ou climatiques).



Mesures des gaz du sol - Procédure

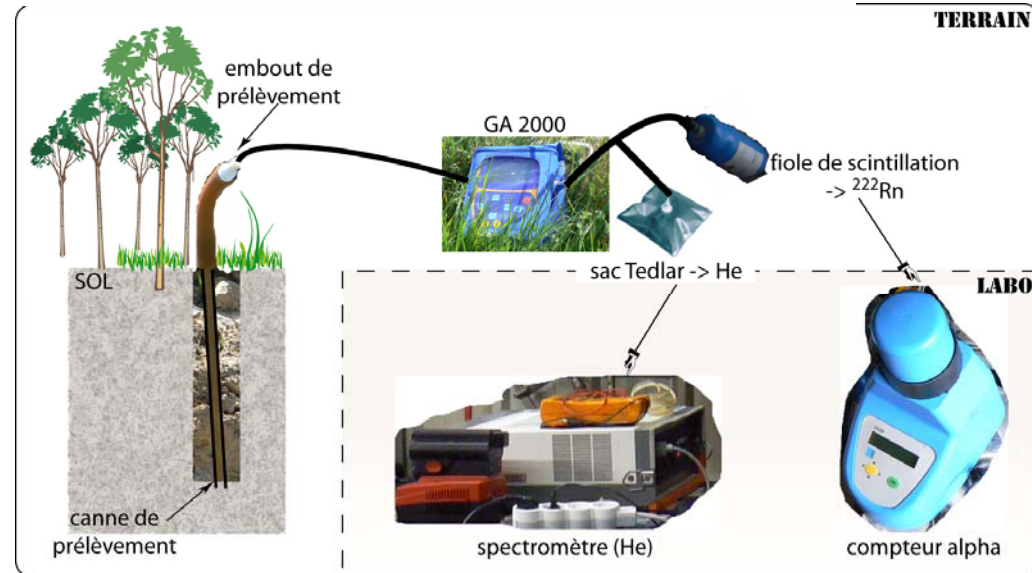
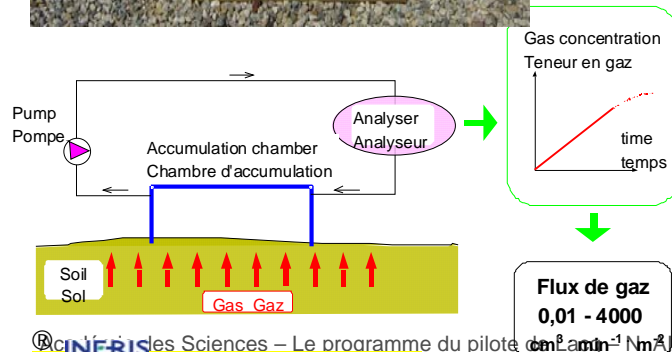
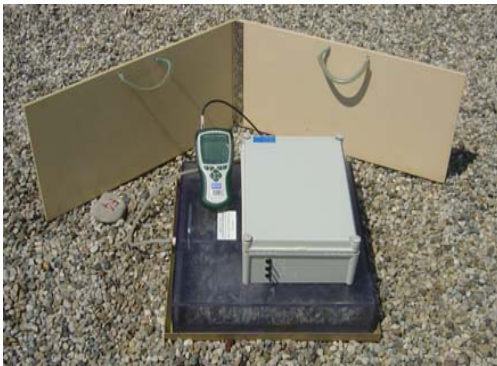
35 points de mesure

- Quadrillage assez régulier au dessus du site
- Prolongement à l'extérieur du quadrillage sur un axe Nord-Sud et sur un axe Ouest- Est (moins étendu)
- Points complémentaires à la base de l'affleurement de la Molasse au Sud du site
- Autres critères pour identifier précisément les lieux de mesures

Mesure des teneurs en gaz des sols

- teneurs en CO₂, O₂, CH₄ directement sur site
- He et activité ²²²Rn réalisées en laboratoire

Mesure des flux gazeux (gaz carbonique et méthane)



Fréquence des mesures

- Quatre campagnes seront réalisées la première année pour disposer d'un ligne de base saisonnière des teneurs et flux des gaz du sol (CH₄/CO₂/O₂/He/Rn)
- Deux campagnes annuelles lors de la période d'injection (2 ans) (CH₄/CO₂)
- Une campagne annuelle après la fermeture du puits durant les trois ans d'observation (CH₄/CO₂)



Mesures pétrophysiques sur la couverture de Rousse

