



Surveillance d'un site de stockage de déchets radioactifs :

des choix conceptuels à la R&D au service de la surveillance de l'environnement

Cas du Centre de Stockage de l'Aube, France

avril 2016

1. Contexte national
2. Choix du site et caractéristiques du CSA
3. Surveillance de l'environnement
4. Etudes spécifiques:
 - ❖ Modèle hydrogéologique
 - ❖ Transport des RN par les colloïdes
 - ❖ Marquage de l'environnement par les RN gazeux : zone non saturée





Contexte national

Contexte national

Choix site & Caractéristiques

Surveillance environnement

Modèle hydrogéologique

Transport des RN / colloïdes

Zone non saturée

Conclusion

		PERIODE →		
		<u>Vie très courte</u> (période < 100 jours)	<u>Vie courte</u> (période ≤ 31 ans)	<u>Vie longue</u> (période > 31 ans)
ACTIVE	Très faible activité (TFA)	Gestion par décroissance radioactive sur le site de production puis évacuation dans les filières conventionnelles	Stockage de surface (Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage - Cires)	
	Faible activité (FA)		Stockage de surface (Centre de stockage de l'Aube)	Stockage à faible profondeur (à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)
	Moyenne activité (MA)			Stockage réversible profond (à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)
	Haute activité (HA)			Stockage réversible profond (à l'étude dans le cadre de la loi du 28 juin 2006)

Les concepts de stockage mis en œuvre par l'Andra sont adaptés à la dangerosité des déchets et à l'évolution de cette dangerosité dans le temps.

◆ Aujourd'hui en France : 3 solutions de stockage (mises en œuvre ou envisagées)

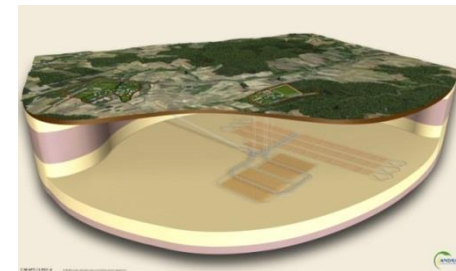
- Le stockage de surface



- Le stockage à faible profondeur (à l'étude)



- Le stockage profond, à 500 m (à l'étude)



Aujourd'hui, il existe en France 3 centres de stockage de surface (2 en exploitation et 1 en phase de surveillance) qui permettent de stocker plus de 90 % des déchets radioactifs produits chaque année en France (déchets TFA et FMA-VC).



Pour les autres types de déchets (FA-VL, MA-VL et HA) les centres de stockage adaptés sont à l'étude. En attendant, ils sont entreposés dans des installations spécifiques.



Choix du site & caractéristiques du CSA

Contexte
national

Choix site &
Caractéristiques

Surveillance
environnement

Modèle
hydrogéologique

Transport des
RN /colloïdes

Zone
non saturée

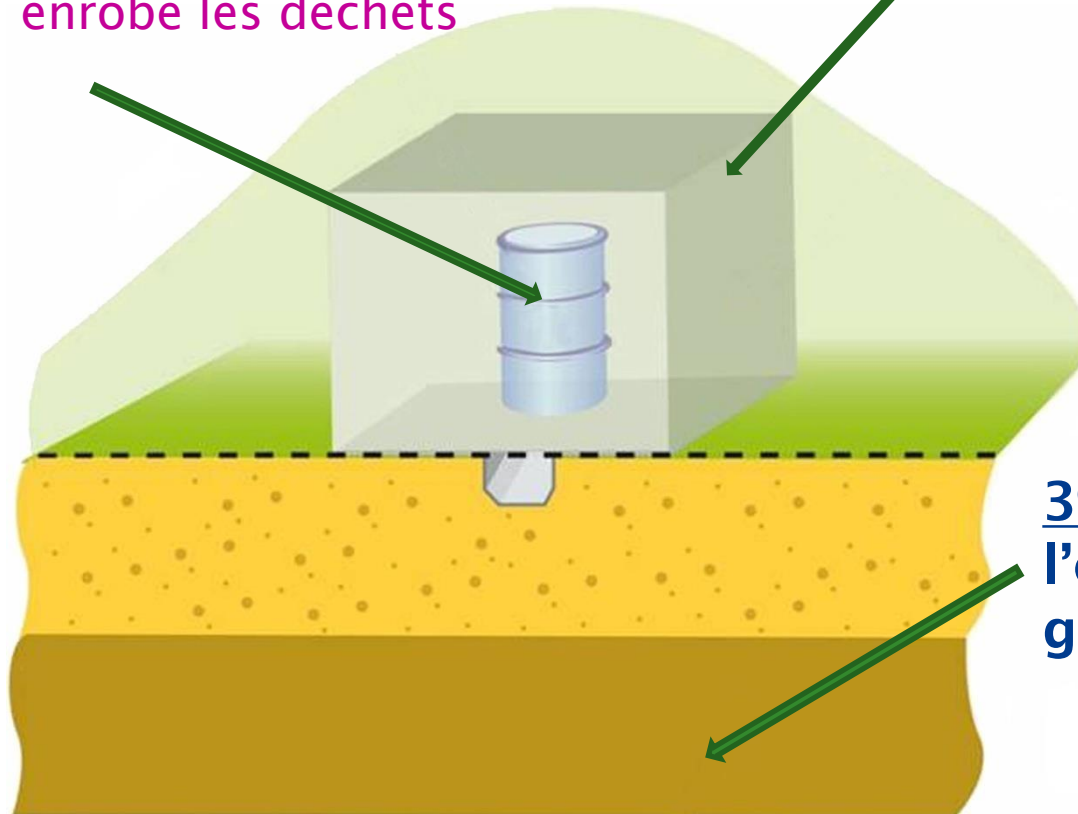
Conclusion

1^{ère} barrière : le colis

- ◆ À l'intérieur duquel un matériau de confinement enrobe les déchets

2^e barrière : l'ouvrage de stockage

- ◆ Complété par le réseau de galeries de contrôle et la couverture définitive

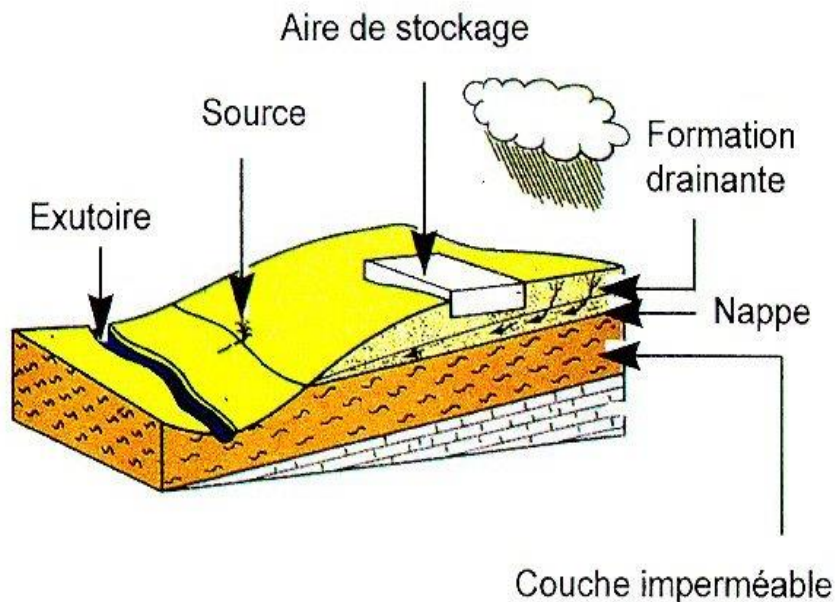


3^e barrière (naturelle) : l'environnement géologique

Principes de conception liés à la sûreté

→ Système multi barrières

- Colis de déchets
- Système ouvragé
- Géologie du site



Caractéristiques recherchées

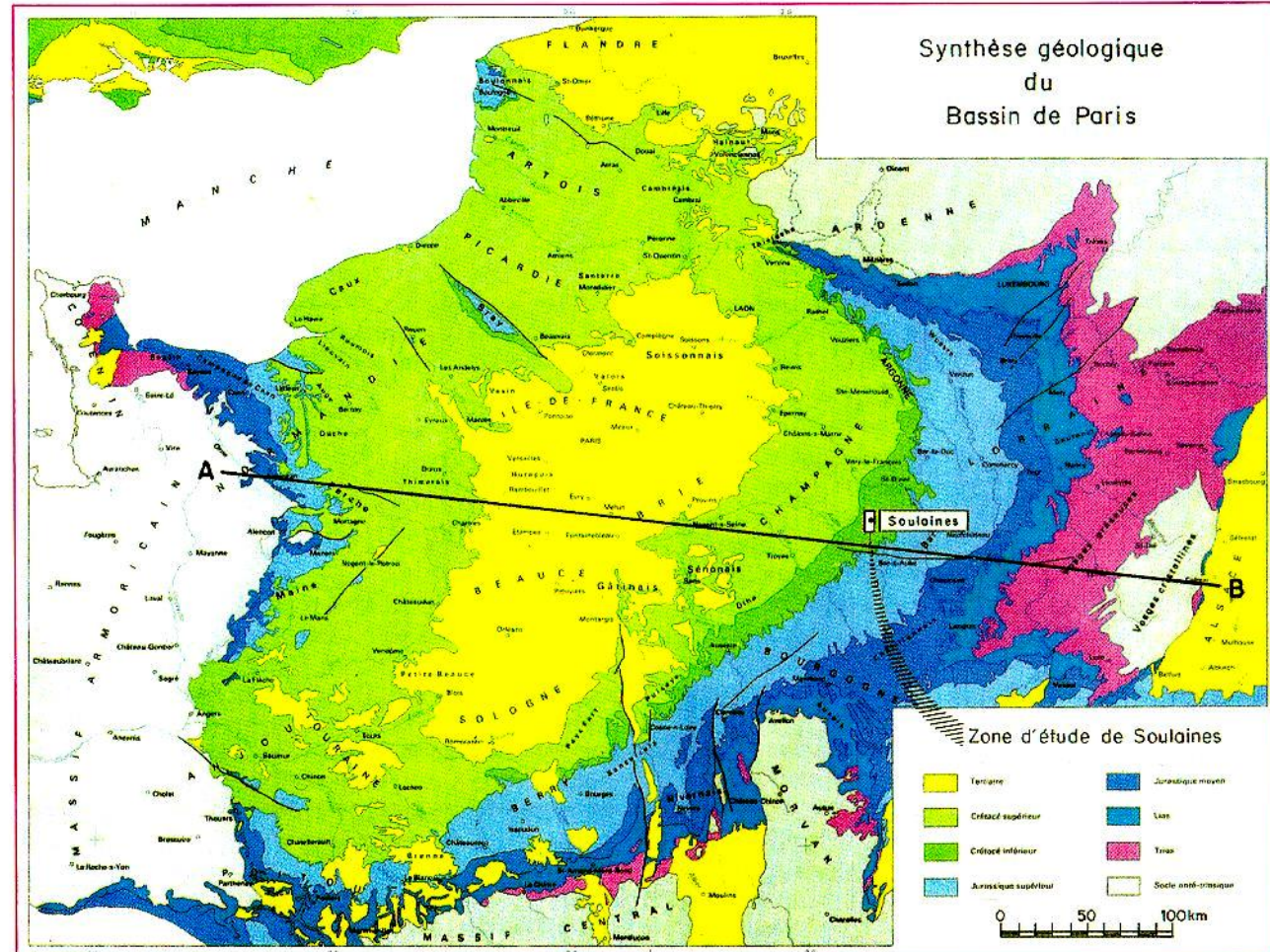
◆ Hydrogéologie : Structure simple

- Exutoires des eaux souterraines et des eaux de ruissellement bien connus
- Modélisation simple
- Niveaux des plus hautes eaux connus

◆ Géomécanique et géotechnique : structure stable

- Bonne qualité comme terrain de fondation
- Stabilité à long terme : faible sismicité

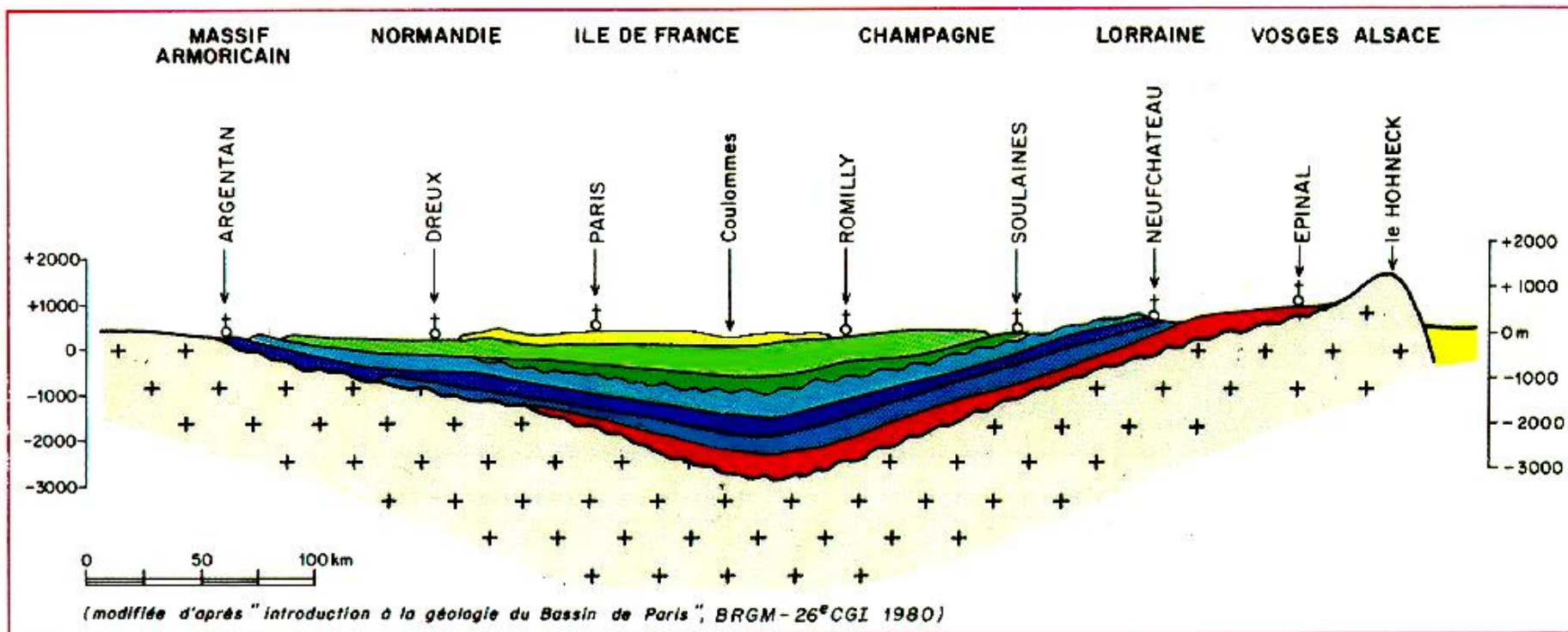
◆ Absence de ressources naturelles



(extrait de la carte géologique du Bassin de Paris - C. Méanien: BRGM 1980)

CE DOCUMENT EST LA PROPRIÉTÉ DE L'ANDRA.

IL NE PEUT ÊTRE REPRODUIT OU COMMUNIQUÉ SANS SON AUTORISATION EXPRESSE ET PRÉALABLE



1. Aptien : Crétacé inférieur

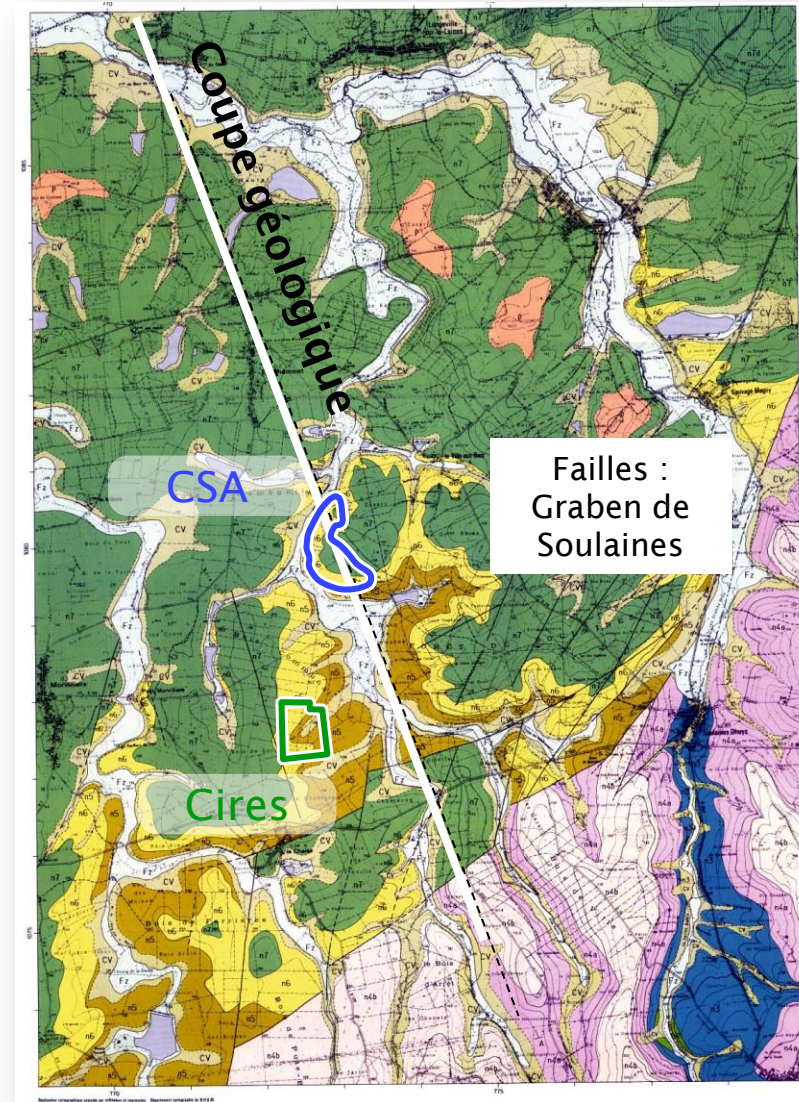
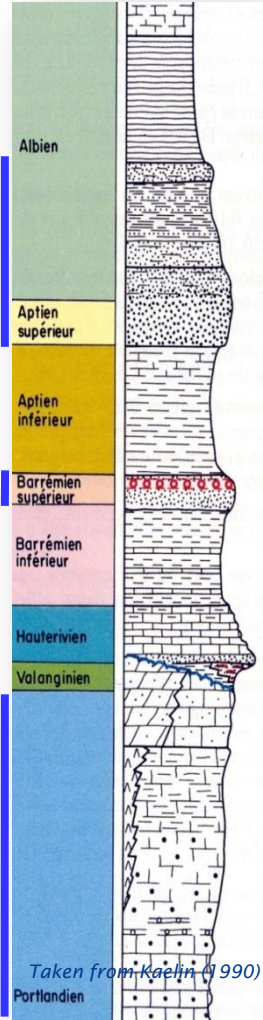
- Fondation des ouvrages de stockage
- Sables drainants homogènes (approx. 9m), discontinues au travers de la région
- Troisième barrière géologique
- Aquifère continu avec les sables albiens

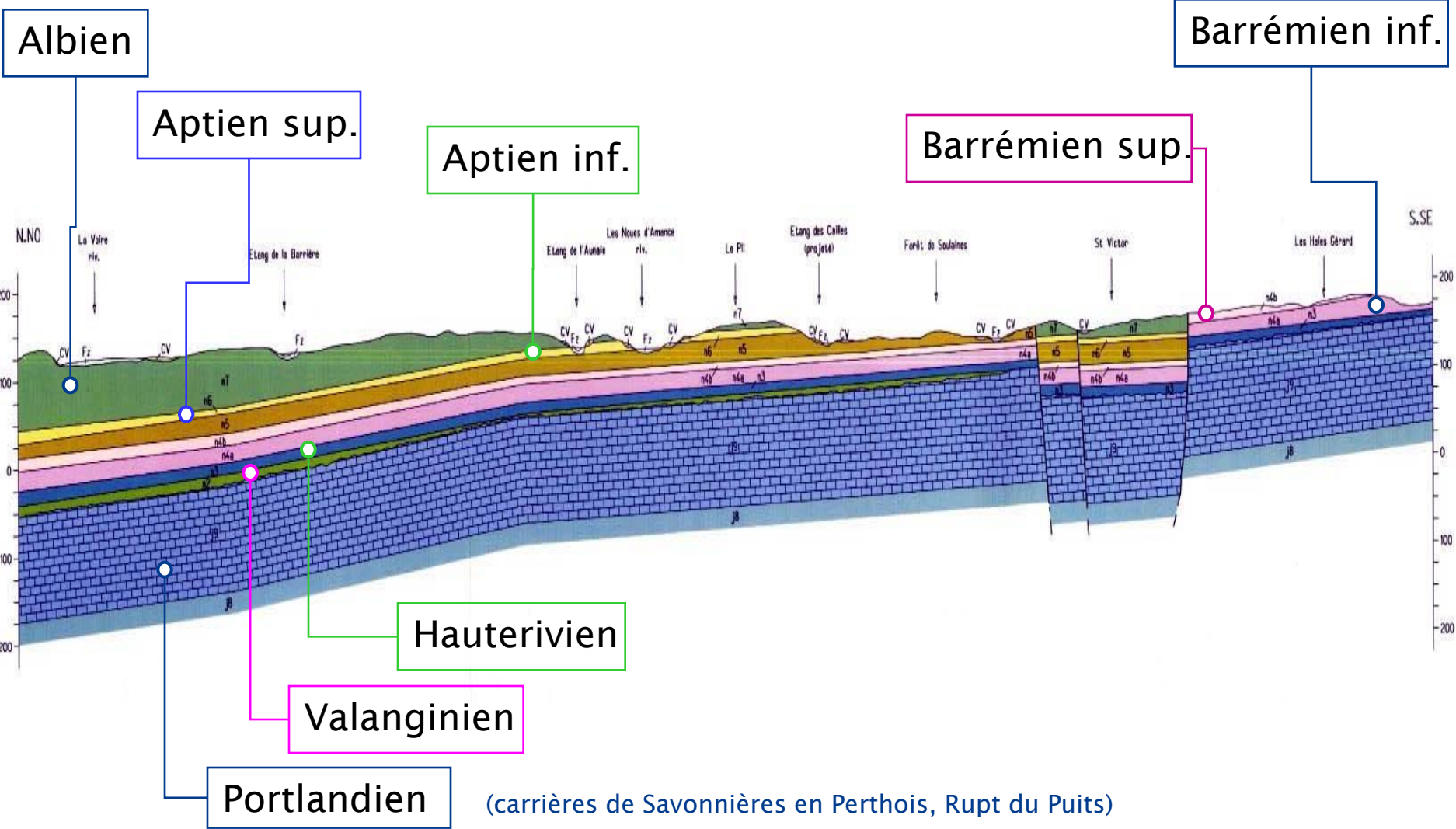
2. Barrémien : Crétacé inférieur

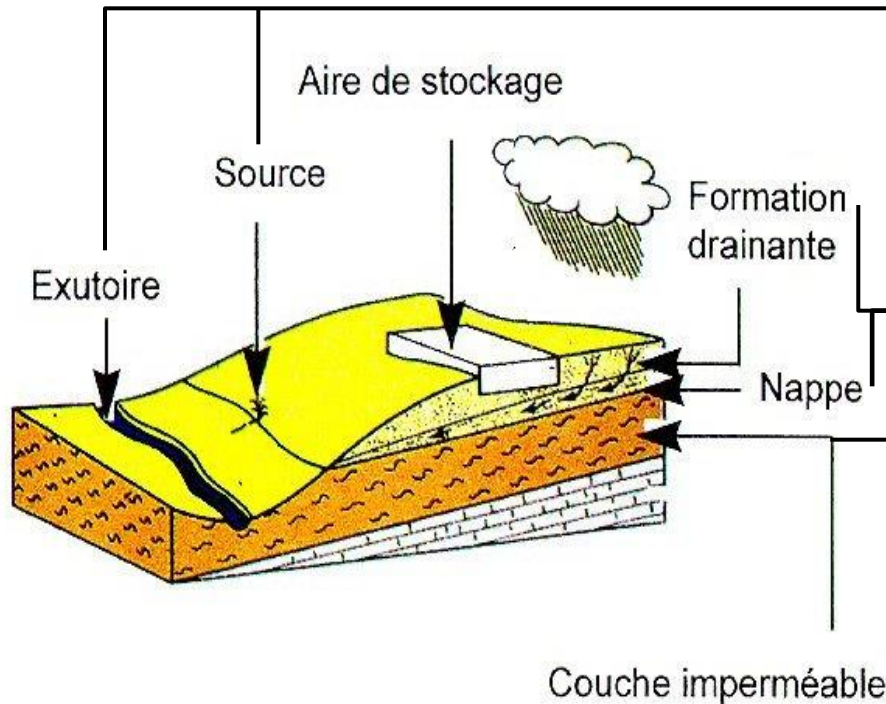
- Fin, sables fins irréguliers (4-9 m)
- Extension régionale
- Mauvaises propriétés hydrodynamiques et hydrochimiques (gypse)

3. Portlandien : Jurassique supérieur

- Calcaire multicouche et dolomites fissurés principalement (100-120m)
- Extension régionale
- Karstique au sud-est du Graben de Soulaines

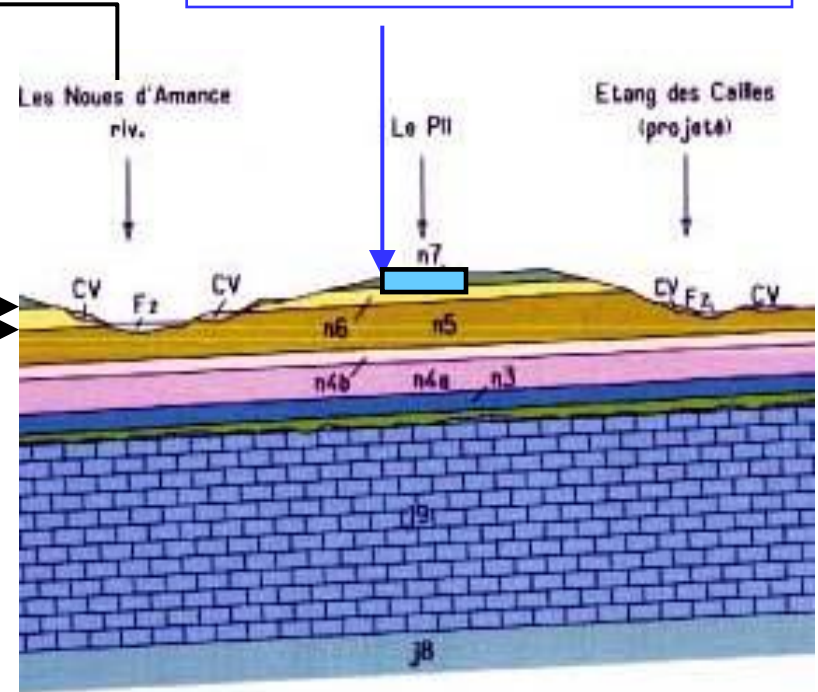






Rappel : concept initial

Centre de stockage de l'Aube



Coupe géologique du site du Pli



Surveillance de l'environnement

Contexte
national

Choix site &
Caractéristiques

Surveillance
environnement

Modèle
hydrogéologique

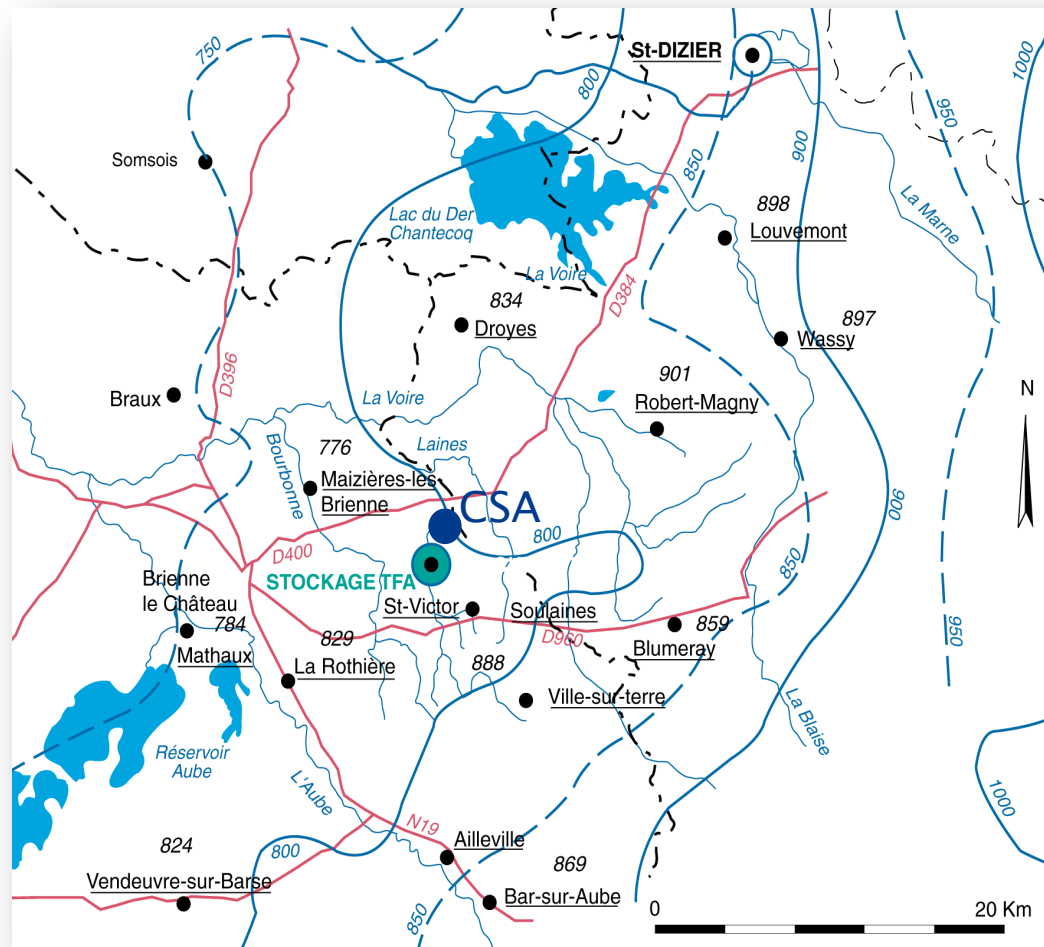
Transport des
RN /colloïdes

Zone
non saturée

Conclusion

Objectifs

- Collecte des mesures pour la caractérisation
 - Gammes de variations
 - Hétérogénéité spatiale
 - Longues chroniques de référence
- Stations
 - Ville-sur-Terre 1970-1993
 - Saint-Victor 1985-1999
 - CSA since 1992 (1999)
 - Saint-Dizier since 1950
 - Vendevre-sur-B. since 1876 (1884)



Objectifs

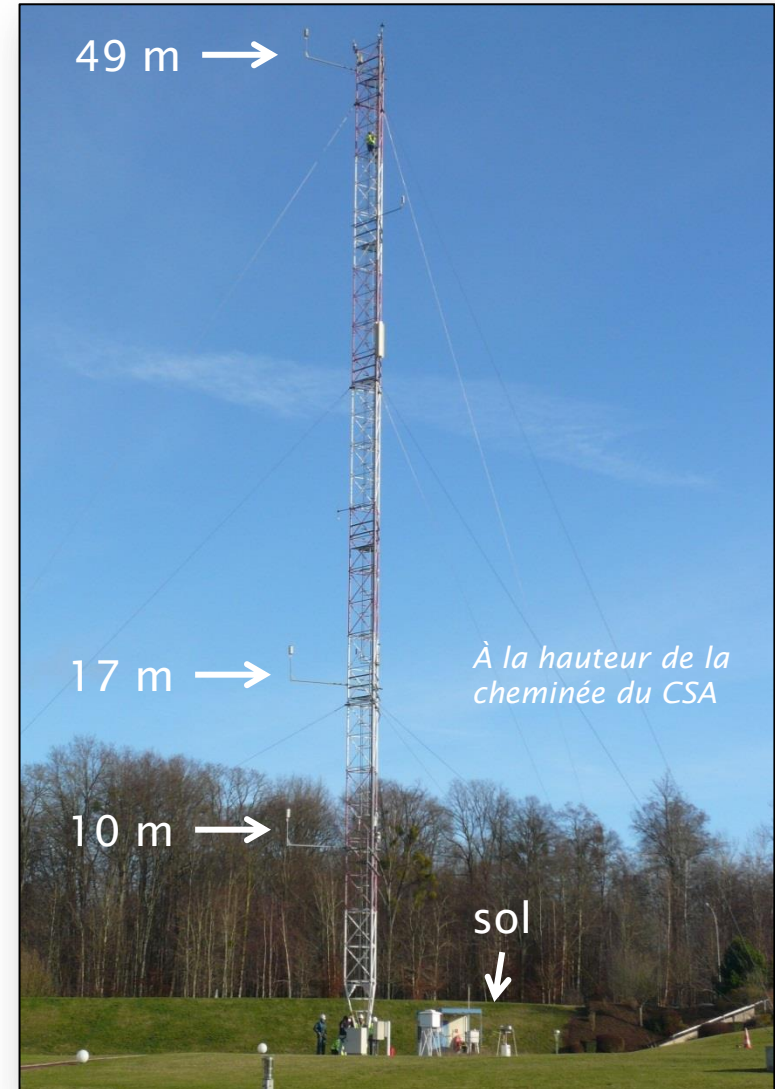
- Calcul des taux de recharge des aquifères
- Sécurité
- Evaluation d'impact en cas d'incident (transport atmosphérique)

Paramètres

- Pression
- Température
- Précipitations (eaux météoriques, incl. neige, grêle, etc.)
- Vent (direction, vitesse)
- Ensoleillement
- Evapotranspiration

Plus ...

- Surveillance atmosphérique



• Influences

- ◆ Continental humide et froid (plateau de Langres)
- ◆ Continental humide avec influence océanique (région Parisienne)

• Caractéristiques

• Précipitations

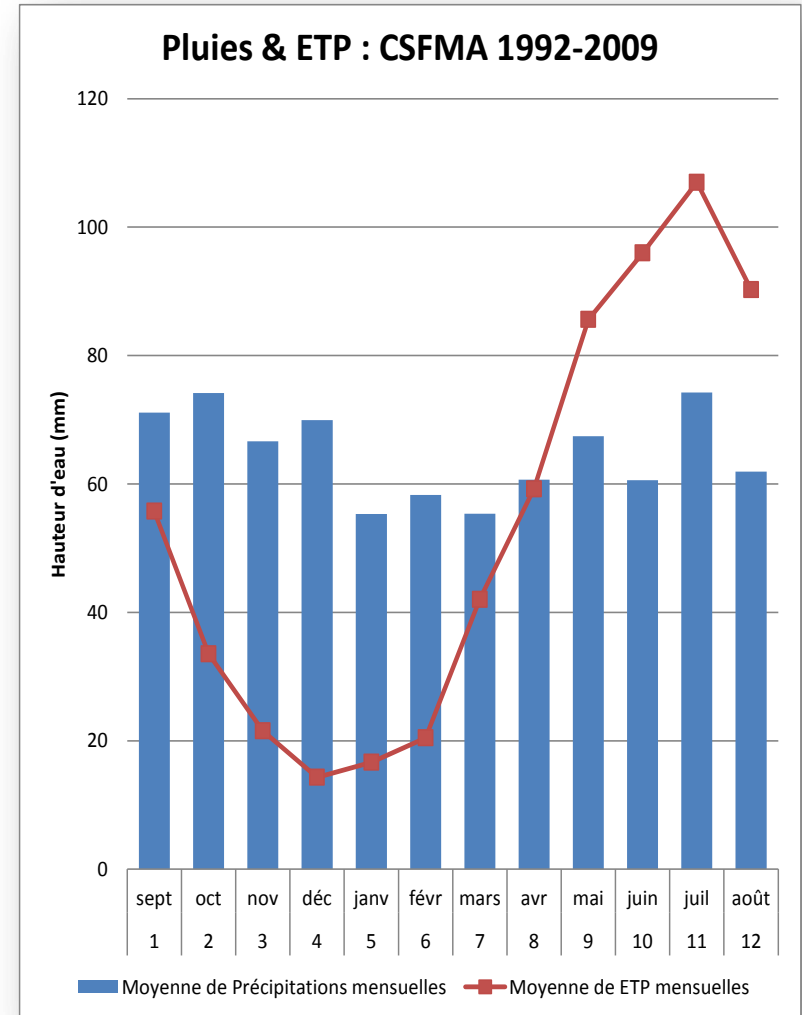
- Moyenne 780 mm
- Minimum (1975-1976) 530 mm
- Maximum (1993-1994) 1107

• Température

- Moyenne 11°C
- Minimum in January 0°C
- Maximum in July 25°C

• ETP (Penman-Monteih)

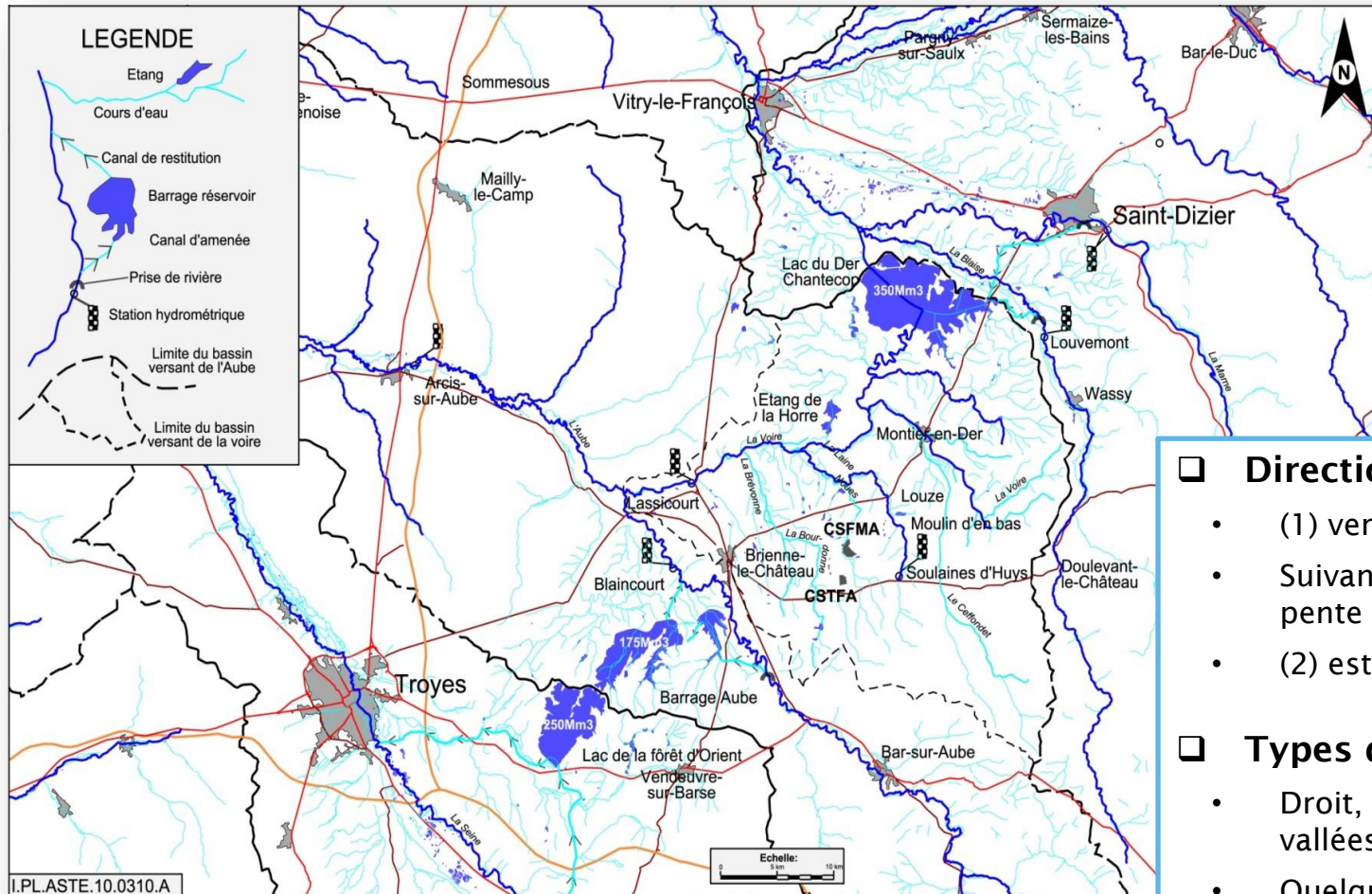
- Moyenne 650 mm

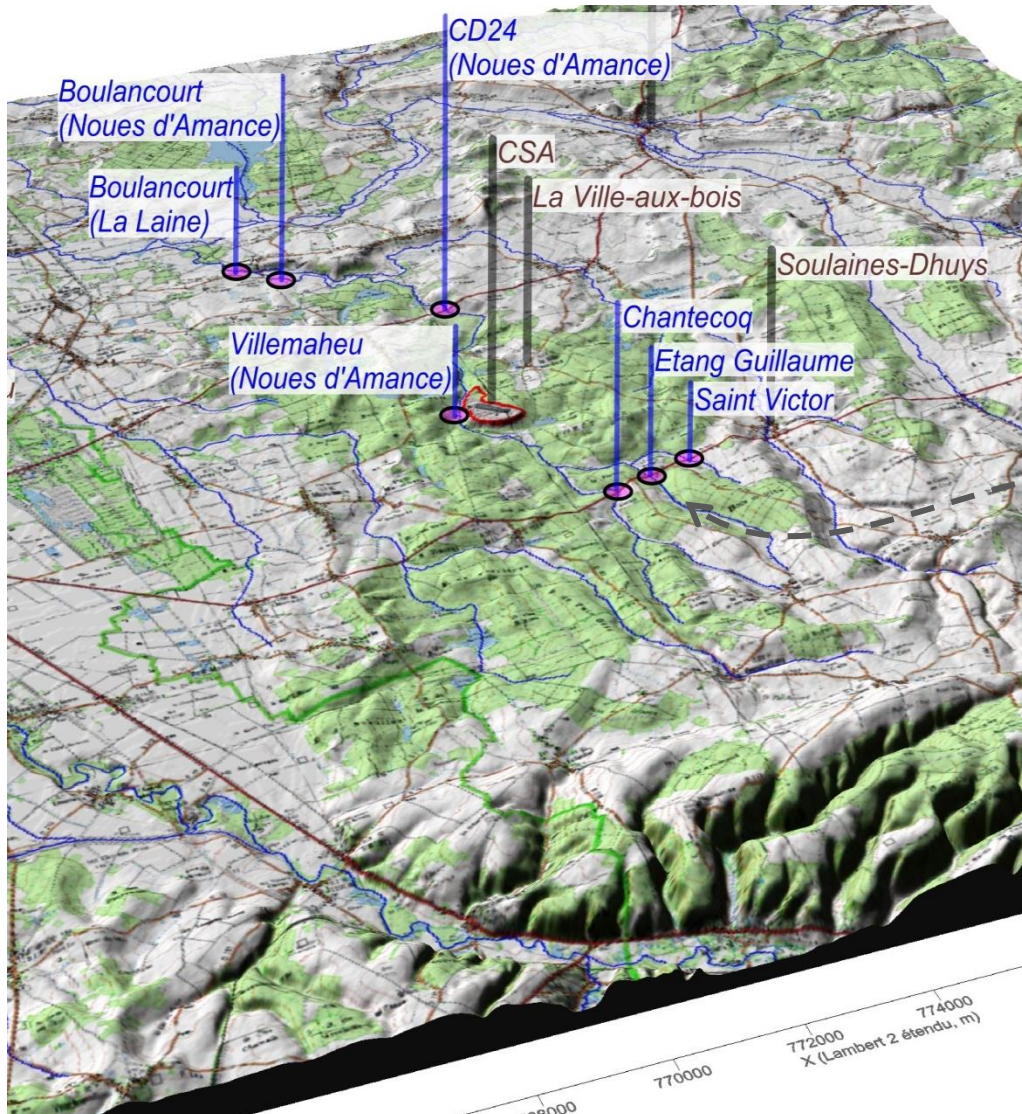


Objectifs

- Collecte des mesures pour la caractérisation
 - Gammes de variations (*cf. sensibilité*)
 - Hétérogénéité spatiale
 - Longues chroniques de référence
- Impact des rejets du bassin d'orage
 - Lors des étiages
 - Lors des crues
- Stations
 - Environs (principaux affluents)
 - A l'aval du point de rejet







Dtations de mesure hydrométriques (since 1984)

- **Aube**
 - La Laine
- **Noues d'Amance**
 - Boulancourt
 - CD24 (seule active)
 - Villemaheu
- **Affluents des Noues d'Amance**
 - Saint-Victor
 - Etang Guillaume pond
 - Chantecoq

Objectifs

- Risques de crue (Noues d'Amance)
- Caractérisation: estimation de l'impact des installations
- Quantification des flux, distribution spatiale et temporelle: impact des installations (dilution)
- Contribution à la connaissance (cours d'eau et relations nappe-rivière)

Objectifs

- Respect des prescriptions techniques (position de la nappe sous ouvrages)
- Modéliser le comportement hydrodynamique et le transport des radionucléides et des toxiques chimiques

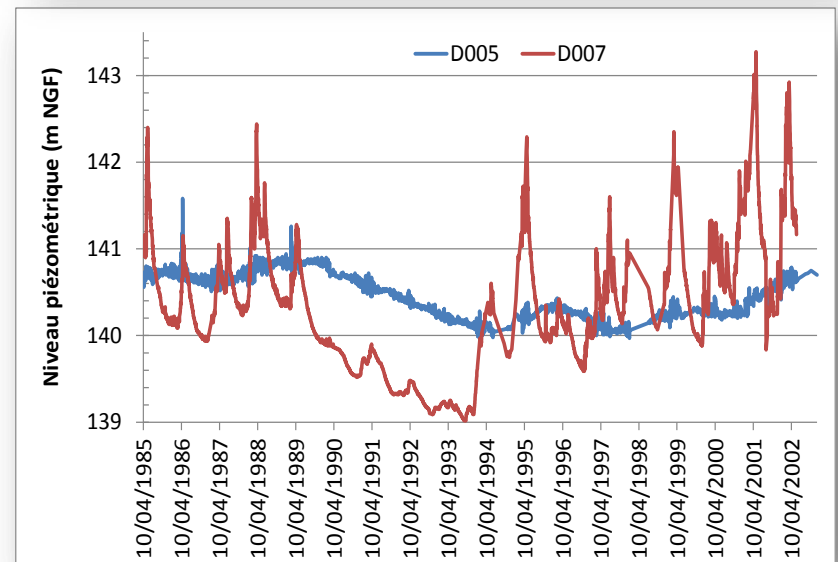
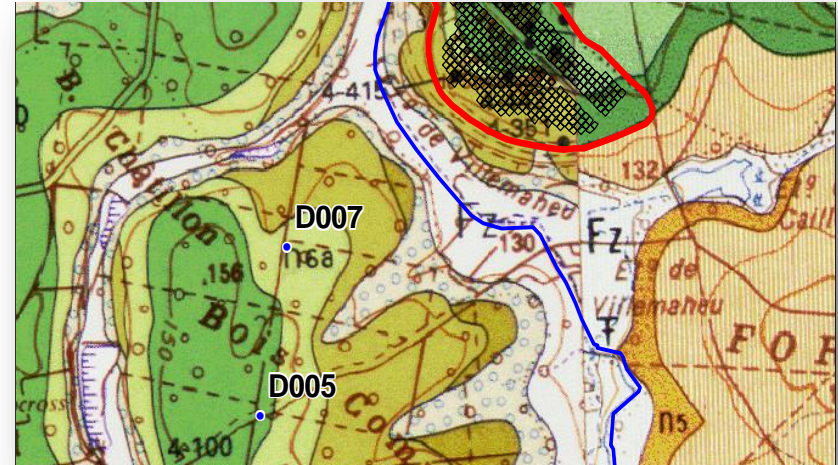
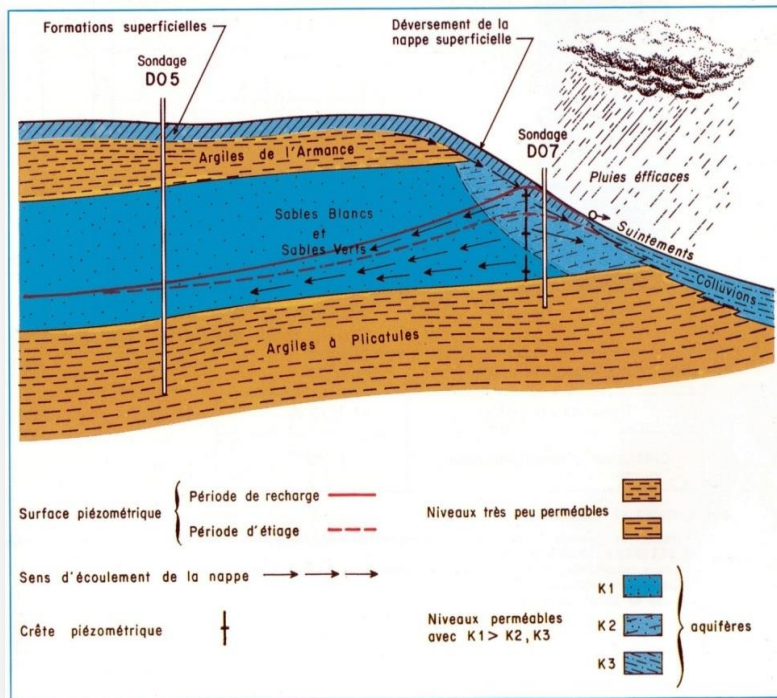


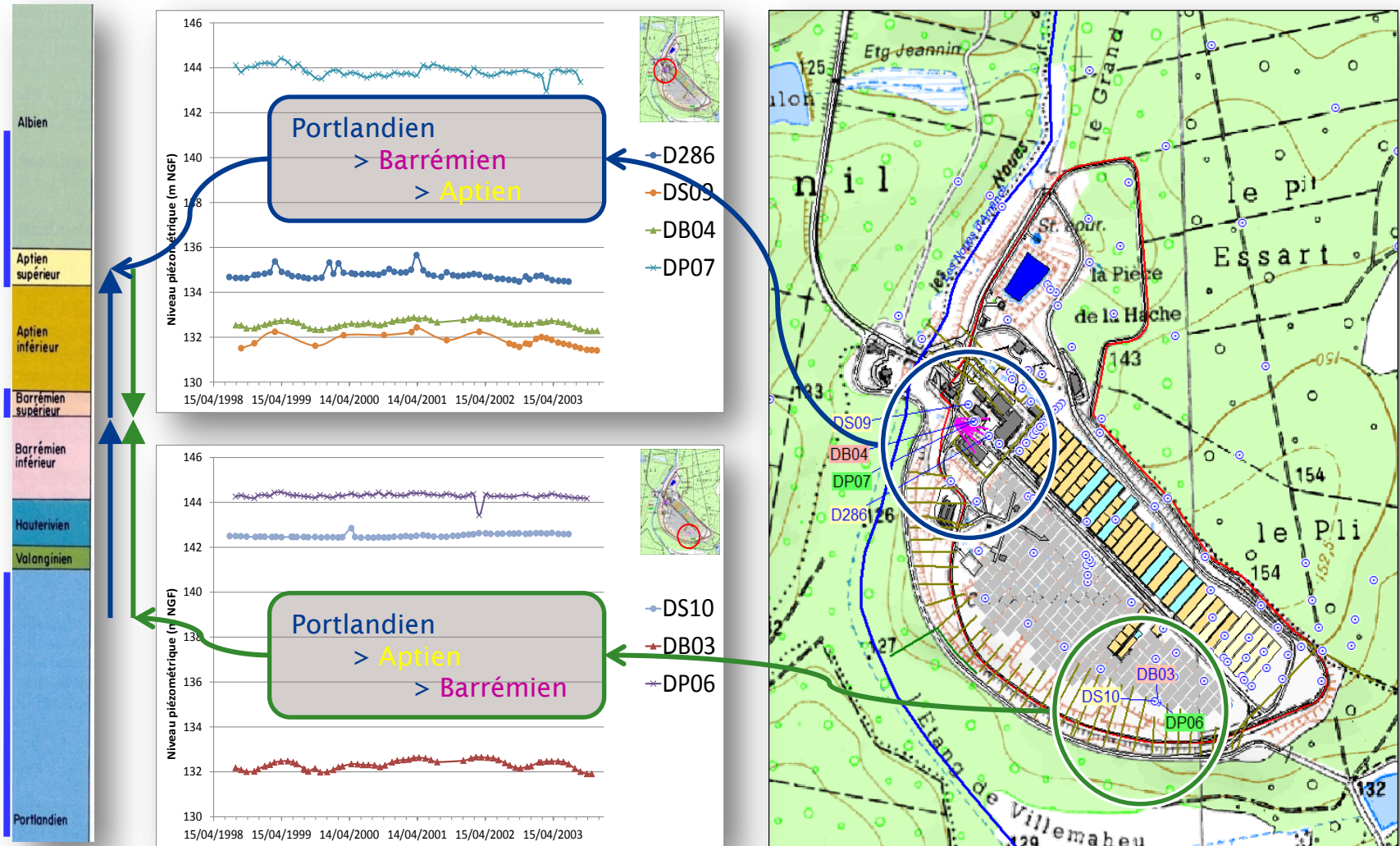
Moyens

- Réseau piézométrique et équipements adaptés aux besoins : surveillance en continu, modélisation
- cartes piézométrique
- cartes d'écart nappe - radiers
- Programmes d'acquisition :
 - reconnaissances géologiques,
 - mesures de vitesses d'infiltration,
 - essais de pompage,
 - traçages géochimiques,
 - mesures expérimentales de K_d ,
 - limites de solubilité, ...

Dynamique & recharge

- Sous couverture
- À l'affleurement
- \pm inversion temporaire des gradients hydrauliques





Actuellement : DS41 – DS71 (tranche 8) – projet tranche 9



Positionnement

- Au travers du plancher d'un élément de galerie

Permettent une surveillance à long terme au plus près des ouvrages :

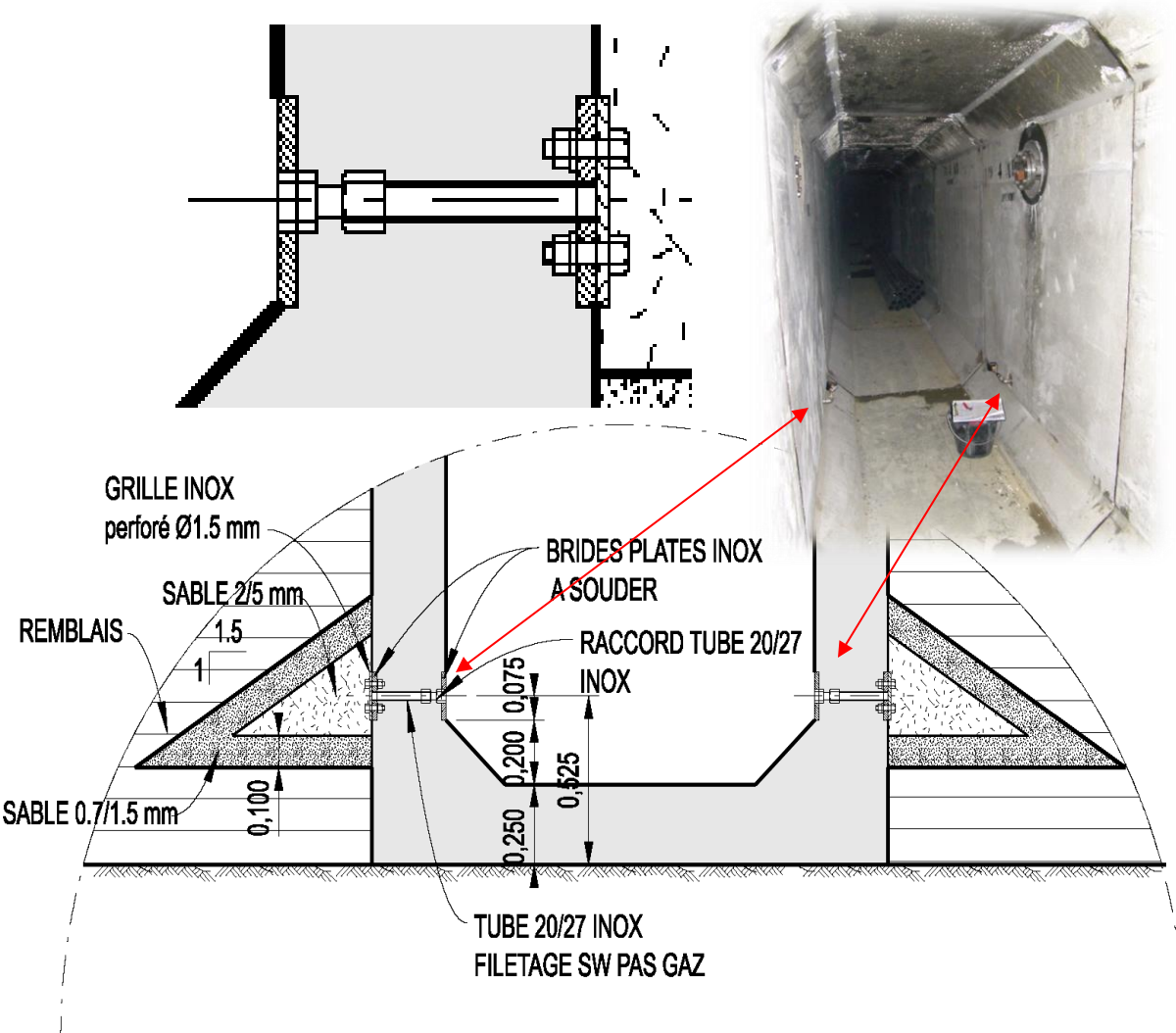
- Niveaux de nappe
 - Mesures manuelles
 - 2 enregistreurs
- Prélèvements
 - Pompes à 2 profondeurs

Spécificités :

- Seuls piézomètres du stockage conservés (et accessibles) en phase de surveillance
- Durée de vie (300 ans)
- Ne doivent pas être endommagés par les tassements (remplissage des ouvrages, couverture)
- Etanche (RSGE)
- Fluctuation libre du niveau de nappe (mesures manuelles et continues)







•Positionnement :

- Parements des éléments de galerie
- 3 tubes de chaque côté
- 3 galeries équipées (Tr 8)

•Intérêt :

- Mesurer les niveaux de nappe au droit des éléments de galerie
- Estimer l'influence des galeries sur les écoulements de nappe
- Intégrer ces observations dans les modèles



Modèle hydrogéologique

Contexte
national

Choix site &
Caractéristiques

Surveillance
environnement

Modèle
hydrogéologique

Transport des
RN /colloïdes

Zone
non saturée

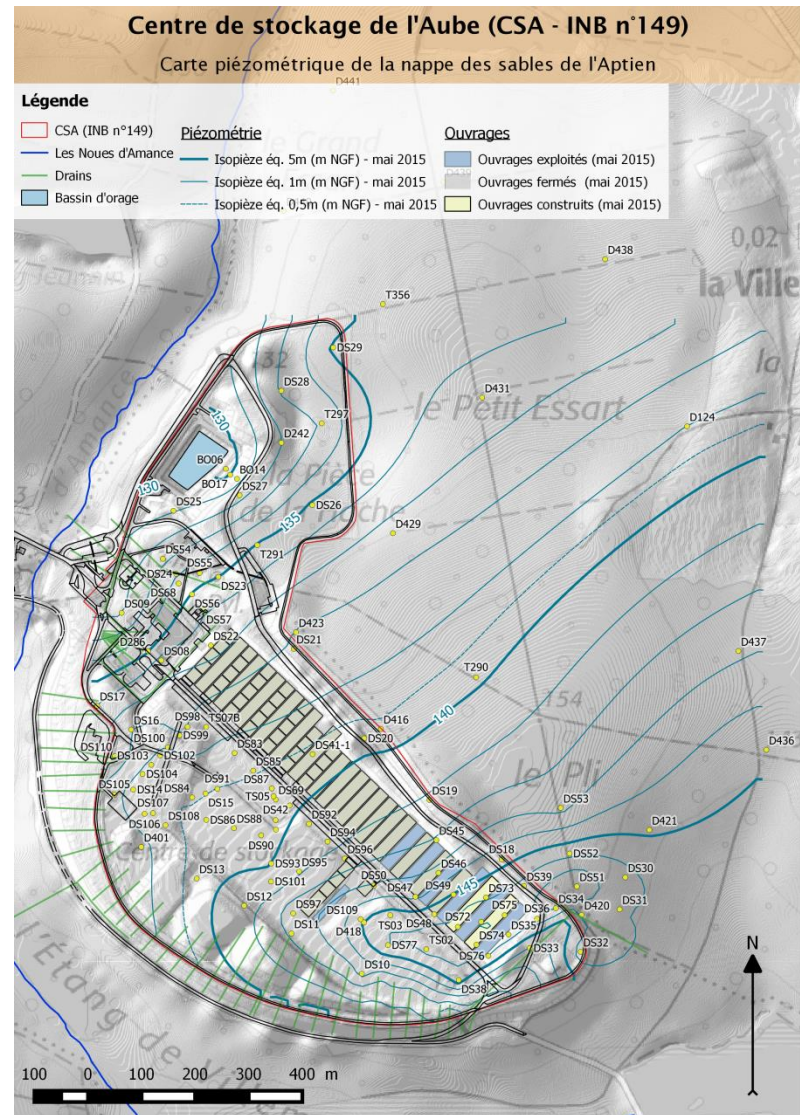
Conclusion

Support à la conception des ouvrages

- ◆ Évaluation du Niveau des Plus Hautes Eaux (NPHE)
- ◆ Implantation des ouvrages au dessus des NPHE

Support à l'évaluation de sûreté

- ◆ Évaluation impact biosphère à long terme
- ◆ Evaluation de la sûreté à long terme
 - Flux de radionucléides à l'exutoire unique
 - Flux de radionucléides à un pompage
- ◆ Phases exploitation, surveillance, post-surveillance



Historique

◆ 1998

- Modèle initial, 2D
- NPHE 1998

◆ 1999-2002

- Fortes recharges (> centennales)
- Localement : dépassement des NPHE et niveaux hauts vs radiers
- Dépassement des niveaux modélisés
 - → NPHE 2007 rehaussés

◆ 2012-2013

- Dépassement des niveaux modélisés
 - → NPHE 2007 rehaussés actualisés à mi-2013

Besoins d'évolution

- ◆ + galeries souterraines
- ◆ Calage avec événements 1999-2002

Refonte de 2010-2012






◆ Mise à jour des outils de calculs (standard du projet CIGEO)

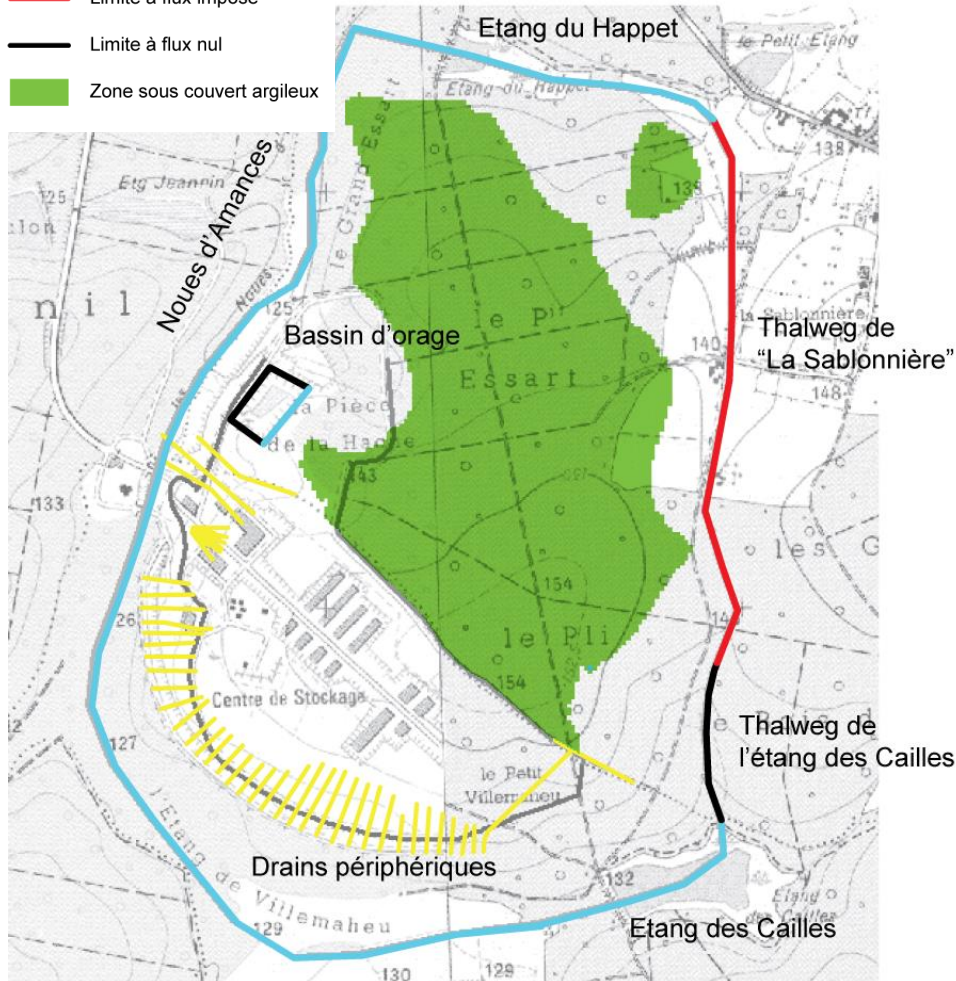
- Modélisation 3D
- Couplage explicite de l'écoulement et du transport
- Vers un couplage ouvrage et nappe
 - construction progressive des ouvrages de stockage
 - modification de la recharge associée
- Modflow 2000, différences finies

① Transfert direct vers zone saturée

◆ Besoin d'une évaluation resserrée des NPHE

- pour la conception optimisée du centre (construction d'ouvrages vers l'Ouest et le Sud-Ouest)
- Introduction de niveaux probabilistes ?

-  Surface de suitement partout ailleurs, sauf sous radier
-  Limite à charge imposée (topographie)
-  Limite à flux imposé
-  Limite à flux nul
-  Zone sous couvert argileux



Aquifère CSFMA :

- Nappe perchée alimentée par la pluie
- Piézométrie fortement influencée par la recharge

Identification des zones à recharge constante:

- ◆ Affleurement argiles
- ◆ Affleurement sables
- ◆ Plateforme de terrassement du CSFMA

Détermination de la recharge sur chaque zone

- ◆ Identification d'un piézomètre représentatif de la zone étudiée
- ◆ Utilisation d'un modèle pluie - recharge pour l'estimation de la recharge

Calage

- ◆ période 1993 - 2003
- ◆ Ajustement des paramètres, par points pilote (103 points)
 - Perméabilité
 - Emmagasinement

Hierarchisation des points de calage

- ◆ Mise en place d'un facteur de position
- ◆ Mise en priorité des points au niveau du stockage

Contrôle de la qualité du calage

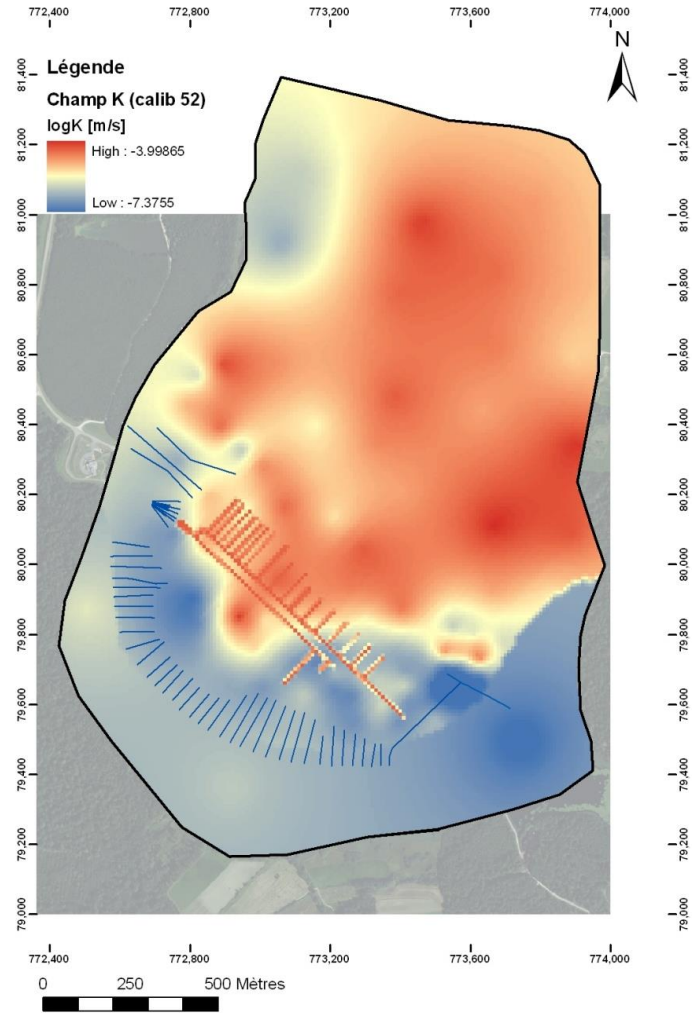
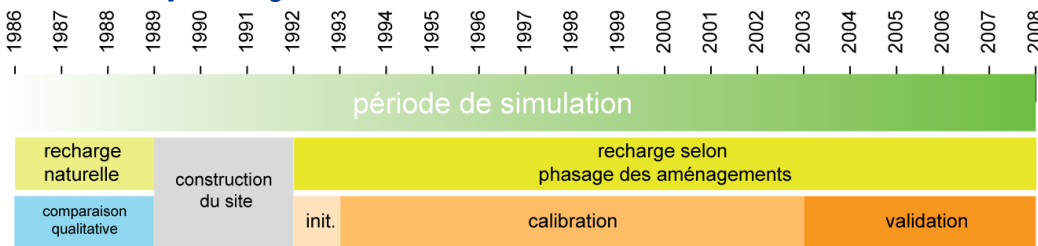
- ◆ aux points « piézomètres » (78 piézomètres)
- ◆ Index de calage : moyenne des écarts absolus entre piézométrie observée et simulée
 - Global / Par zone
 - Par période de hautes ou basses eaux

Gradients hydrauliques

- ◆ comparaison des gradients mesurés et simulés

Validation du modèle calé sur la période 2003- 2008

Comparaison des simulations avec une chronique moyenne observée avec un pas de temps 15 jours



Carte log des perméabilités du modèle calé

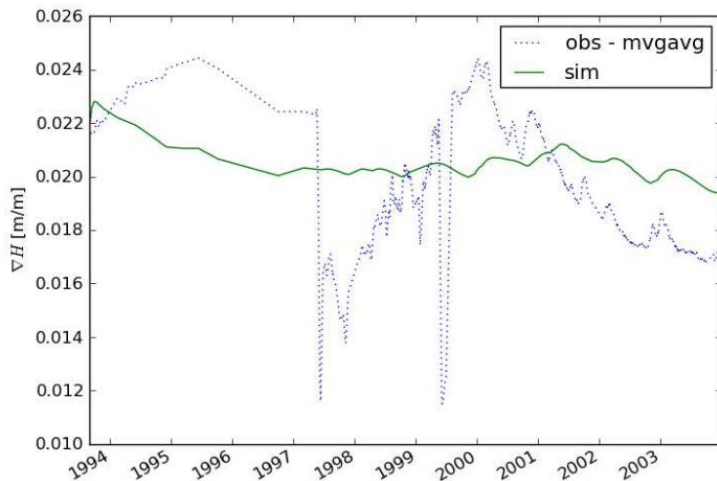
Index de calage

- ◆ Au global : 23 cm
- ◆ Sur la zone plateforme : 20.5 cm

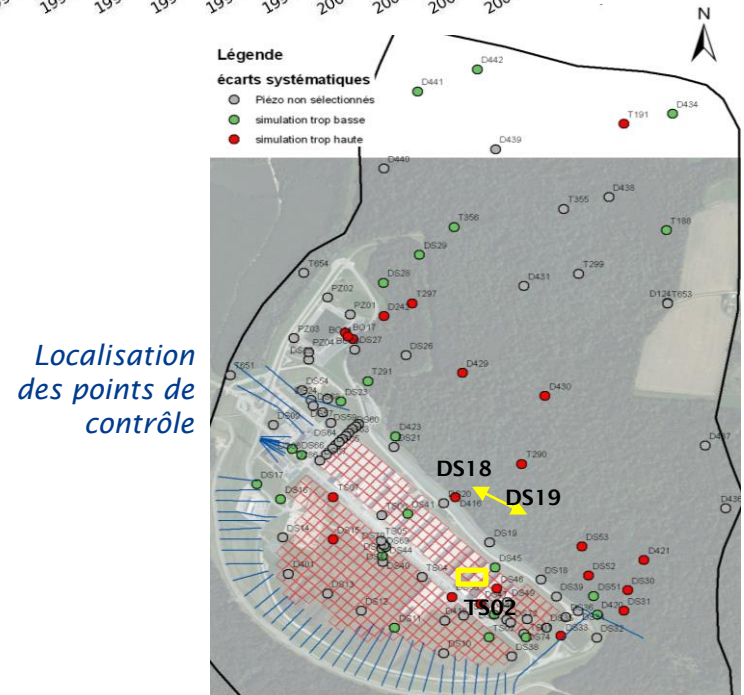
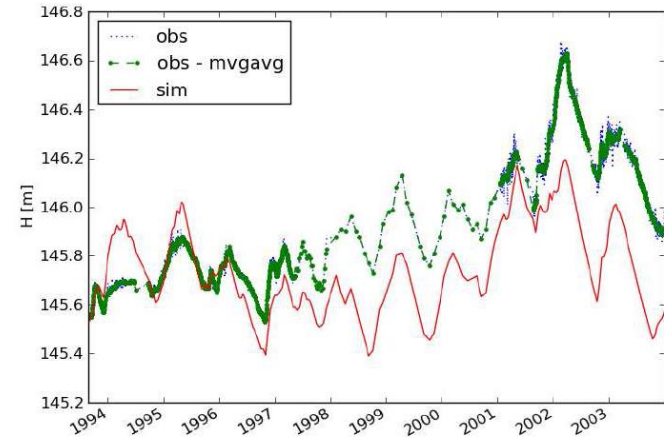
Gradients hydrauliques

- ◆ Ecarts de l'ordre de 18 % entre simulé et observé
- ◆ Tendence générale bien simulée, sauf certains événements (pluviométrie « localisé », erreurs de mesure etc.)
- ◆ Ecarts acceptables vis-à-vis de l'objectif de la modélisation du transport

Gradients observés et simulés entre DS18 et DS19



Piézométrie observée et simulée à TS02



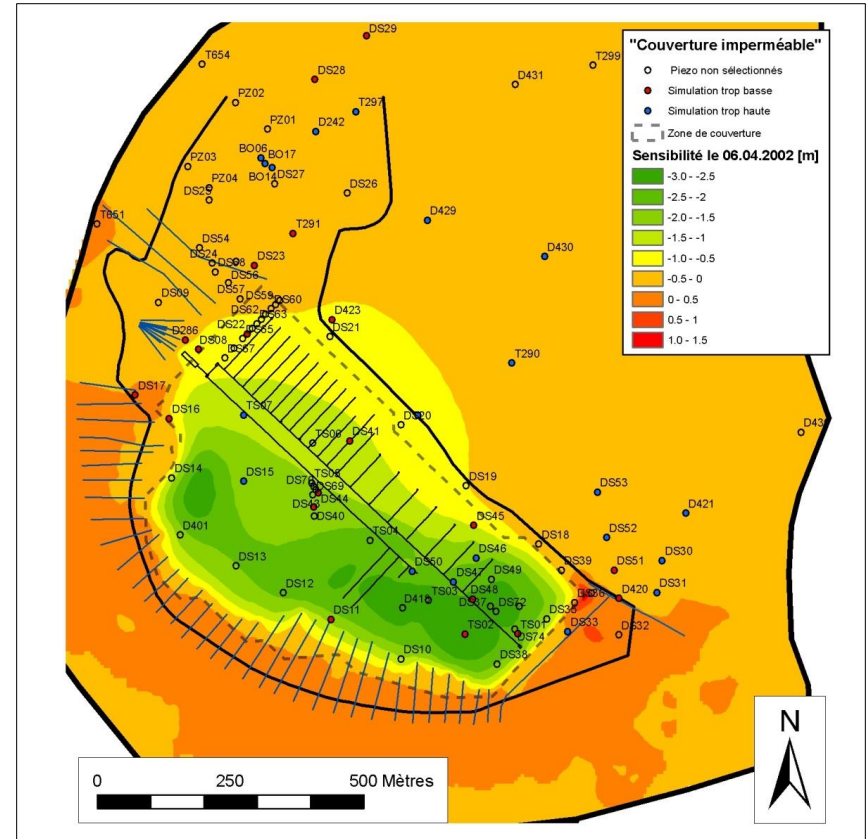
Localisation
des points de
contrôle

Objectif de l'étude de la sensibilité

- ◆ Identification et hiérarchisation des paramètres influençant la piézométrie
- ◆ Identification des voies d'amélioration du modèle
- ◆ Etude de situations particulières

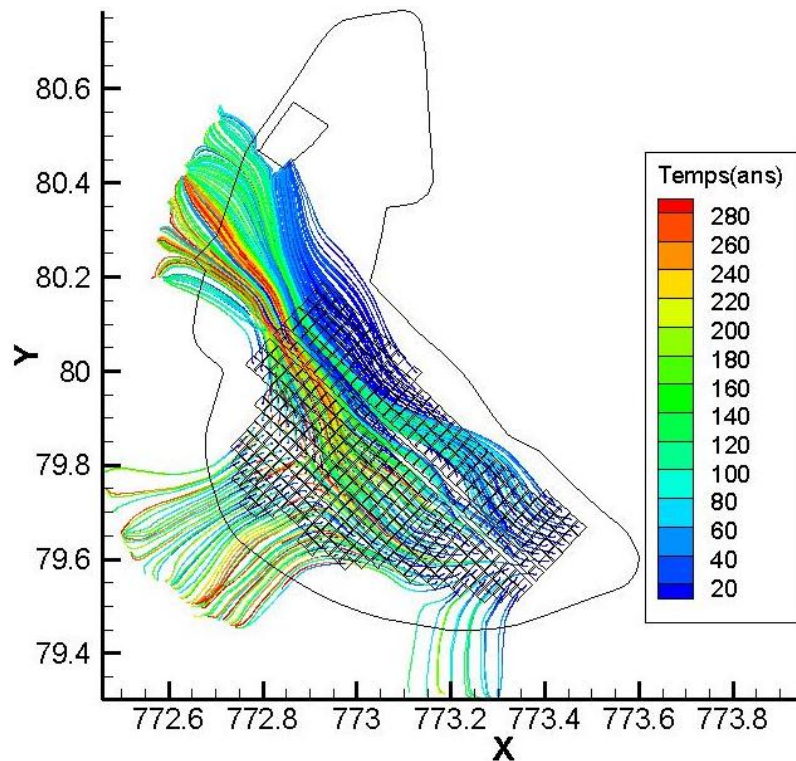
Résultats de l'étude de sensibilité: par ordre d'importance

- ◆ Recharge : réduction de la recharge de 30 mm/an à 1.5 mm/an
 - Baisse des charges de l'ordre de 3m
 - Nécessité de mieux évaluer ce paramètre
- ◆ Perméabilité des remblais RSGE : augmentation de K d'un facteur 10
 - Baisse des charges de l'ordre de 1m sur les zones RSGE
 - Travail de caractérisation des remblais
- ◆ Désactivation des drains
 - Augmentation des charges de l'ordre de 1m sur la zone plateforme, jusqu'à 6m sur la zone drain
 - Situation étudiée pour l'analyse de sûreté

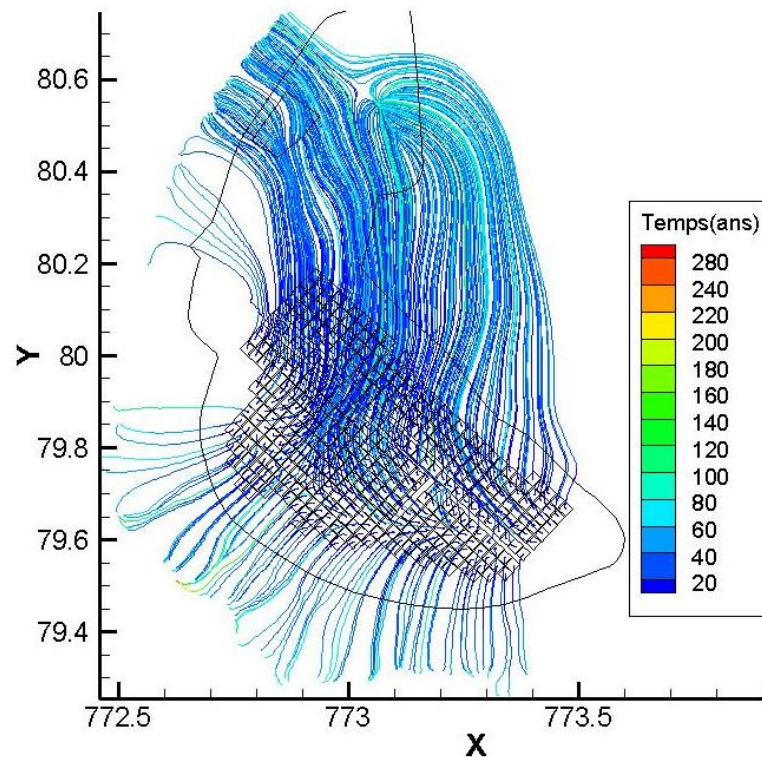


Cartes des écarts de charge relatifs à la réduction de la recharge

Exploitation & surveillance



Post-surveillance



Tous les dispositifs de l'installation sont inactifs/inefficaces:

- Bassin d'orage
- Couverture

Une refonte du modèle opérationnelle

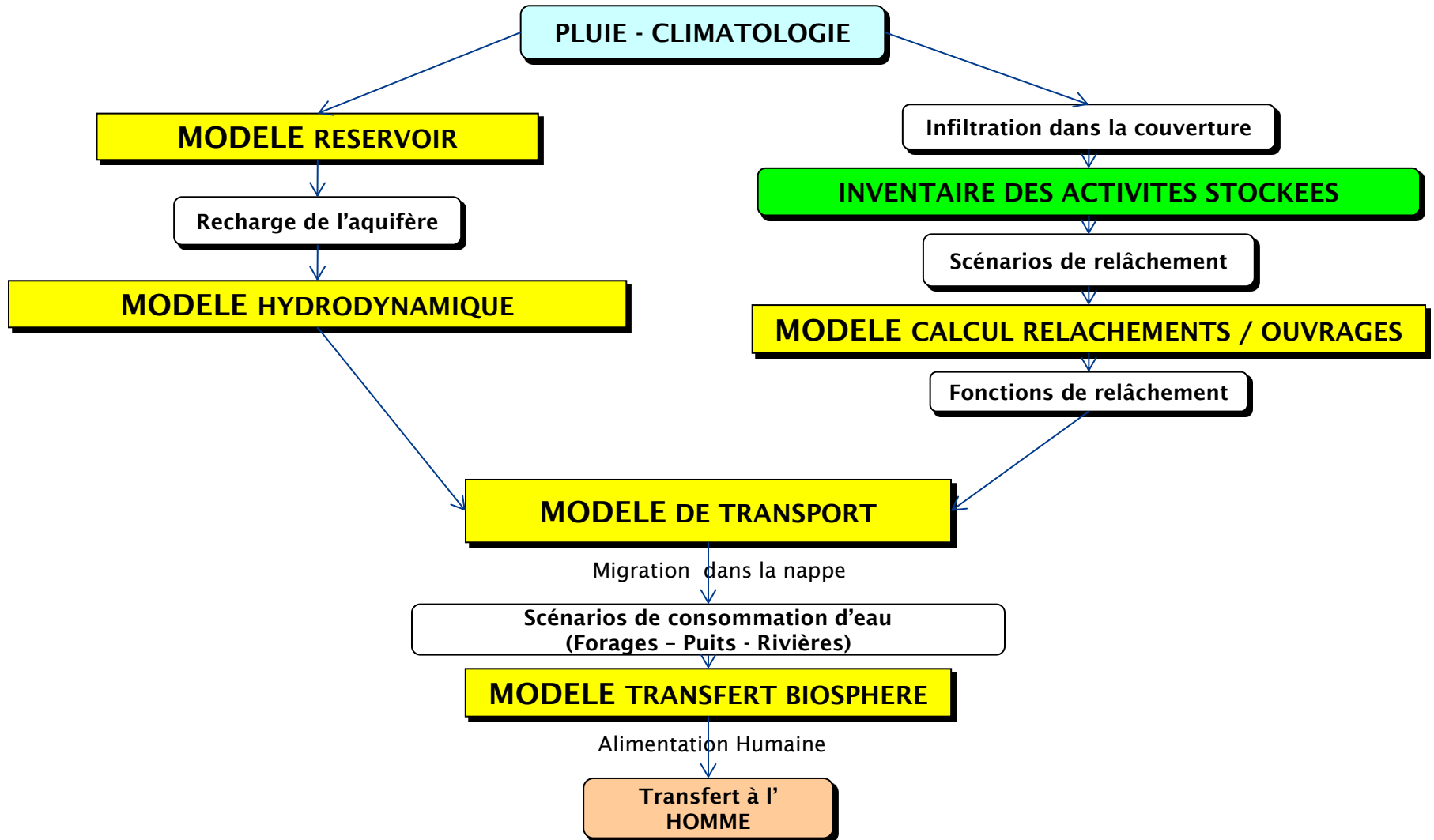
- ◆ Calage globalement satisfaisant

Des travaux en cours

- ◆ Sensibilités aux paramètres
- ◆ Développement du modèle de transport
 - Etude des trajectoires et vitesses de migration
 - Etude de sensibilité au paramètre de rétention
- ◆ Calcul du niveau des Plus Hautes Eaux

Des applications spécifiques 2011-2012

- ◆ Analyse de l'impact du tassement lié aux ouvrages sur l'aquifère
- ◆ Préparation du RDS 2014-2016
 - Quantification de la simplification « multi 1D » du modèle de sûreté à partir du modèle 2D/3D
 - Etude de l'impact de la zone non saturée sur la migration des radioéléments
 - Evaluation du couplage continu ouvrage-nappe





Transport des RN par les colloïdes

Contexte
national

Choix site &
Caractéristiques

Surveillance
environnement

Modèle
hydrogéologique

Transport des
RN /colloïdes

Zone
non saturée

Conclusion

Scénarios de sureté

- ◆ Basé sur transport dissous
- ◆ Pas de prise en compte du transport particulaire des RN

Problématique

- ◆ Paramètres du transport particulaire ?
 - Taille, nature, vitesse, artefacts, ...
 - Porosité accessible réduite : transport plus « rapide » que l'eau ?
- ◆ Origine des colloïdes
 - Naturelle
 - Créés par la dégradation du stockage
- ◆ Paramètres d'adsorption ?
 - RN concernés, lois, conditions physico-chimiques (naturelles / labo), K_d

Etudes réalisées

1. K_d labo / K_d in-situ (U)
2. Types de colloïdes
3. Traçage colloïdal

Réalisations

- ◆ 1 thèse (P. Le Cointe)
- ◆ 1 contrat de recherche (Subatech / Ecole des mines de Nantes)
- ◆ Articles & communications

Colloïdes

◆ Naturels

- Argile, calcite, matière organique
- Total : 0,5 ppb environ
- Max 60nm

◆ Artificiels

- non toxiques
- stables & non réactifs
- densité 1
- facilement détectables
- reproduisant le comportement des colloïdes naturels

→ Polystyrène 60nm

Traceurs dissous

- ◆ Br-
- ◆ I-
- ◆ D₂O

Principe

◆ Expériences en colonne

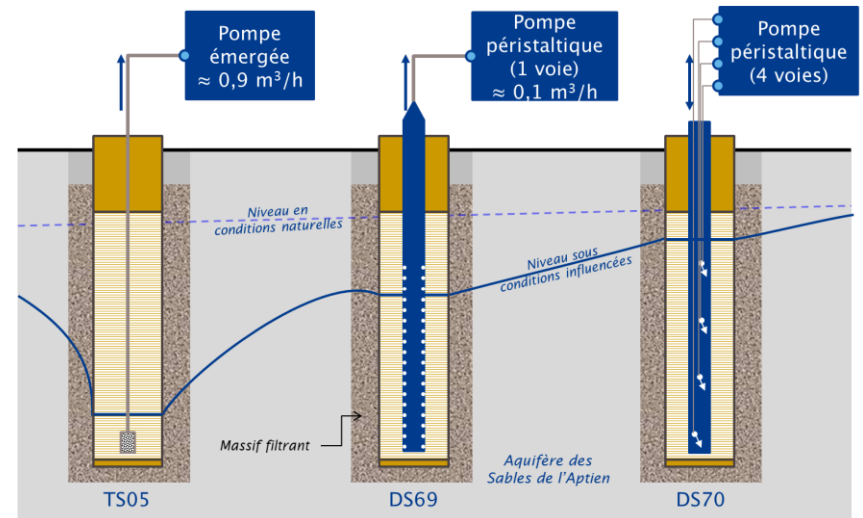
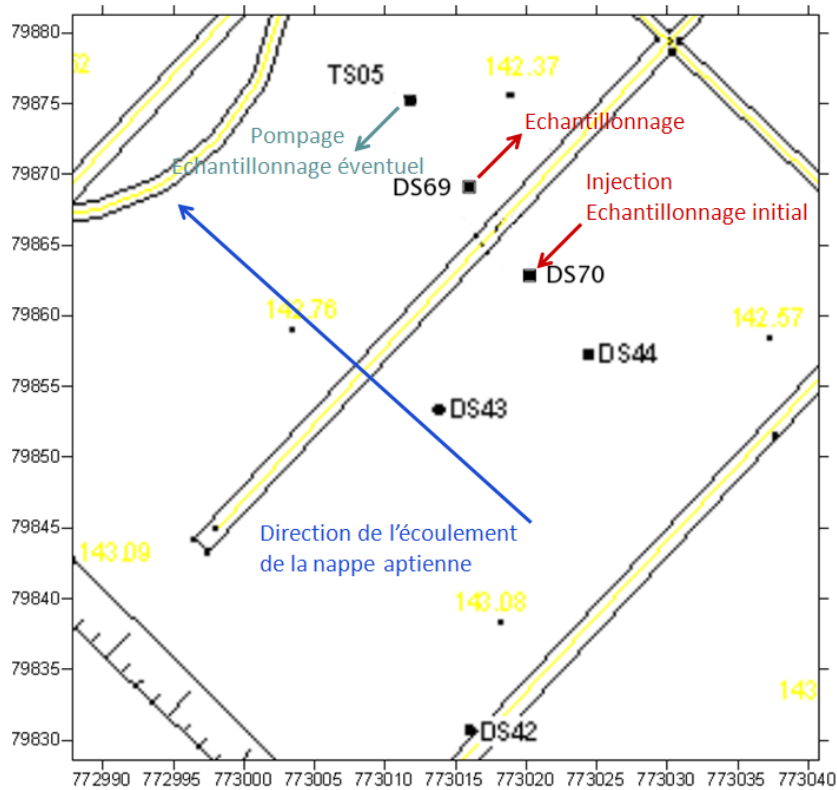
◆ Traçage in-situ

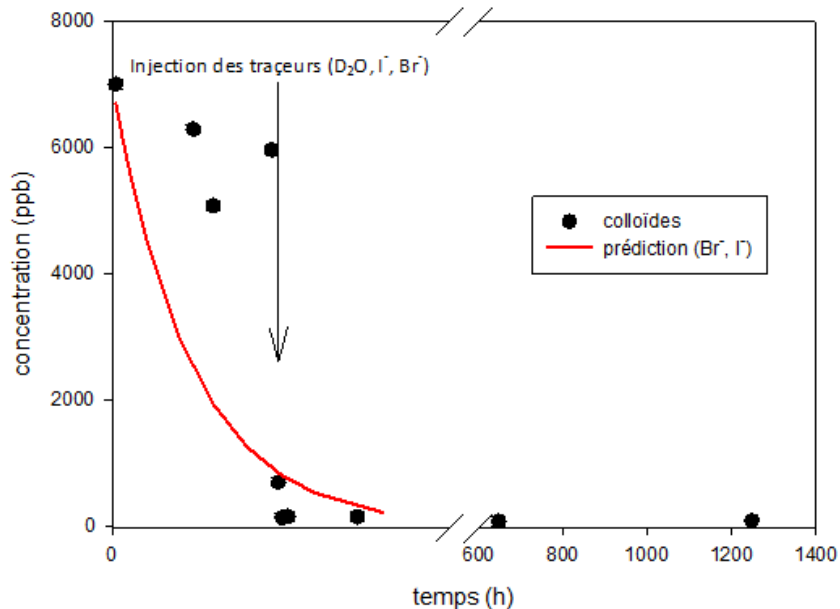
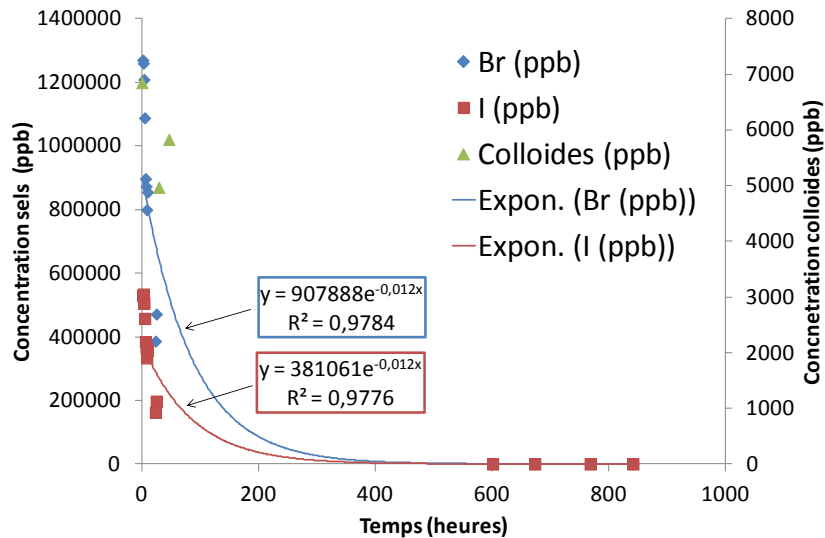
- 1 ligne d'écoulement
- 2 injections
 - Colloïdes (1,4g)
 - traceurs dissous (48h après)
- 3 forages
 - Pompage
 - Prélèvement
 - Injection
- Préleveurs automatiques
- Contraintes techniques (sécurité, INB, ...)

Mesure colloïdes

◆ LIBD (Laser Induced Breakdown Detection), détection sonore

→ Taille et concentration





Traceurs dissous

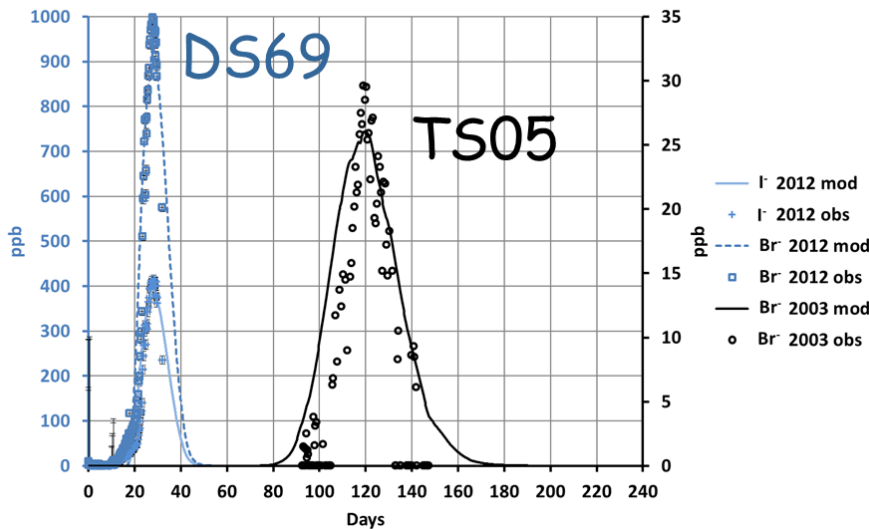
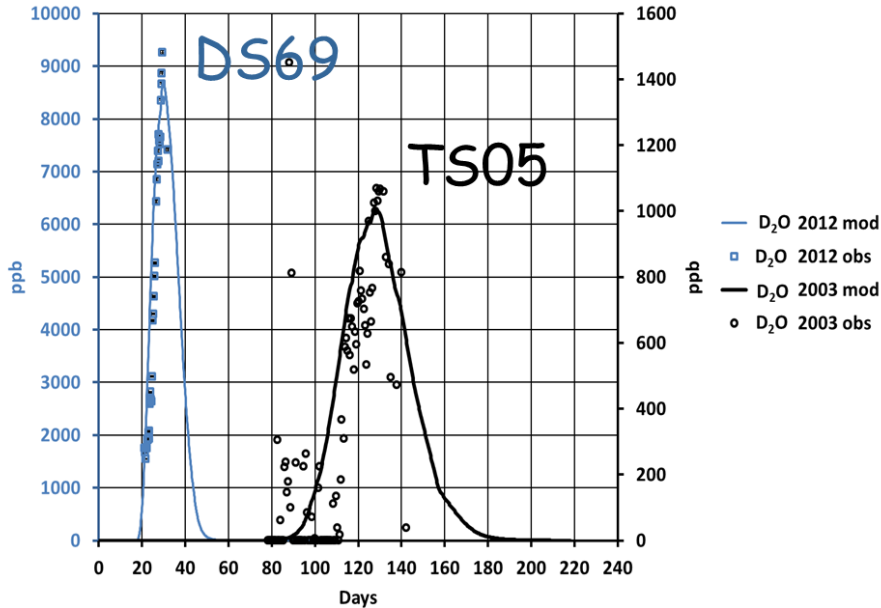
- ◆ sortis du forage d'injection

Traceurs colloïdaux

- ◆ Diminution +lente que prévue
- ◆ Diminution apparente brutale a l'injection des traceurs dissous
 - → Flocculation (solution salée)
 - Env. 10% de colloïdes sortis du forage

Floculation/défloculation

- ◆ Labo : phénomène reproduit aux concentrations max
- ◆ Pas d'inversion du phénomène



➔ Echec du traçage colloïdal

Restitution

- ◆ Sortie des traceurs dissous
- ◆ Exclusion anionique de l'iode
- ◆ Sorption nulle de l'iodure

Cf. Razafindratsima et al. (2015), Journal of Hydrology 520, 61-68



Transfert des RN gazeux dans l'environnement

Zone non saturée

Contexte
national

Choix site &
Caractéristiques

Surveillance
environnement

Modèle
hydrogéologique

Transport des
RN /colloïdes

Zone
non saturée

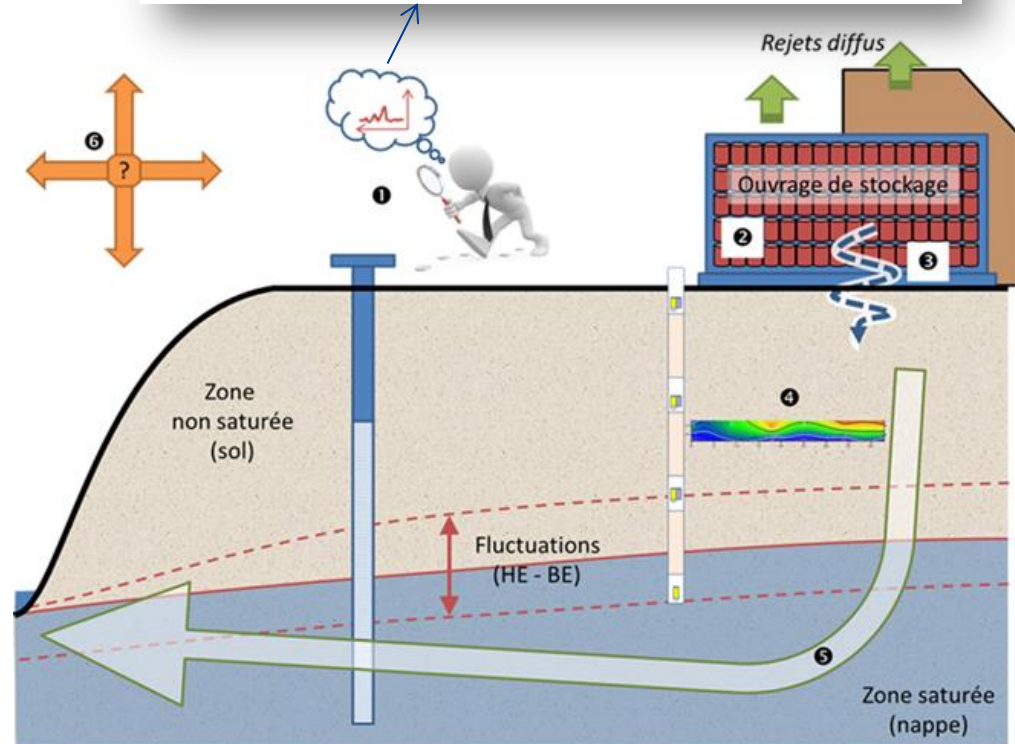
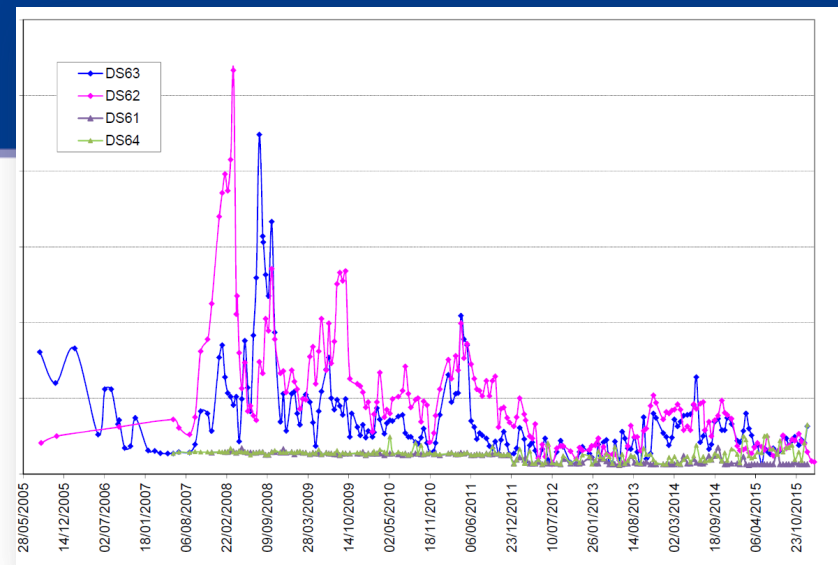
Conclusion

Origine de l'étude

- ◆ Réception de colis tritiés (plaques radioluminescentes)
- ◆ Détection de tritium à l'aval (quantifiable)
- ◆ Besoin de communication & connaissances suppl.

Objectifs

- ◆ Faire le lien entre
 - colis / ouvrages de stockage
 - Nappe
- ➔ Zone non saturée
- ◆ RN / matrices
 1. Tritium sur l'eau
 2. Extension au 14C sur l'eau et le gaz

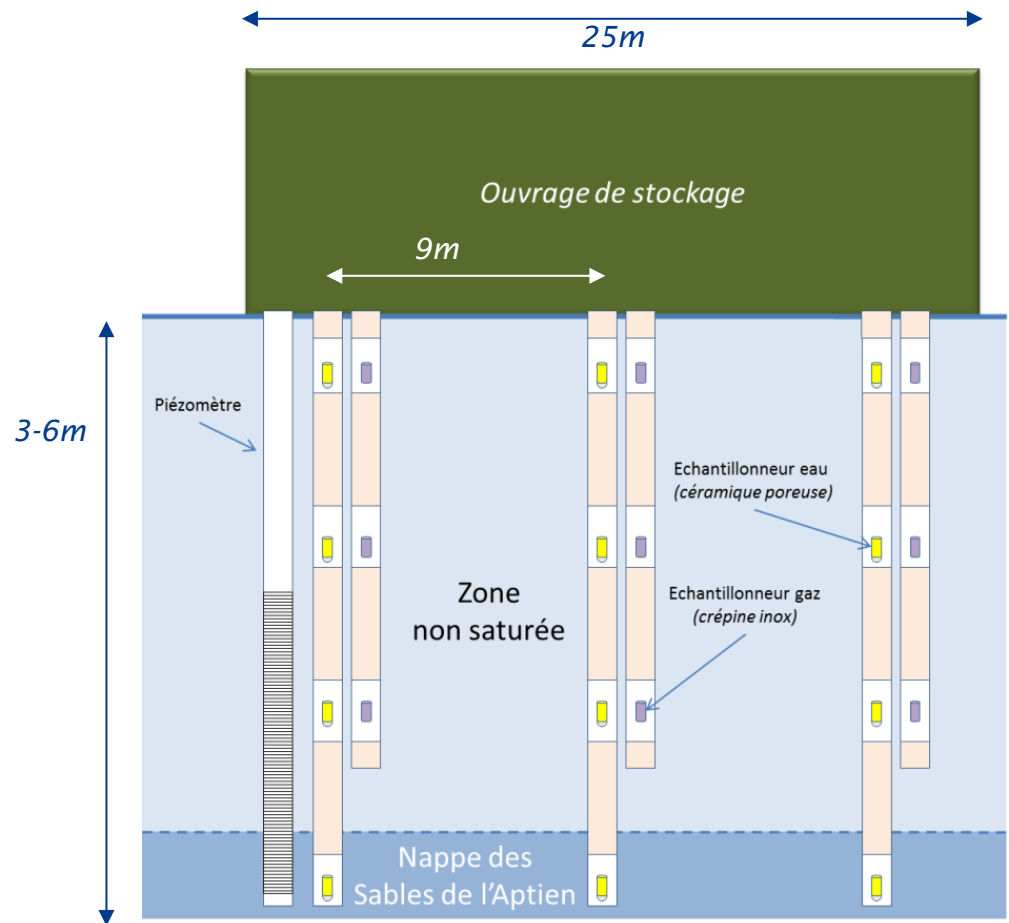


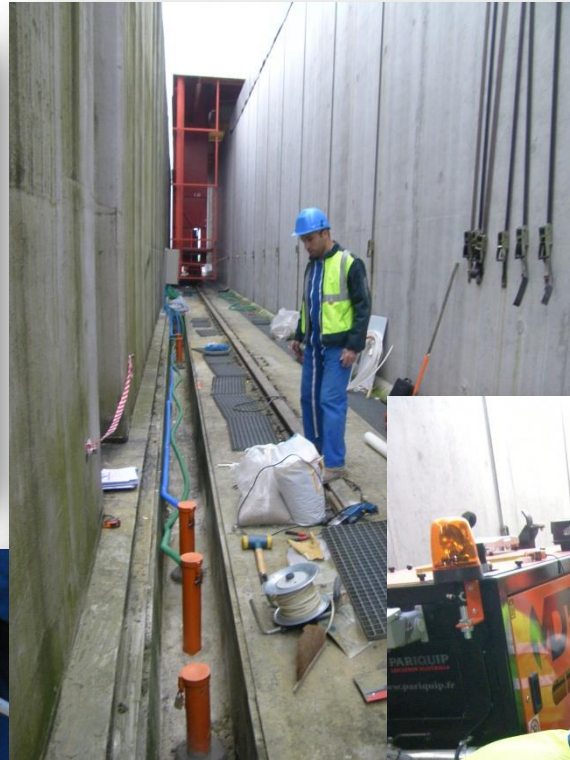
Dispositifs mis en œuvre

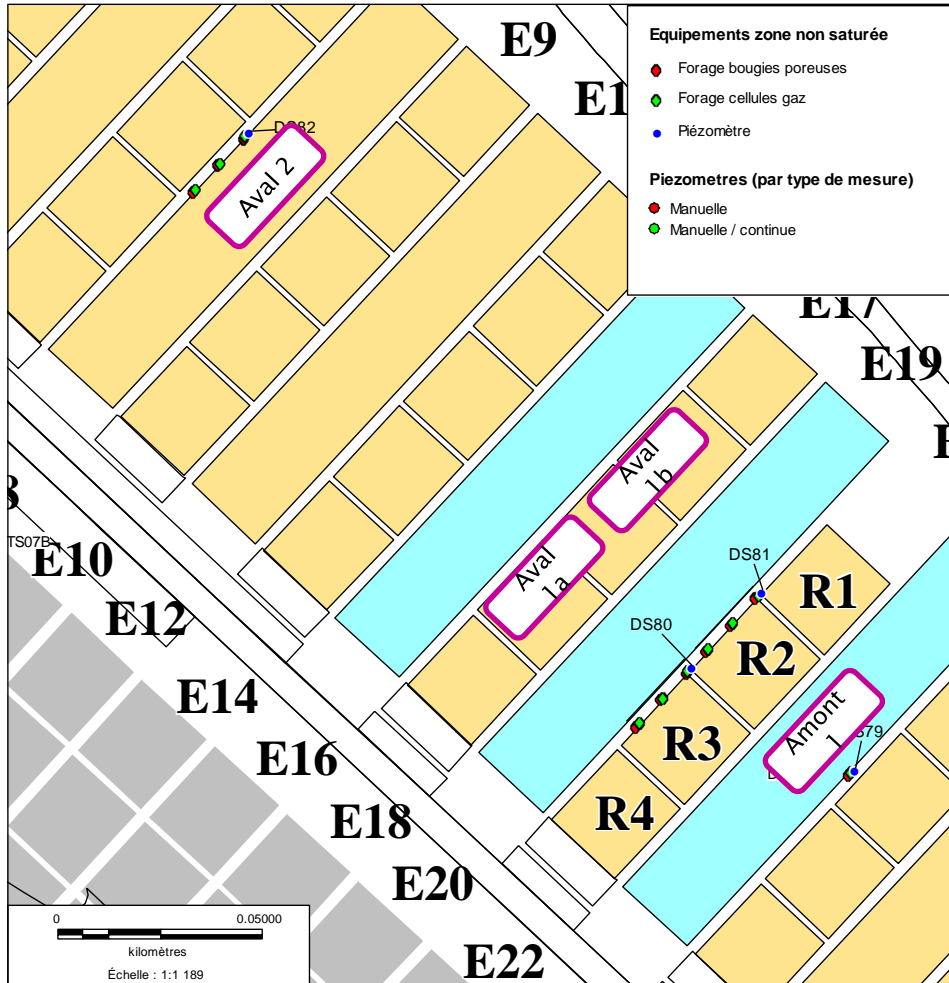
- ◆ Bougies poreuses (3 forages)
- ◆ Crépines « gaz » (3 forages)
- ◆ Piézomètres (1)

Zones concernées

- ◆ Fonction de :
 - inventaire radiologique des ouvrages (E21 et E07)
 - taux de dégazage estimé
- ◆ 3 zones aval (détection)
- ◆ 2 points amont (référence)







Près des ouvrages suspectés :

◆ E21R02 et E21R03

● (aval 1a/1b)

◆ E07R03

● (aval 2)

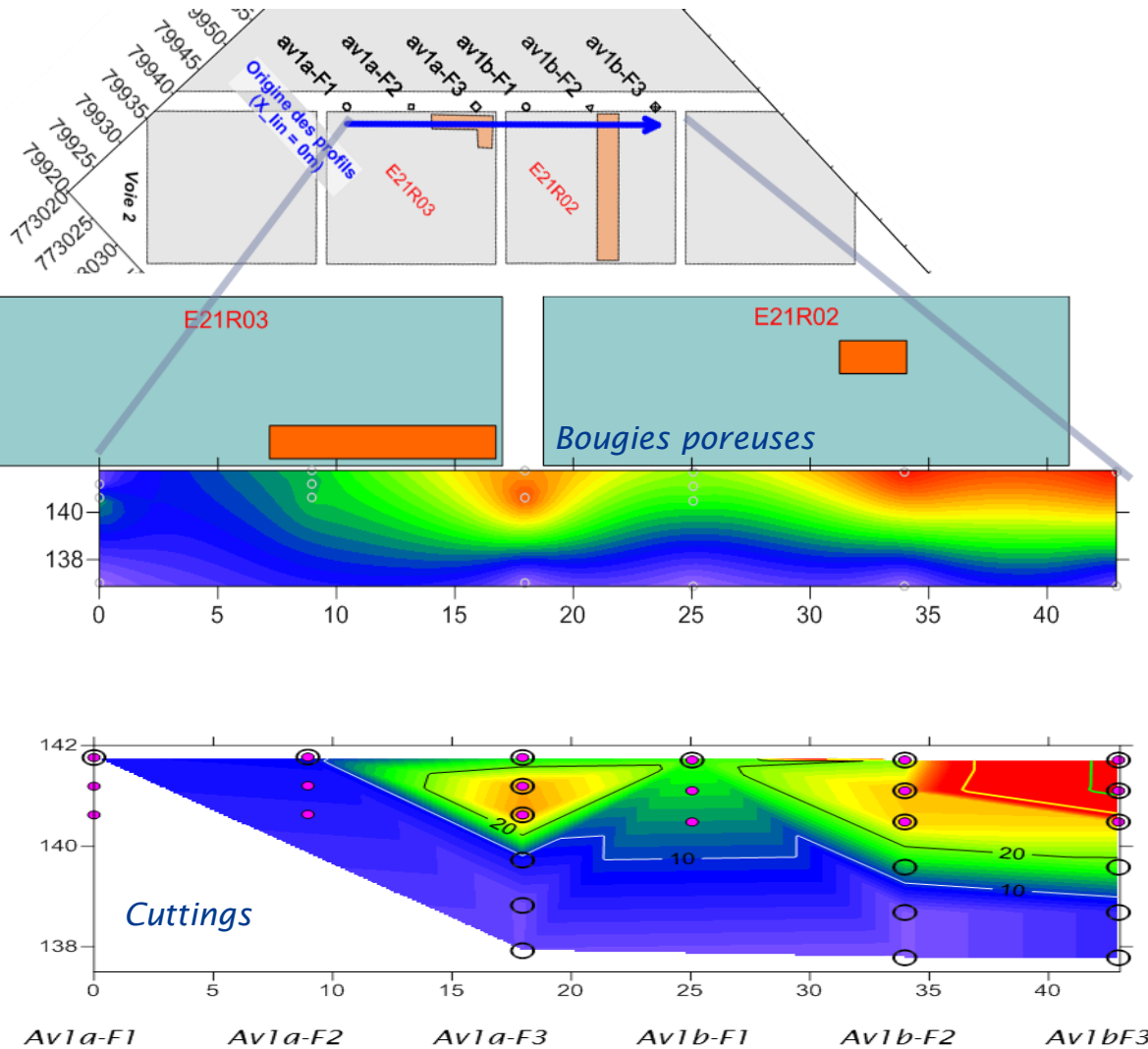
Détermination du bruit de fond :

◆ Blanc « local » :

● E23-25 (amont 1)

◆ Blanc « régional » :

● SEC (amont 2), hors carte



E21 : seules mesures significatives

- ◆ Teneurs décroissantes de manière radiale
- ◆ Proche des colis les plus concentrés
- ◆ Même résultats dans les cuttings (conc. plus élevées, env. x6)

Confirme l'origine suspectée du tritium (E21R02 / E21R03)

Perspectives

- ◆ Poursuite des investigations en 2012 (prélèvements)

Augmentation de la concentration du panache

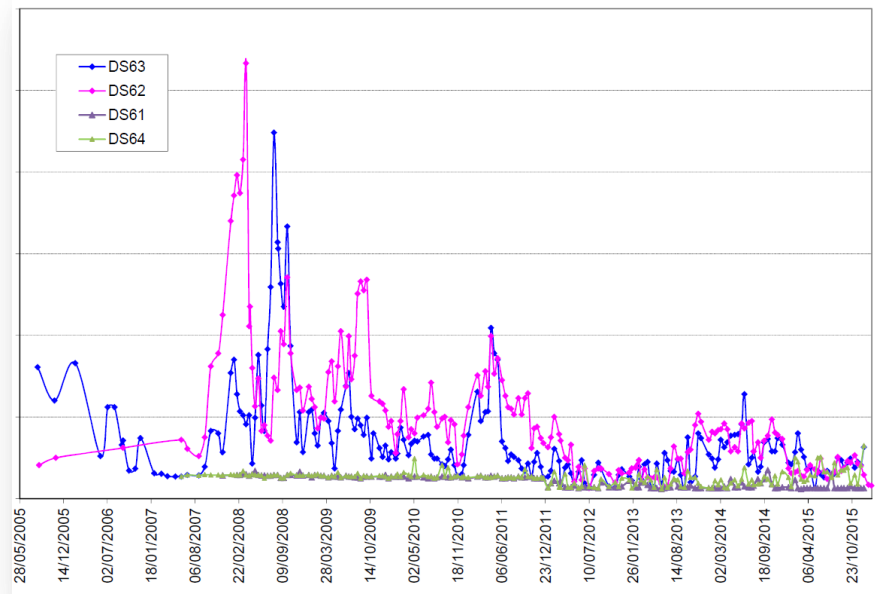
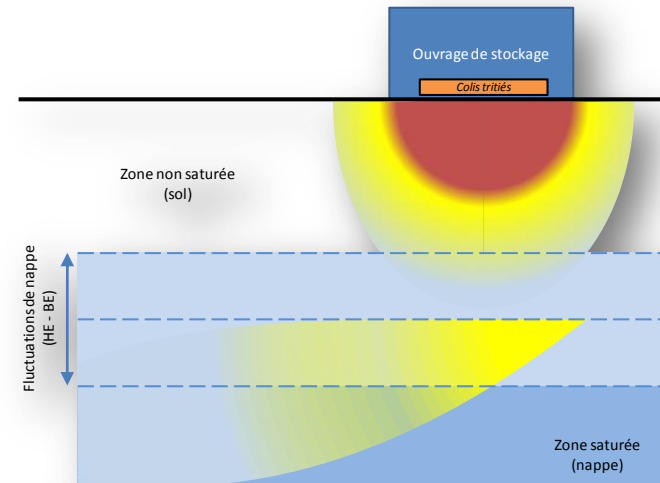
- ◆ Transfert continu à la nappe (« bruit de fond »)
- ◆ Bouffées événementielles lors des hautes eaux

Conséquences

- ◆ Chroniques aux teneurs discontinues (épisodiques)
- ◆ Difficultés de modélisation

Extrapolation au carbone 14

- ◆ A partir du gaz ZNS
- ◆ Extrapolation à l'eau





Conclusion

Contexte
national

Choix site &
Caractéristiques

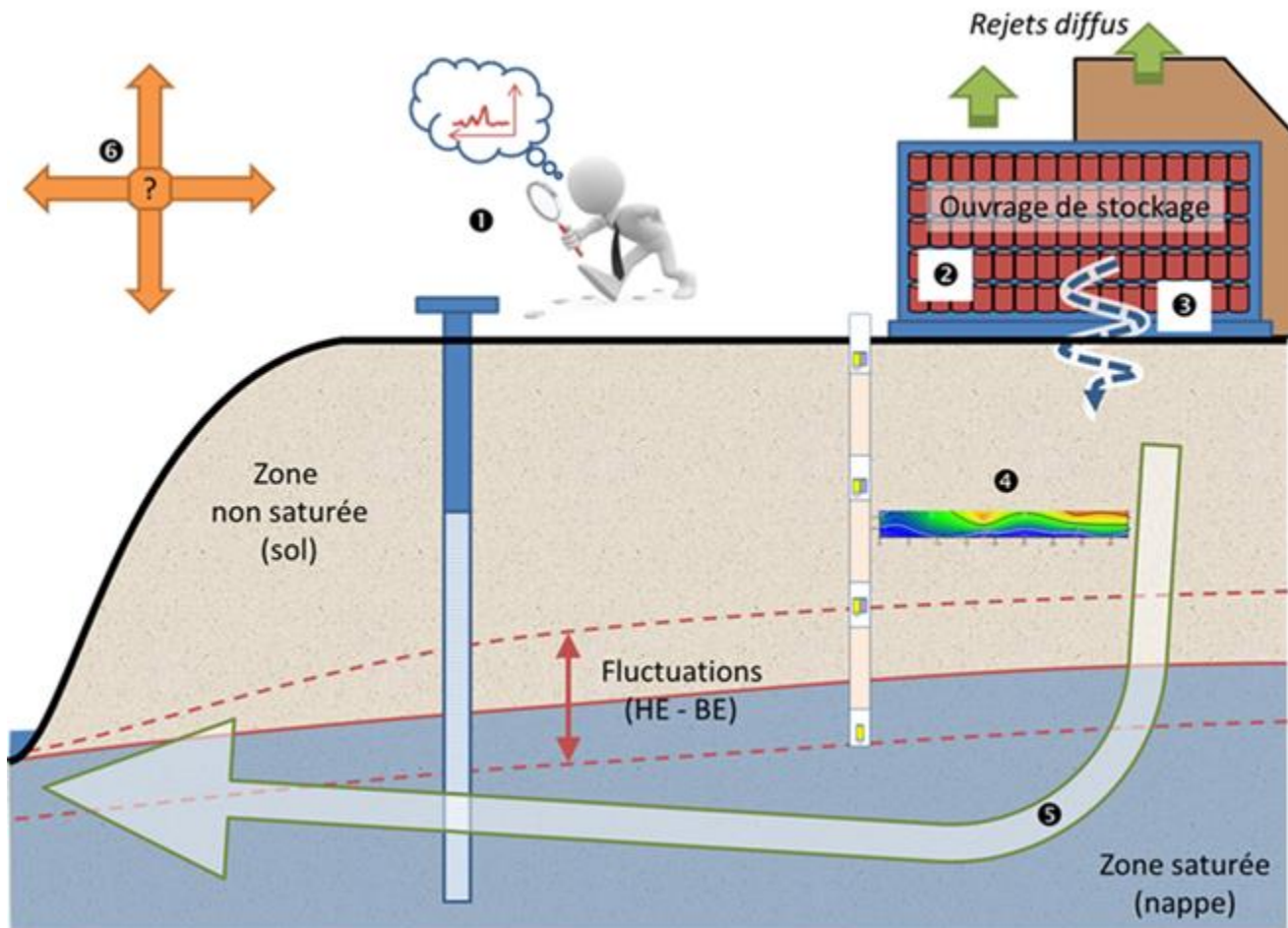
Surveillance
environnement

Modèle
hydrogéologique

Transport des
RN /colloïdes

Zone
non saturée

Conclusion





Merci pour votre attention

Contexte
national

Choix site &
Caractéristiques

Surveillance
environnement

Modèle
hydrogéologique

Transport des
RN /colloïdes

Zone
non saturée

Conclusion