Laboratoire de datation des eaux souterraines

Espace performance
Bat C1 – C2
35769 SAINT GREGOIRE

Tel : 02.99.23.74.40
Fax : 02.99.23.78.11
contact@lades.fr

SYNDICAT DES EAUX CHARENTE-MARITIME

# Datation des eaux souterraines : Bassin versant de l'Arnoult

-

*Syndicat des Eaux de la Charente Maritime*

## Rapport
## Phase 1 : Etiage

| | |
|---|---|
| Date | Mars 2011 |
| Rédacteur | Virginie VERGNAUD |
| Version | 3 (définitive) |

**Avant-propos**

---

Trois captages d'eau potable exploitent la nappe libre dans le bassin versant de l'Arnoult :

- Le *« Bouil de Chambon »* sur la commune de Trizay en aval
- *« La Roche »* et *« Château d'eau »* sur la commune de la Clisse en amont

Ces trois ouvrages montrent une influence significative de pollution diffuse d'origine agricole qui a conduit à la mise en place de traitements curatifs et dans le même temps de programmes d'actions préventives.

***L'objet de cette étude est :***

- ***de fournir des informations sur les temps de résidence et éventuellement les temps de transfert dans cette nappe ;***
- ***d'appréhender la dynamique de cette nappe afin d'estimer dans quels délais les actions engagées actuellement par le Programme d'Actions Territorial auront un effet bénéfique sur la qualité de l'eau brute (nitrates, phytosanitaires) utilisée pour l'eau potable.***

***Remarque :***

*Les conclusions de cette étude ne se basent que sur une seule campagne d'échantillonnage. Les ouvrages hydrogéologiques peuvent être alimentés par des eaux d'origine différente suivant la période de l'année (étiage ou crue). Les périodes d'étiage représentent normalement le soutien de base de l'aquifère et donc les âges les plus anciens qui peuvent être observés, mais chaque système hydrogéologique a ses propres caractéristiques. Il est donc indispensable de garder en mémoire le contexte hydraulique (niveau de nappe et climatologie de l'année) de l'échantillonnage pour pouvoir comparer ces données avec d'autres études réalisées.*

## SOMMAIRE

*1 – Contexte géologique et hydrogéologique de l'étude* ____ *1*

**1.1 – Le Bouil de Chambon** ____ **2**

**1.2 – Site de la Clisse** ____ **3**

*2 – Ouvrages prélevés* ____ *5*

*3– Caractéristiques chimiques des eaux : site de la Clisse* ____ *7*

**3.1- Remarques sur l'ouvrage « Château d'eau »** ____ **7**

**3.2 - Ouvrages privés** ____ **8**

*4 – Datation des eaux souterraines* ____ *11*

**4.1 – Bouil de Chambon** ____ **11**

**4.2 – Site de la Clisse** ____ **12**

4.2.1 – F1 ____ 12
4.2.2 – F6 ____ 12
4.2.3 – F26 ____ 13
4.2.4 – F28 ____ 13
4.2.5 – La Roche ____ 14
4.2.6 – Château d'eau ____ 14

*5 – Interprétation : site de la Clisse* ____ *15*

**5.1 – Axe d'écoulement Sud-Nord (F1-F6 – La Roche)** ____ **15**

**5.2 – Partie ouest (Château d'eau, F26, F28)** ____ **15**

*6 – Conclusion* ____ *17*

*Annexes* ____ *19*

**Annexe 1 : Datation des eaux souterraines** ____ **20**

**Annexe 2 :Description des modèles de recharge** ____ **22**

**Annexe 3 : résultats bruts de datation** ____ **25**

# 1 – Contexte géologique et hydrogéologique de l'étude

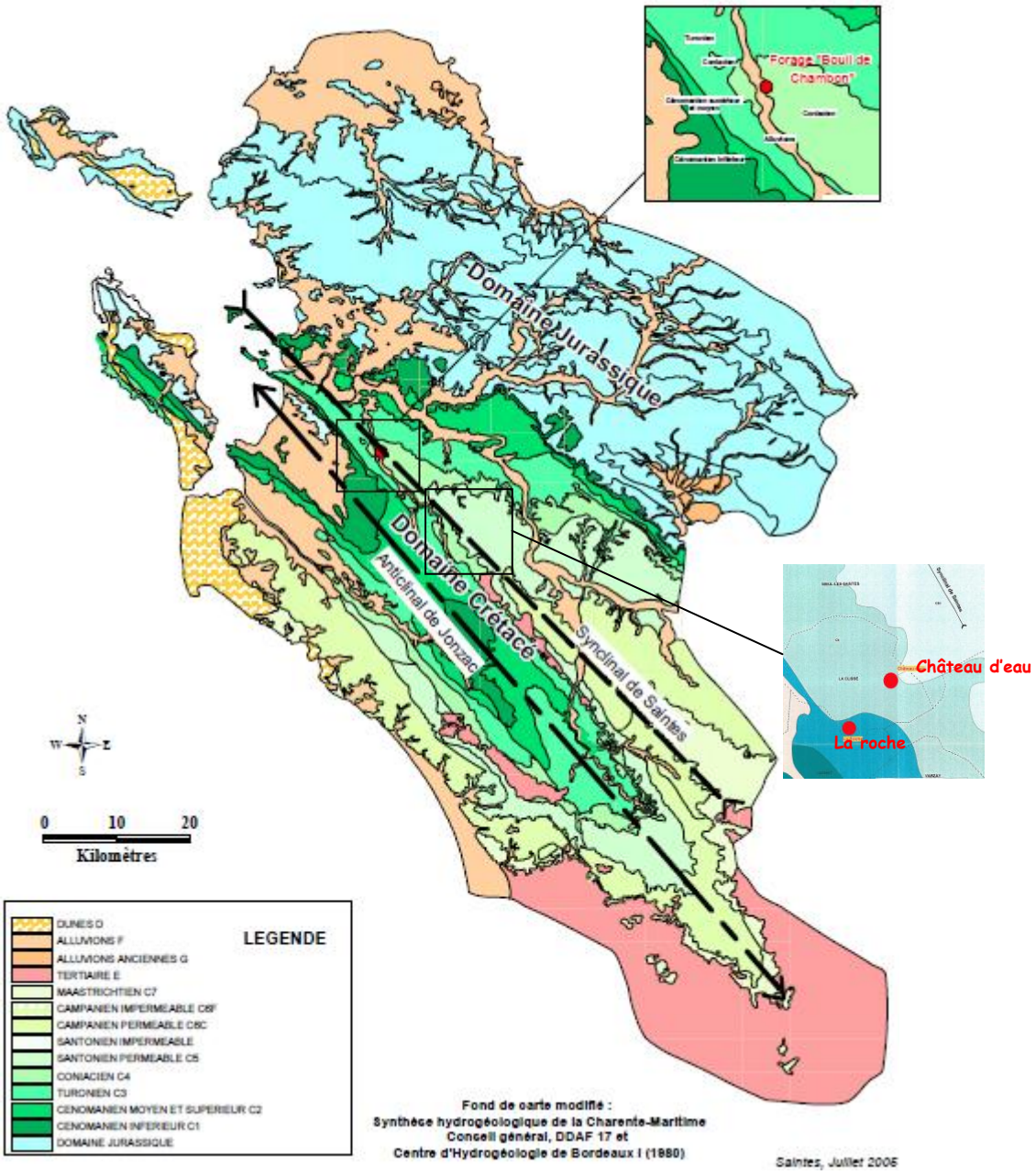



*Figure 1 : contexte hydrogéologique (source SDE 17)*

Le contexte géologique des ouvrages est bien connu (figure 1 et se référer aux documents sur la mise en place des périmètres de protection). La nappe captée est celle des calcaires du Turonien et du Coniacien du flanc Nord de l'anticlinal de Jonzac.

## 1.1 – Le Bouil de Chambon

Le *« Bouil de Chambon »* exploite un réservoir karstifié qui conduit à de fortes et brusques variations de qualité chimique des eaux sont observables pour les paramètres turbidité et nitrates (figure 2). En plus des pics hivernaux qui conduisent à des concentrations au-delà de la norme de potabilité (50 mg/L $NO_3$), il existe depuis 2006 environ une nette tendance à l'augmentation des valeurs de base passant de 40 mg/L à 50 mg/L.

Les concentrations en pesticides sont elles aussi préoccupantes avec un bruit de fond en désethyl-atrazine (DEA) autour de 0.1 µg/L et la présence de métolachlore et de bentazone (0.05 µg/L).

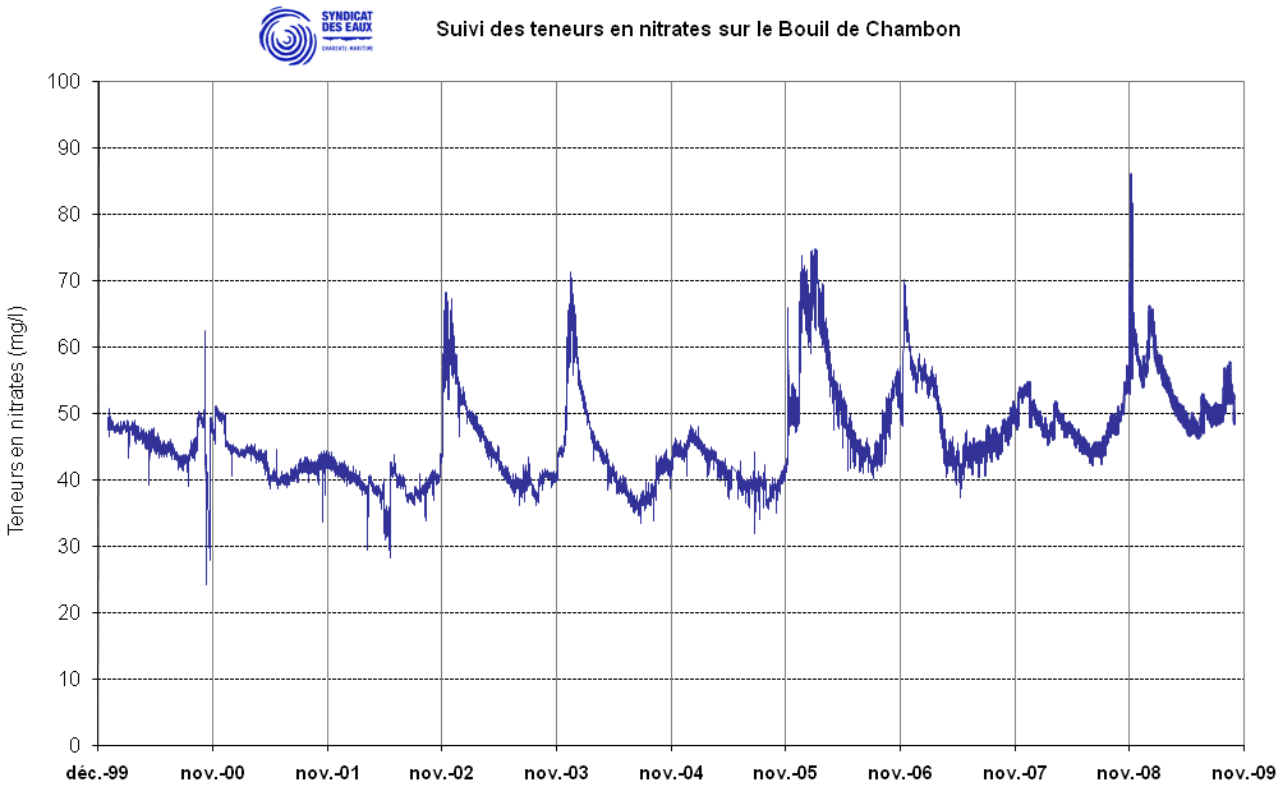



*Figure 2 : Chronique des concentrations en nitrates (source SDE 17)*

## 1.2 – Site de la Clisse

Sur ce site deux ouvrages distants d'un kilomètre environ (figure 3) sont exploités :

- *le puits de « La Roche »*, au droit d'un exutoire karstique dans les calcaires du Turonien de la nappe libre du Turono-Coniacien
- *le forage « Le Château d'Eau »* de 124 m de profondeur, exploitant la nappe semi-captive du Turono-Coniacien.

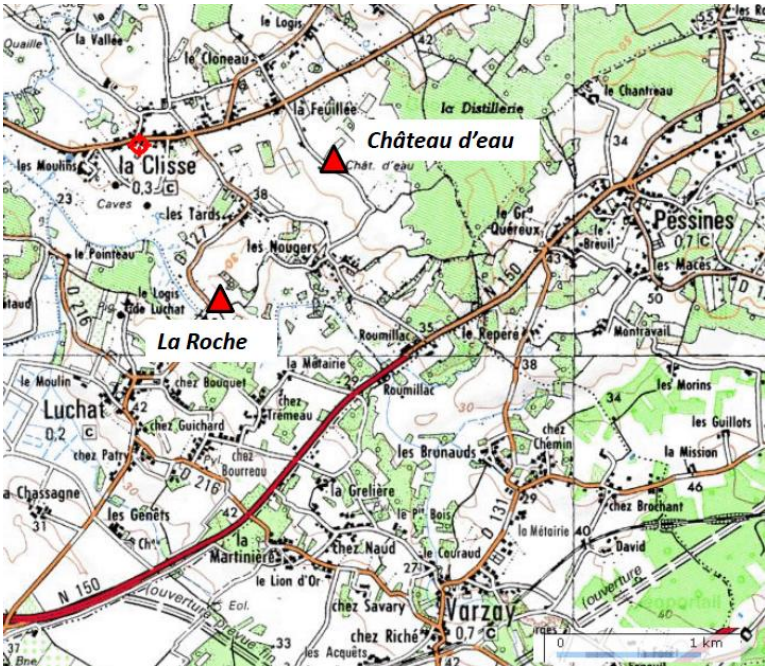



*Figure 3 : Localisation des ouvrages du site de la Clisse*

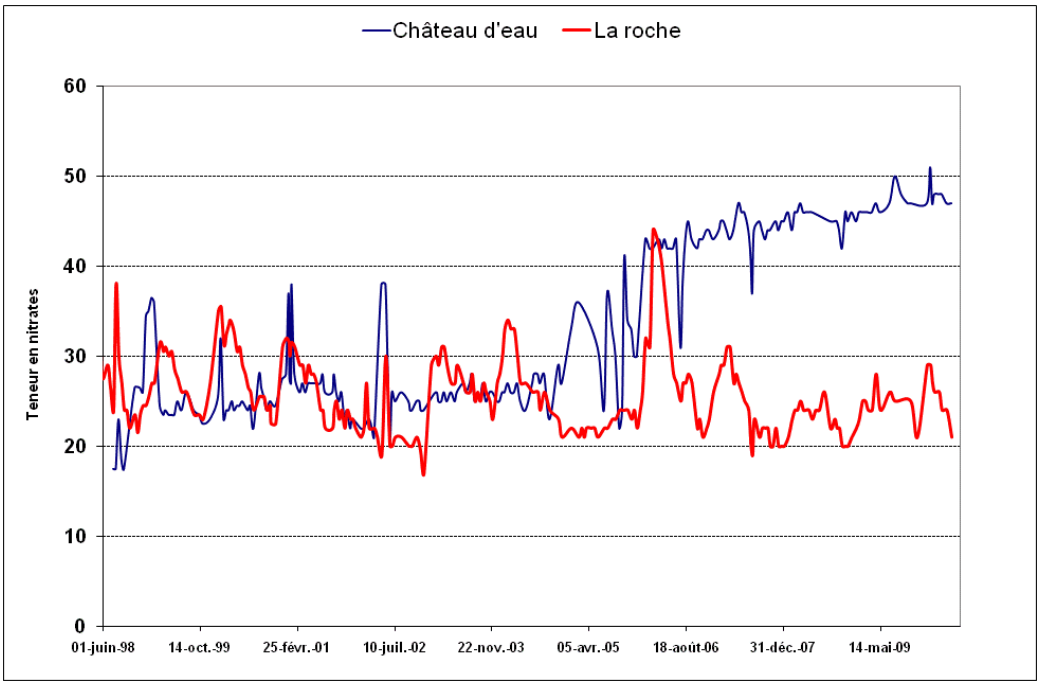



*Figure 4 : chronique des concentrations en nitrates des deux ouvrages (données SDE17)*

**Les chroniques de qualité** (figure 4) mettent en évidence un fort contraste entre les deux ouvrages et cet écart est encore plus visible depuis 2005-2006 où les concentrations en nitrates au niveau de « *la Roche* » semblent se stabiliser (à l'exception de l'hiver 2005-2006) alors qu'au niveau du *« Château d'eau »* les concentrations sont passées de 30mg/L à presque 50 mg/L.

Les deux ouvrages ont un bruit de fond en déséthyl-atrazine important (autour de 0.1µg/L) mais là encore au niveau du Château d'eau ces concentrations sont en nette augmentation avec une apparition d'atrazine et de simazine.

**Au niveau hydrogéologique**, deux axes d'écoulement ont été mis en évidence par les études piézométriques (Calligée, 1997) : un provenant du sud de la zone vers *« la Roche »*, et un de l'est vers l'ouest qui passe par le *« Château d'eau ».*

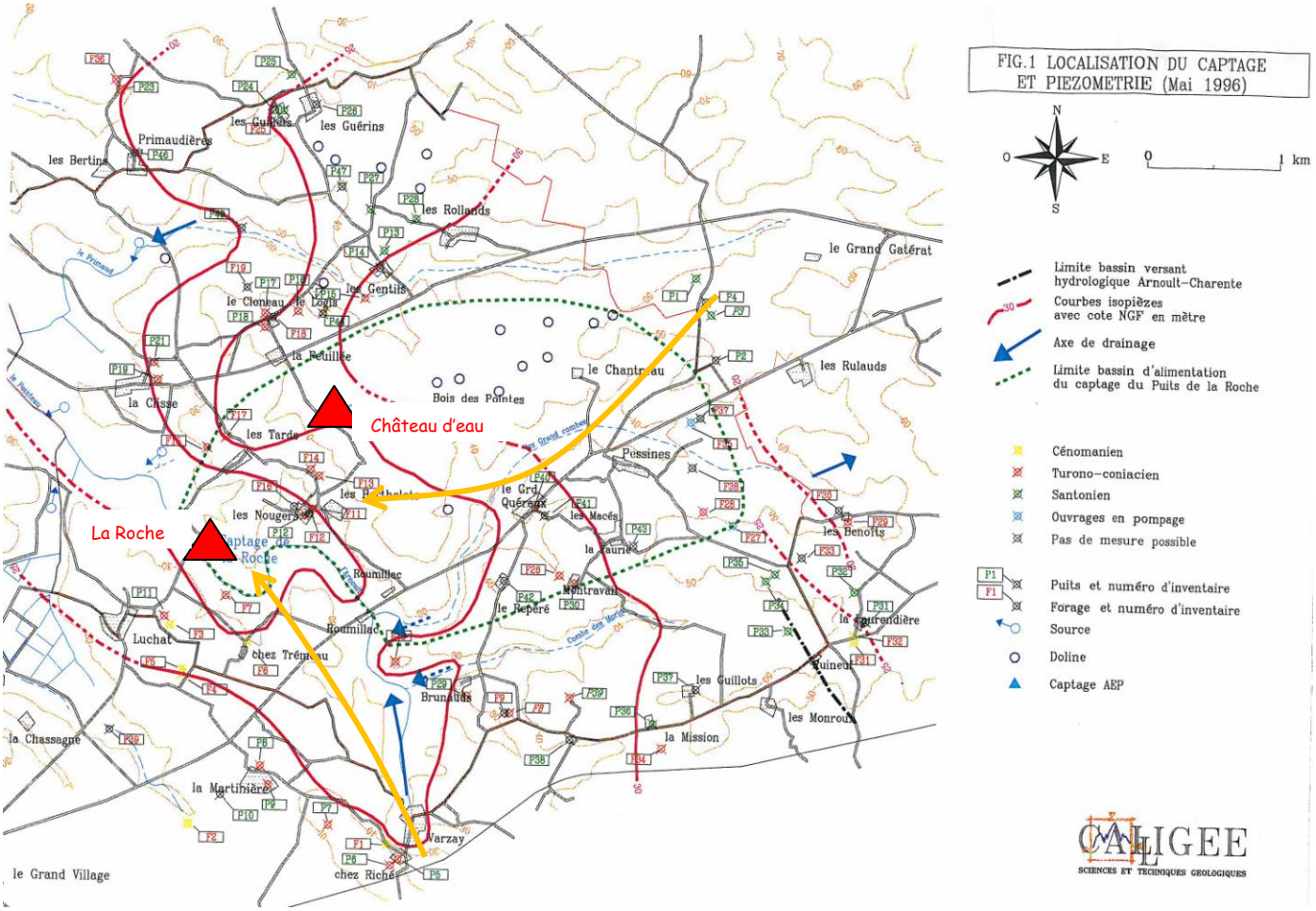



*Figure 5 : carte piézométrique (source SDE17)*

## 2 – Ouvrages prélevés

L'étude de datation porte sur l'ouvrage du *« Bouil de Chambon »* et les deux ouvrages du site de la Clisse : *« la Roche »* et *« Château d'eau ».* Sur ce dernier site 4 ouvrages privés ont également été prélevés sur le bassin d'alimentation suspecté (figure 5). Les ouvrages ont été sélectionnés selon leur disponibilité et leur localisation au plus proche des lignes d'écoulement principales pressenties (figure 6). Les caractéristiques des ouvrages privés sont récapitulées dans le tableau 1 ci-après.

Sur le site de la Clisse, en complément de la datation des eaux souterraines, un examen des caractéristiques chimiques des eaux de la nappe est réalisé. L'objectif est de mieux comprendre la différence de comportement entre les deux ouvrages d'eau potable. Pour les ouvrages privés, il s'agit de vérifier l'homogénéité des caractéristiques hydrochimiques avec l'un ou l'autre des ouvrages d'eau potable captés (i.e. vérifier leur appartenance au bassin d'alimentation).

| **Ouvrages** | **F1** | **F6** | **F26** | **F28** |
|---|---|---|---|---|
| **Profondeur** | 50m ? | 67 m | 59 m | 136 m |
| ***Niveau capté*** | *Cénomanien moyen (Turonien libre)* | *Turonien Cénomanien à infra-Cénomanien ?* | *Turonien et Coniacien libre* | *Turonien/Coniacien Santonien Semi captif* |

*Tableau 1 : Récapitulatif des caractéristiques des ouvrages privés*

Il est rappelé que le puits de *« La Roche »* de 15 m de profondeur est directement connecté au réservoir affleurant des calcaires du Turono-coniacien alors que le forage d'eau potable du *« Château d'Eau »* recoupe ce réservoir entre 35 et 124 m de profondeur. Si les principales venues d'eau viennent du Turono-coniacien, (autour de -45 à -100 m), un aquifère superficiel se développe en tête, au sein de calcaires du Santonien compris entre la surface et 37 m de profondeur. Aucune formation réellement imperméable ne sépare ces deux réservoirs qui sont alors en continuité hydraulique.

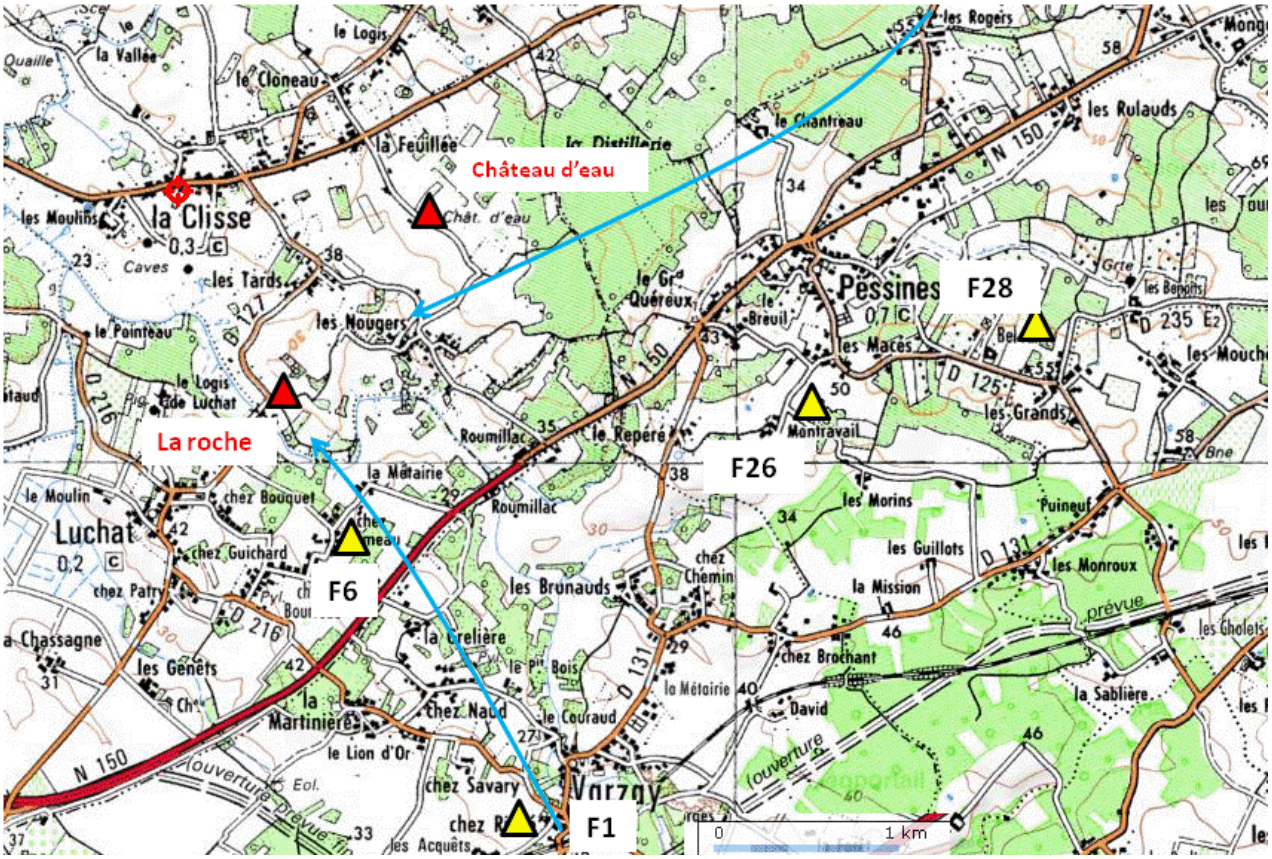



*Figure 6 : Localisation des points prélevés sur le site de la Clisse*

# 3– Caractéristiques chimiques des eaux : site de la Clisse

## 3.1- Remarques sur l'ouvrage « Château d'eau »

Toutes les eaux du site sont de type « bicarbonatée calcique et magnésienne ». De légères différences sont toutefois observées entre les deux ouvrages et une variation au cours du temps des caractéristiques chimiques du Château d'eau est mise en évidence.

L'augmentation des concentrations en nitrates du *« Château d'Eau »* en 2005 s'accompagne par une évolution de ses caractéristiques chimiques (figures 4 & 7). Alors qu'au niveau des cations (triangle gauche) l'ouvrage du *« Château d'Eau »* semble se rapprocher de la chimie des eaux de *« La Roche »*, ce n'est pas du tout le cas en anions (triangle de droite).

Il est à noter qu'à partir de l'été 2004, les pompages sur cet ouvrage ont pratiquement été stoppés (quelques heures par mois). La dégradation de la qualité de cette ressource est concomitante avec la baisse de prélèvement.

Ceci semble indiquer que l'eau alimentant le Château d'eau circule à partir de 2004 dans un contexte géologique plus proche de celui alimentant *« La Roche »* mais dans une partie de réservoir beaucoup plus contaminée par les activités anthropiques. Le changement de chimie au niveau du *« Château d'Eau »* ne semble pas pouvoir être expliqué par une simple augmentation de la pression agricole.

Sur cet ouvrage profond, la diminution du prélèvement conduirait très probablement à une participation du réservoir superficiel (Santonien) plus importante que celle du Turono Coniacien plus profond.

La présence d'atrazine dans ce réservoir persiste : cette molécule, interdite depuis 2005, est réputée pour se dégrader en contexte de nappe.

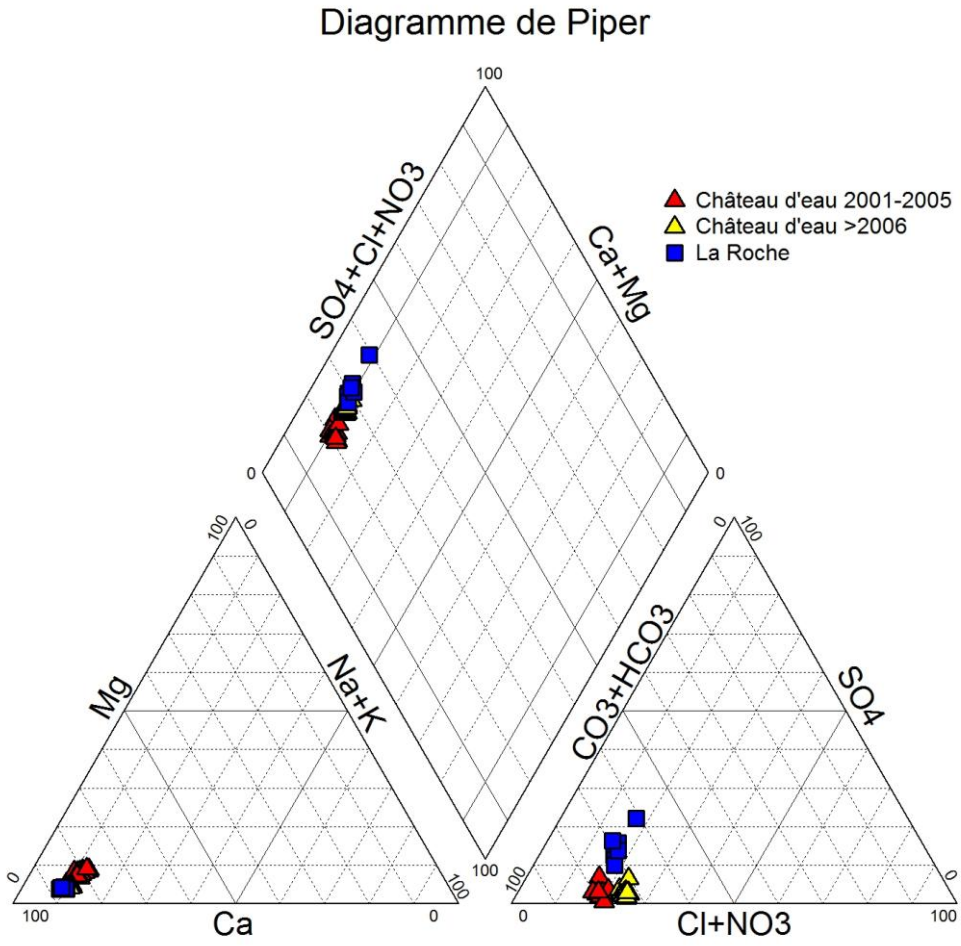



*Figure 7 : diagramme de Piper des ouvrages de la Clisse à partir des données de l'ARS (base ADES)*

## 3.2 - Ouvrages privés

Les résultats des analyses réalisées en octobre 2010 sont représentés dans le diagramme de Piper de la figure 8. Les ouvrages exploités ont également été prélevés au cours de cette campagne. Leur position dans le diagramme est proche de celle de la figure 7.

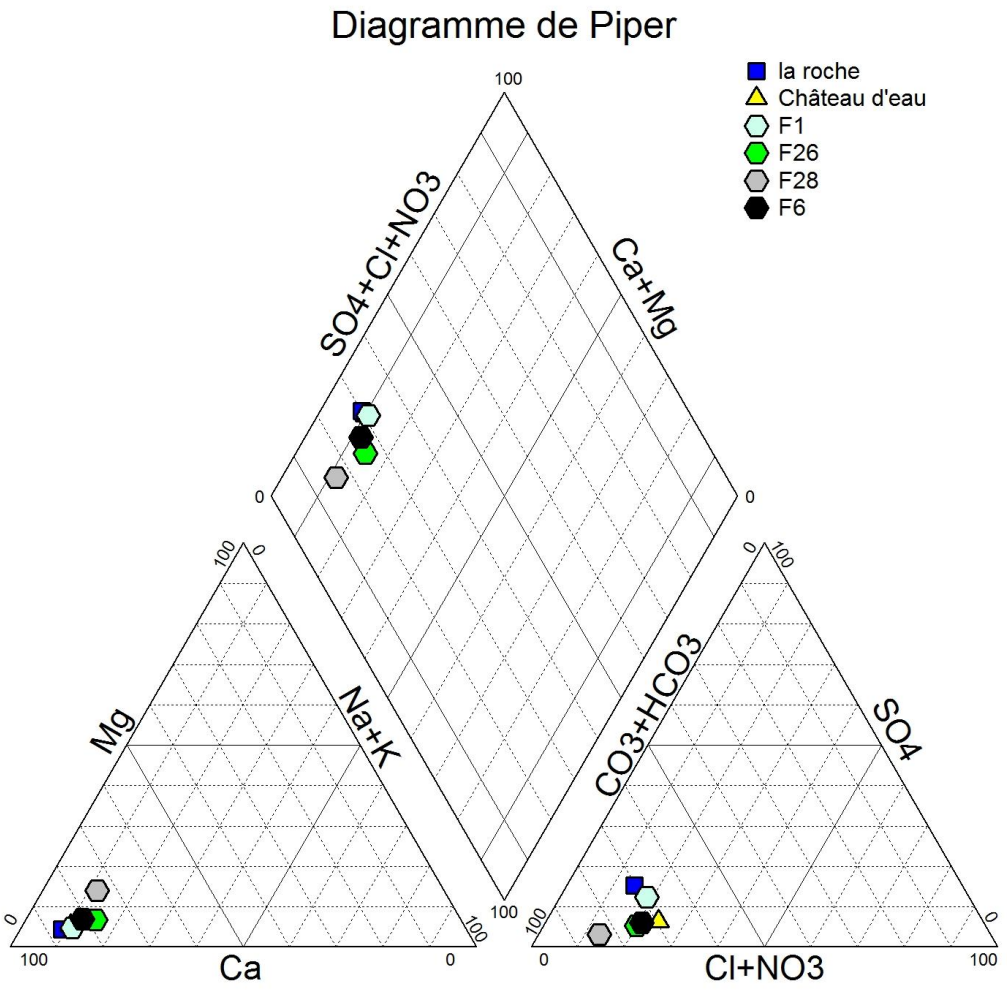



*Figure 8 : diagramme de Piper des ouvrages du site de la Clisse (données SDE 17)*

Il existe une certaine variabilité des signatures chimiques sur le site de la Clisse. Néanmoins on remarque :

- des similitudes entre le forage F28 et les caractéristiques chimiques du forage du *« Château d'Eau »* avant 2006 ;
- que les forages F26 et F6 ont également des caractéristiques un peu plus proches du forage du *« Château d'Eau »* que du puits de *« La Roche ».*
- que le forage F1 pourtant plus éloigné que F6, présente une signature quasi similaire à celle du puits de *« La Roche ».*

Les types de gisement semblent se retrouver avec :

- les ouvrages profonds (120 à 130 m) en nappe semi-captive (forage du *« Château d'Eau »* d'avant 2006 et forage F 28);
- les ouvrages F26 et F6, moyennement profonds (50-70 m)
- et les ouvrages peu profonds (F1 et puits de *« La Roche » ).*

La ressource qui alimente l'ensemble de ces ouvrages contient des pesticides, avec un maxima sur le forage du *« Château d'Eau »*. Au niveau des pesticides (tableau 2 ci-après), de la simazine (régulièrement détectée sur *« Le Château d'eau »*) est retrouvée sur F26 et F28 et pas dans les autres ouvrages.

| | A2H | ATRZ | ADET | ADSP | SMZ | total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **F1** | 0,03 | <0,02 | 0,12 | 0,03 | <0,02 | 0,18 |
| **F26** | <0,02 | <0,02 | 0,12 | 0,04 | 0,03 | 0,19 |
| **F28** | <0,02 | <0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,03 | 0,13 |
| **F28** | <0,02 | <0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,03 | 0,13 |
| **F6** | 0,05 | 0,03 | 0,08 | <0,02 | <0,02 | 0,16 |
| **la roche** | 0,03 | <0,02 | 0,11 | <0,02 | <0,02 | 0,14 |
| **Château d'eau** | <0,02 | 0,06 | 0,4 | 0,05 | <0,02 | 0,51 |

*Tableau 2 : résultats des analyses pesticides octobre 2010*
*(A2H : atrazine-2-hydroxy, ATRZ : atrazine , ADET : atrazine desethyl, ADSP : atrazine deisopropyl, SMZ : simazine)*

# 4 – Datation des eaux souterraines

La méthode de datation est explicitée en annexe. Les modèles de circulation envisagés sont détaillés en annexe. Pour chaque résultat les 3 modèles de circulation sont testés.
Pour chaque ouvrage les données brutes de datations sont rappelées puis les hypothèses de circulations auxquelles elles peuvent correspondre. Si les données géologiques et hydrogéologiques sont suffisantes le choix du modèle le plus probable sera discuté.

***N.B. : Aide à la lecture dans le cas de mélanges :***

***« L'eau récente »*** *est considérée comme une eau âgée de moins de 5 ans ayant les teneurs en CFC d'une eau de l'année 2008. Ce réservoir peut être l'eau de recharge annuelle ou une eau de pluie (dans certains cas ce peut également être une eau de rivière).*
***« L'eau ancienne »*** *est une eau de plus de 50 ans sans CFC qui peut provenir d'un réservoir plus profond et/ou plus ancien.*
***C'est la connaissance hydrogéologique du site qui permet de privilégier l'une ou l'autre origine de l'eau de mélange.***

## 4.1 – Bouil de Chambon

**Résultats bruts datation :**

| Composé | SF6 | CFC-12 | CFC-11 | CFC-113 |
|---|---|---|---|---|
| Concentration atmosphérique équivalente (pptv) | 1.9 | 423.6 | 152.6 | 62.9 |
| Age apparent | 1987 | 1986 | 1978 | 1988 |
| Remarque | | | Légère dégradation possible | |

**Interprétation :**

| Modèle | Résultats (âges moyens +/- 5 ans) |
|---|---|
| Modèle piston | 25 ans |
| Modèle à recharge continue | impossible |
| Mélange binaire | • Eau de 25 ans +10% d'eau récente (0-10 ans)<br>• Eau de 20 ans + 10% d'eau ancienne (> 50 ans) |

Dans le cas de cet ouvrage, les deux modèles envisageables sont cohérents pour **une eau à temps de circulation moyen assez long (20-25 ans)**. Une part d'eau d'un autre réservoir peut contribuer à hauteur de 10% du flux. L'âge de ce second réservoir est incertain : ancien ou au contraire récent.
D'après les données hydrogéologiques et le caractère karstique du réservoir, il semble probable que le second réservoir en jeu corresponde à des eaux récentes composé de la (ou des) dernières(s) recharge(s) hivernale(s).

## 4.2 – Site de la Clisse

### 4.2.1 – F1

**Résultats bruts datation :**

| Composé | SF6 | CFC-12 | CFC-11 | CFC-113 |
|---|---|---|---|---|
| Concentration atmosphérique équivalente (pptv) | 2.6 | 3239.8 | 357.1 | 70.6 |
| Age apparent | 1991 | excès | excès | 1989 |
| Remarque | | | | |

**Interprétation :**

| Modèle | Résultats (âges moyens +/- 5 ans) |
|---|---|
| **Modèle piston** | 20 ans |
| **Modèle à recharge continue** | impossible |
| **Mélange binaire** | • Eau de 20 ans + 10% d'eau d'autre origine (ancienne >50 ans ou récente) |

Le temps de renouvellement de l'eau dans cet ouvrage est **de l'ordre de 20 ans**. 10% du flux peuvent venir d'une autre source qui peut correspondre soit à des eaux récentes ou anciennes. Peu de données hydrogéologiques sont disponibles sur cet ouvrage et il n'est pas possible actuellement de trancher entre les deux sources pour le second réservoir.
Un large excès en CFC-12 est observé. L'excès en CFC-11 est un peu plus faible. L'origine de ces excès n'est pas déterminée.

### 4.2.2 – F6

**Résultats bruts datation :**

| Composé | SF6 | CFC-12 | CFC-11 | CFC-113 |
|---|---|---|---|---|
| Concentration atmosphérique équivalente (pptv) | 1.2 | 733.5 | 198.3 | 57.3 |
| Age apparent | 1983 | excès | 1983 | 1987 |
| Remarque | | | | |

**Interprétation :**

| Modèle | Résultats (âges moyens +/- 5 ans) |
|---|---|
| **Modèle piston** | 25-27 ans |
| **Modèle à recharge continue** | impossible |
| **Mélange binaire** | • Eau de 25-30 ans + 30% d'eau ancienne |

Le temps de résidence moyen sur cet ouvrage est **de 25-30 ans**, on ne peut exclure la participation d'une eau ancienne (> 50 ans) pour environ 30% du flux. Ceci serait cohérent avec la position de cet ouvrage en aval du forage F1, suivant l'axe de drainage de direction sud nord/nord-ouest.
Un léger excès de CFC-12 est observé sans que son origine soit déterminée.

### 4.2.3 – F26

**Résultats bruts datation :**

| Composé | SF6 | CFC-12 | CFC-11 | CFC-113 |
|---|---|---|---|---|
| Concentration atmosphérique équivalente (pptv) | 0.9 | 202.4 | 86.3 | 132.1 |
| Age apparent | 1980 | 1974 | 1973 | excès |
| Remarque | *Proche LD* | | | |

**Interprétation :**

| Modèle | Résultats (âges moyens +/- 5 ans) |
|---|---|
| **Modèle piston** | 35 ans |
| **Modèle à recharge continue** | 70-100 ans |
| **Mélange binaire** | • Eau ancienne + 30% de moins de 20 ans |

Les trois modèles indiquent des **temps de résidence assez longs, supérieurs à 35 ans**. Le modèle à recharge continue ou de mélange indique une participation possible d'eau plus récente de l'ordre de 20 ans pour une proportion de 30%. Le modèle est mal contraint sur cet ouvrage par les données de datation et peu de données hydrogéologiques permettent de trancher.

### 4.2.4 – F28

**Résultats bruts datation :**

| Composé | SF6 | CFC-12 | CFC-11 | CFC-113 |
|---|---|---|---|---|
| Concentration atmosphérique équivalente (pptv) | 0.5 | 241.7 | 81.2 | 3992 |
| Age apparent | 1976 | 1975 | 1972 | Excès |
| Remarque | *Proche LD* | | | |

**Interprétation :**

| Modèle | Résultats (âges moyens +/- 5 ans) |
|---|---|
| **Modèle piston** | 35-40 ans |
| **Modèle à recharge continue** | |
| **Mélange binaire** | |

Le temps de résidence sur cet ouvrage est **assez important : 35-40 ans**. Un excès de CFC-113 d'origine indéterminée est observé.
On ne peut exclure la participation d'eau récente pour moins de 5%.

### 4.2.5 – La Roche

**Résultats bruts datation :**

| Composé | SF6 | CFC-12 | CFC-11 | CFC-113 |
|---|---|---|---|---|
| Concentration atmosphérique équivalente (pptv) | 1.9 | 1549.5 | 204.5 | 10.4 |
| Age apparent | 1987 | excès | 1984 | 1974 |
| Remarque | | | | Dégradé ? |

**Interprétation :**

| Modèle | Résultats (âges moyens +/- 5 ans) |
|---|---|
| **Modèle piston** | 25 ans |
| **Modèle à recharge continue** | Impossible |
| **Mélange binaire** | • Eau de 25 ans +10% d'eau récente (0-10 ans)<br>• Eau de 20 ans + 20% d'eau ancienne (> 50 ans) |

Cet ouvrage montre un excès important en CFC-12.
Dans le cas de cet ouvrage, les deux modèles envisageables sont cohérents pour **une eau à temps de circulation moyen assez long (20-25 ans)**. Une part d'eau d'un autre réservoir peut contribuer à hauteur de 10% du flux. L'âge de ce second réservoir est incertain : ancien ou au contraire récent mais la connaissance hydrogéologique du site laisse supposer un réservoir récent correspondant à la (aux) dernière(s) recharges(s) hivernale(s).

### 4.2.6 – Château d'eau

**Résultats bruts datation :**

| Composé | SF6 | CFC-12 | CFC-11 | CFC-113 |
|---|---|---|---|---|
| Concentration atmosphérique équivalente (pptv) | 1.8 | 380.7 | 154.4 | 60.8 |
| Age apparent | 1986 | 1984 | 1978 | 1987 |
| Remarque | | | Dégradé ? | |

**Interprétation :**

| Modèle | Résultats (âges moyens +/- 5 ans) |
|---|---|
| **Modèle piston** | 25 ans |
| **Modèle à recharge continue** | Impossible |
| **Mélange binaire** | • Eau de 25 ans +10% d'eau récente (0-10 ans)<br>• Eau de 20 ans + 20% d'eau ancienne (> 50 ans) |

Dans le cas de cet ouvrage, les deux modèles envisageables sont cohérents pour **une eau à temps de circulation moyen assez long (20-25 ans)**. Une part d'eau d'un autre réservoir peut contribuer à hauteur de 10% du flux. L'âge de ce second réservoir est incertain : ancien ou au contraire récent. Dans le cas du Château d'eau il est fortement suspecté que le second réservoir soit une eau à temps de résidence plus long (<50 ans) moins nitraté, qui était sollicitée lors de l'utilisation quotidienne de l'ouvrage et qui est beaucoup moins sollicitée actuellement.

# 5 – Interprétation : site de la Clisse

Les temps de résidence observés sont supérieurs à la 20aine d'années et peuvent aller jusqu'à 40 ans en limite de bassin sur les ouvrages profonds (F26-F28)

## 5.1 – Axe d'écoulement Sud-Nord (F1-F6 – La Roche)

Un excès en CFC-12 est observé sur les 3 ouvrages situés le long de cette ligne d'écoulement : F1, F6 et le captage AEP *« la Roche ».* Ce marquage géochimique est un bon indicateur des relations entre ouvrages.

Les **ouvrages F1 et *« La Roche »*** ont des excès qui vont de 3200 pptv en F1 à 1500 pptv au niveau de la Roche. De plus les âges du réservoir principal entre ces deux ouvrages augmentent vers l'aval de 20 ans à 25-27 ans soit **une vitesse d'écoulement observée de 300 à 500 m par an.** Cette valeur ne parait pas incohérente en milieu fissuré calcaire.
Par contre l'âge en F1 et sa position sur la carte piézométrique (pas de ligne de partage des eaux à proximité) semble indiquer une aire de recharge qui peut être assez éloignée.

**F6** présente un excès en CFC-12 de moindre importance que F1 et la Roche. D'après les données de datation 30% de son flux peut être lié à un réservoir ancien et donc potentiellement profond. Ce réservoir serait marqué en chlorures, fer, manganèse en particulier. Ceci serait cohérent avec l'esquisse piézométrique suggérant une participation du réservoir multicouche argilo-sableux et carbonaté du cénomanien développé en rive gauche de l'Arnoult.

Ce marquage en chlorures, fer et manganèse ne se retrouve pas au niveau de la Roche en aval hydraulique. **Il semble donc que cet ouvrage ne soit pas uniquement connecté sur la nappe exploitée par le puits de *« La Roche »*** et il ne peut donc pas être utilisé pour déterminer des vitesses ou réaliser des scénarii prédictifs d'évolution de la qualité de l'eau au niveau de la Roche**.**

## 5.2 – Partie ouest (Château d'eau, F26, F28)

Au niveau géochimique le forage **F28** (qui est assez profond : 136 m) se distingue des deux autres ouvrages (cf digramme de Piper, figure 8) en particulier de part sa faible concentration en nitrates et une teneur en bicarbonates et magnésium plus forte. Il est en outre marqué par un fort excès en CFC-113.
**L'âge apparent de cet ouvrage est assez important (35-40 ans) conforme avec la profondeur de l'ouvrage.**
Le fort excès de CFC-113 dans une eau de cet âge est assez surprenant (la date correspond au début de l'utilisation de ces composés).
Cet ouvrage présente de faibles concentrations en nitrates. Par contre les concentrations en oxygène représentent encore 40% de la saturation (4.6 mg/L) et il n'y a pas de réel excès de $N_2$ ni de $N_2O$ (diazote et protoxyde d'azote tous deux produits par la réaction de dénitrification) et on observe aucune dégradation du CFC-11 qui a lieu en milieu réducteur. L'ensemble de ces éléments semble indiquer qu'il n'existe pas de processus de dénitrification. Pourtant des pesticides sont trouvés dans cet ouvrage et ils sont normalement accompagnés de nitrates. Ceci suggère qu'une dénitrification a bien eu lieu. Une dilution par une arrivée d'eau ancienne (Cénomanien) pourrait également être envisagée mais elle n'est pas indiquée par les données de datation.

Cet ouvrage est un ouvrage d'irrigation qui subit de très fortes variations de niveau piézométrique au cours de l'été et a donc **une dynamique hydrogéologique et hydrochimique complexe** qui ne peut être résolue avec les données de cette étude.
*Cet ouvrage d'irrigation dont la coupe technique et géologique n'est pas connue, va être diagnostiqué par le Syndicat en 2011. Les données hydrogéologiques et les mesures de flux (micromoulinet) permettront de préciser les venues d'eau profondes et superficielles sur le débit pompé par cet ouvrage.*

**F26** est également marqué par un excès de CFC-113 mais qui est de beaucoup plus faible ampleur que sur F28. **La datation de cet ouvrage est complexe**, plusieurs hypothèses peuvent être mises en avant. L'ouvrage est situé dans la partie libre de l'aquifère et une influence d'eau plus ou moins récente est donc attendue. D'après le modèle de mélange (qui peut être cohérent avec le modèle à recharge continue) cette proportion serait de 30 % pour la part d'eau d'âge inférieur à 20 ans. Les concentrations en nitrates de cet ouvrage sont cohérentes avec cette hypothèse (figure 9) pour un mélange entre une eau à 65mg/L (eau <20 ans) et une eau à 20 mg/L (eau ancienne : origine ?) dans la proportion 30-70 (indiquée par la datation).

**L'ouvrage du Château d'eau** est assez proche chimiquement de F26. Il ne présente pas d'excès en CFC-113 et a un âge plus récent que les deux autres ouvrages situés à l'ouest. Ceci peut s'expliquer par les proportions différentes des deux réservoirs identifiés sur F26 et F28 par rapport au Château d'eau. Son temps de résidence est ainsi plus marqué par la part d'eau « jeune » et nitratée (environ 80% du flux a moins de 20 ans) que F26.

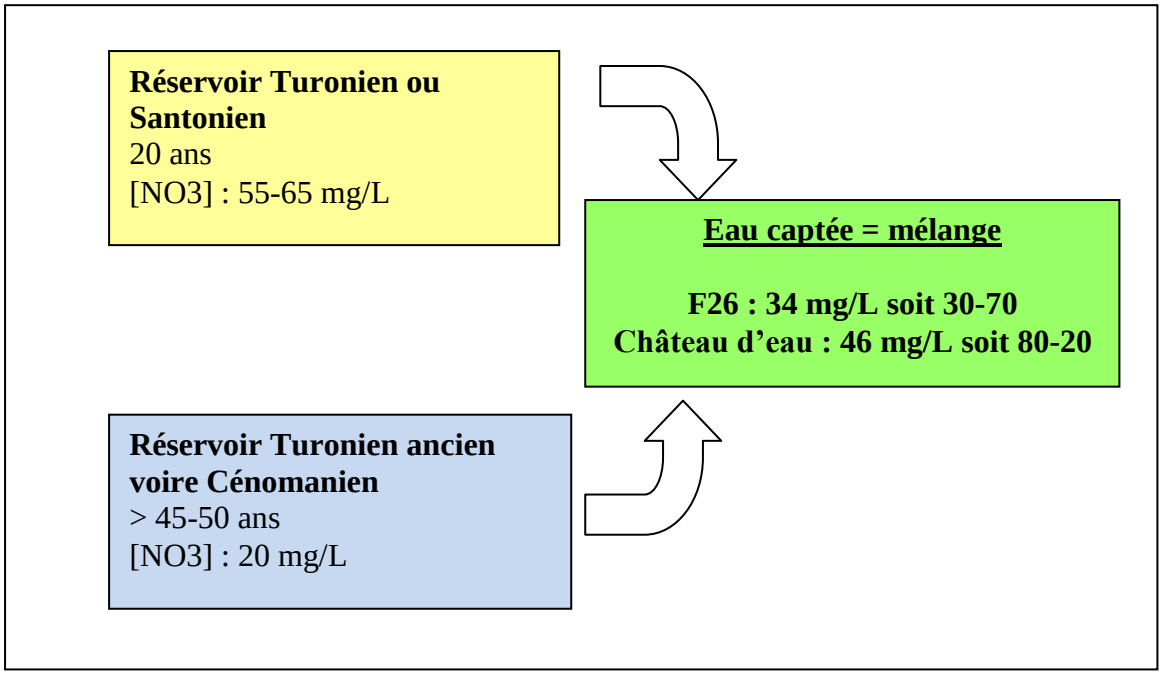



*Figure 9 : modèle de mélange*

# 6 – Conclusion

Cette étude est la première phase de caractérisation des temps de résidence sur les sites du *« Bouil de Chambon »* et de *« La Clisse »*.

Elle a montré **des temps de résidence moyen assez long de l'ordre de la 20aine d'années** sur les ouvrages captés et donc une inertie assez importante à tout changement d'occupation du sol. Elle montre également la participation d'autres réservoirs au flux capté : récents sur les ouvrages captés et interprétés comme la marque des recharges récentes de nappe ou au contraire ancienne sur les ouvrages profonds qui peuvent atteindre les niveaux inférieurs du Turonien voire le Cénomanien (figure 10 et 11). L'inconnue dans le système réside sur l'origine de la partie récente entre le Santonien (fig 10 – hypothèse 1) ou les conduits karstiques du Turono-Coniacien (fig 10- hypothèse 2).

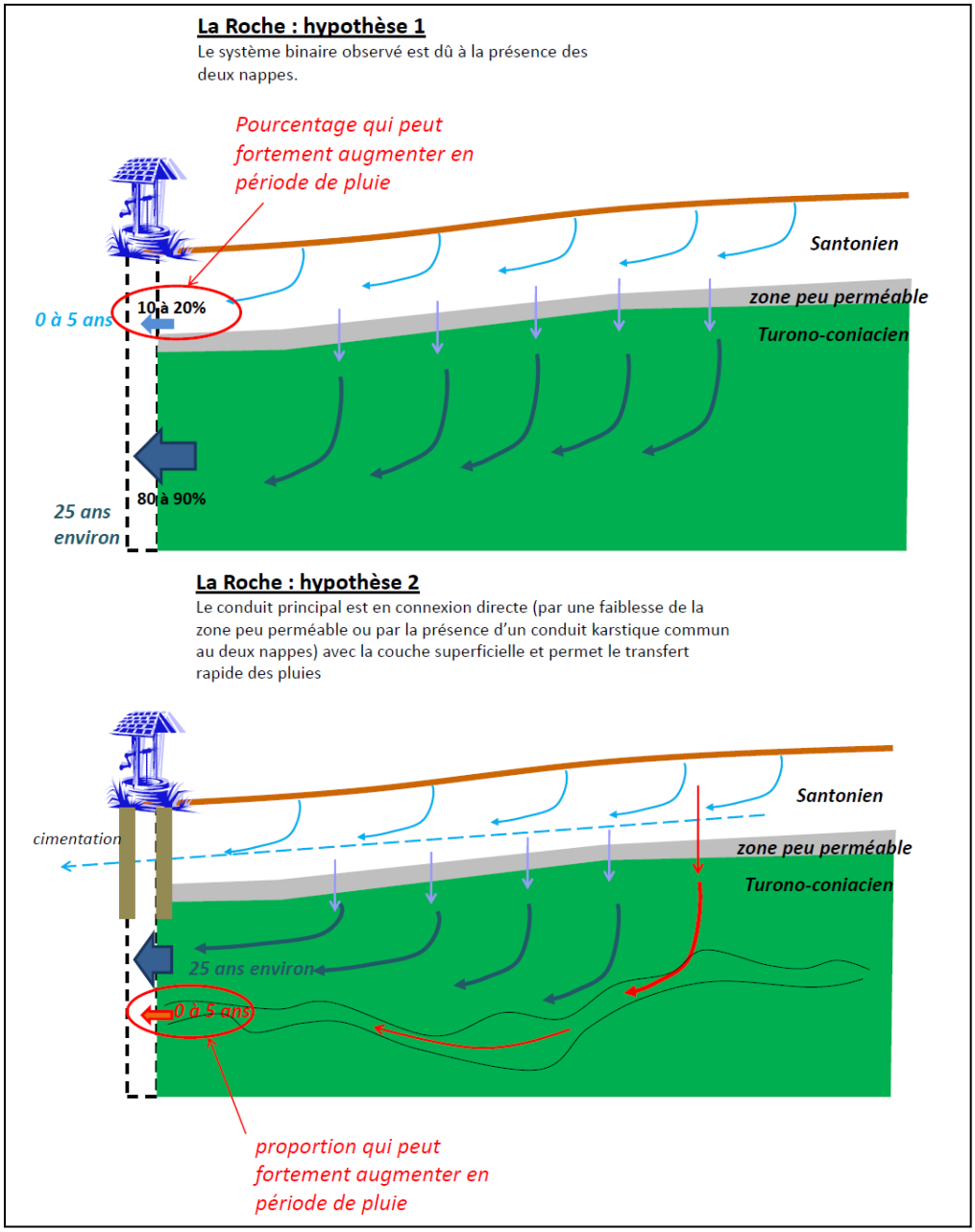



*Figure 10 : hypothèses de modèles de mélange avec participation d'eau récente*

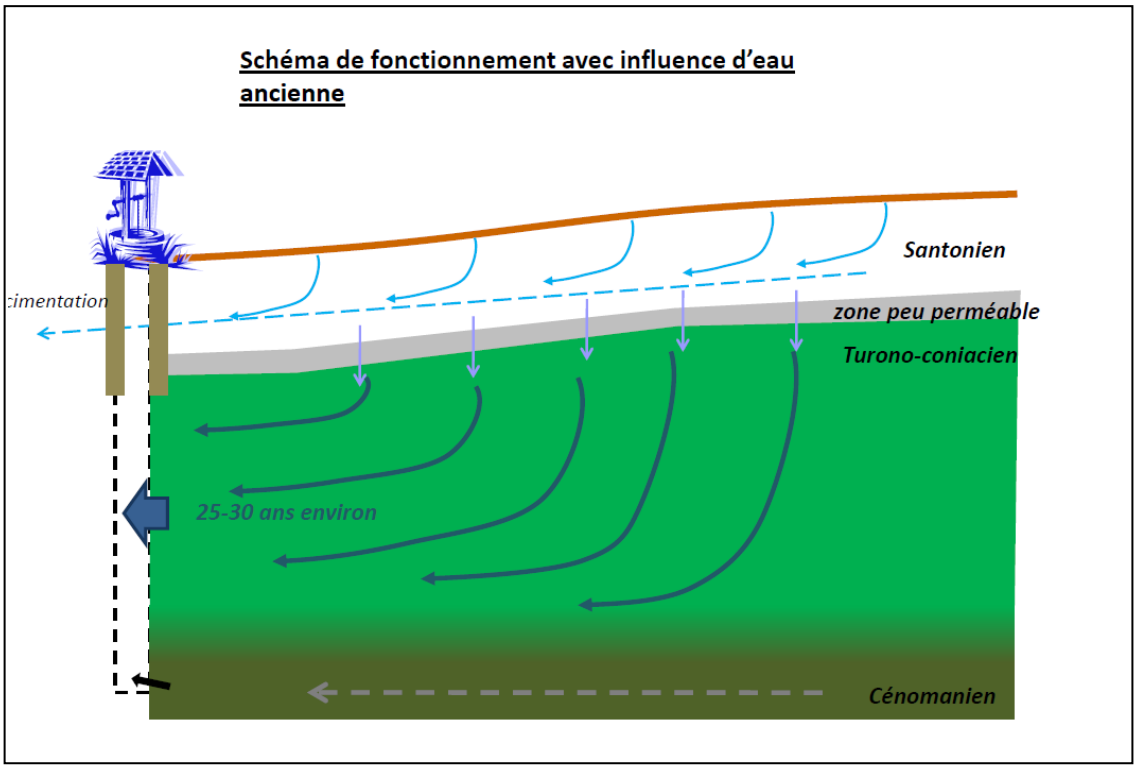


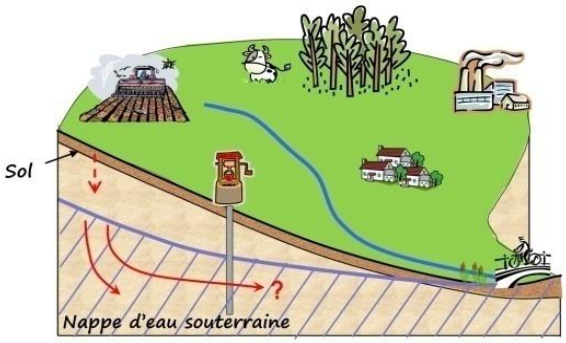

*Figure 11 : hypothèses de modèles de mélange avec participation d'eau ancienne*

Un certain nombre d'hypothèses reste à valider en termes de réservoirs (caractéristiques chimiques et hydrogéologiques). Une campagne hautes-eaux est prévue au 1er semestre 2011 de façon à lever certaines de ces incertitudes (ex. : participation « d'eau récente ») et valider les hypothèses émises

# Annexes

## Annexe 1 : Datation des eaux souterraines

Les chlorofluorocarbones (CFC) et l'hexafluorure de soufre (SF6)[1] sont des gaz anthropiques dont la production n'a commencé qu'au milieu du XX$^{ème}$ siècle. L'eau souterraine au moment de son infiltration est en contact avec l'atmosphère : elle enregistre donc cette signature atmosphérique et la conserve ensuite tout au long de sa circulation dans le milieu souterrain.



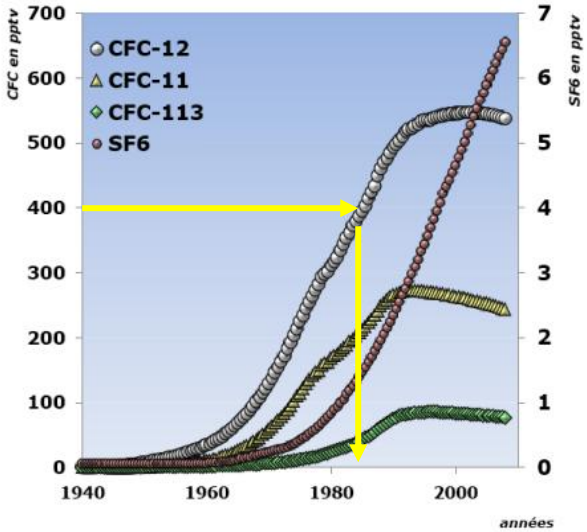

La datation des eaux par les CFC a été rendue possible par la connaissance de :

- leurs concentrations atmosphériques sur les 50 dernières années par le suivi de la NOAA et les reconstitutions historiques à partir des données fournies par les industriels sur les ventes (concentrations identiques en tout point d'un même hémisphère)
- leurs caractéristiques chimiques et en particulier leur solubilité dans l'eau
- l'existence de techniques analytiques permettant la détection et la quantification de ces gaz dans l'eau à de très faibles concentrations
- leur stabilité dans les conditions physico-chimiques normales rencontrées dans l'atmosphère et le milieu souterrain (à l'exception des milieux extrêmement réducteurs avec production d'hydrogène de soufre $H_2S$)

*et car leurs concentrations atmosphériques sont croissantes d'une année sur l'autre et permettent donc d'obtenir une signature différente et distinguable d'une année à l'autre.*

Les CFC ont d'abord été utilisés dans le cadre de la datation et du suivi des masses océaniques dans les années 70. Les premières études hydrogéologiques datent de la fin des années 1970 et leur utilisation plus régulière est concomitante de la publication d'une procédure de prélèvement par l'USGS au début des années 1990.

[1] ***CFC*** *: Chlorofluorocarbones plus connus sous leur nom commercial : Fréons. Gaz anthropiques servant de gaz propulseurs, réfrigérants ou solvants également gaz à effet de serre et destructeur de la couche d'ozone (interdits par le protocole de Montréal)*
***SF6*** *: Hexafluorure de soufre. Gaz isolant utilisé en industrie. Peut être produit naturellement par les roches cristallines.*




*Plus l'eau va être jeune, plus la quantité de gaz dissous va être importante.*

Les 3 CFC (CFC-11, CFC-12 et CFC-113) utilisés et le SF6 n'ont pas les mêmes applications industrielles. Ce sont :

- des isolants électriques (SF6)
- des solvants (CFC-113)
- des réfrigérants (CFC-12)
- des gaz propulseurs (CFC-11)

Il est donc relativement rare de trouver un site contaminé pour l'ensemble de ces traceurs ce qui permet de disposer dans la majeure partie des cas (80%) d'au moins deux traceurs pour réaliser la datation.

La difficulté de la méthode à partir de l'analyse des CFC et du SF6 vient de leurs concentrations extrêmement faibles (de la picomole à la femtomole par litre – $10^{-12}$ / $10^{-15}$ moles par litre) qui nécessitent, en plus d'un matériel analytique de pointe, des conditions de prélèvement assurant un transfert des eaux souterraines échantillonnées de la nappe vers l'ampoule de stockage sans aucun contact atmosphérique.

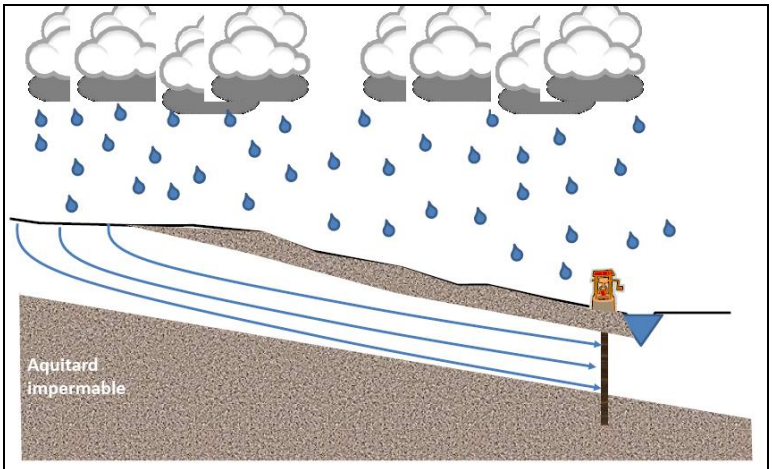
**Les CFC permettent non seulement de dater les eaux de manière qualitative (l'eau s'est-elle rechargée avant 1950 ou après) mais aussi <u>quantitative sur les 50 dernières années</u>.**

## Annexe 2 :Description des modèles de recharge

L'âge des eaux souterraines obtenu par analyse des CFC et du SF6 doit être interprété en fonction du modèle de circulation qui reproduit le mieux les concentrations observées et les différences de date de recharge indiquée par les traceurs.

### Modèle Piston :

C'est le modèle le plus simple : dans ce schéma de fonctionnement chaque masse d'eau de l'année n est isolée de celle rechargée l'année n-1. L'eau circule dans un tuyau où la recharge de l'année en cours expulse du système l'eau située en fin de circuit. Dans ce modèle l'âge moyen de l'eau correspond à son âge réel et l'ensemble des traceurs indiquent la même date de recharge (à l'incertitude de mesure près).



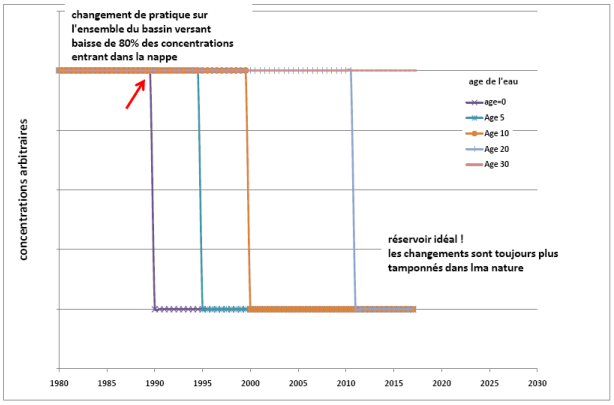

**Modèle Piston**

*Zone de recharge localisée, isolement au cours de la circulation souterraines*

Implication en termes de réactivité au changement :

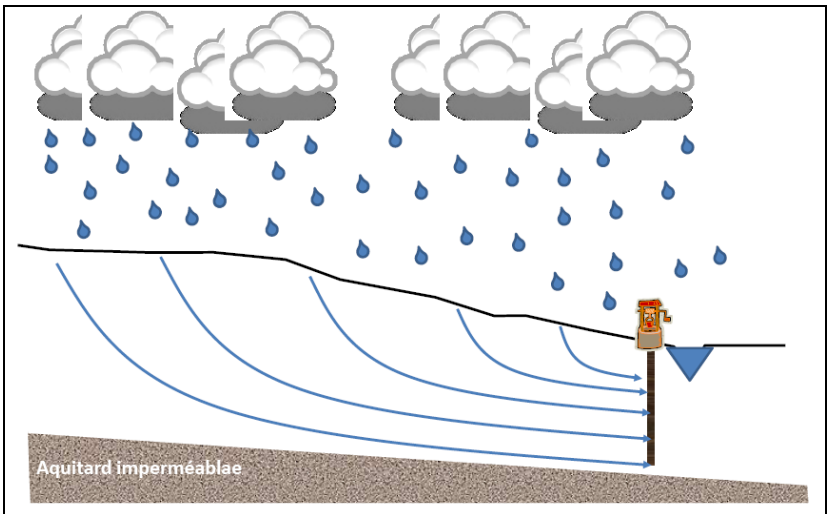
Dans ce système idéal le changement de concentration « entrante » se répercute automatiquement à la sortie dans un délai correspondant à l'âge de l'eau.

*Dans la réalité hydrogéologique il existe toujours des circulations plus lentes qui tamponnent la variation de concentrations. Les variations observées ne sont pas si franches mais ont lieu dans une période proche du délai indiqué par la datation.*



## Modèle à recharge continue ou modèle exponentiel :

Ce modèle est assez proche de la réalité hydrogéologique pour les nappes libres. Il est basé sur une infiltration des eaux tout le long du bassin versant. Le flux arrivant au point de prélèvement est donc composé d'une multitude de lignes d'eau d'âge compris entre 0 et l'âge maximal lié à la superficie de la zone de recharge.
Le temps de résidence moyen correspond donc à la moyenne des âges de ces lignes d'écoulement, il existe donc des lignes qui ont un âge supérieur à cette valeur. Néanmoins il y a une relation directe entre l'âge moyen et l'âge de la plus longue ligne d'écoulement : plus celle-ci est longue (et donc l'eau vieille) plus l'âge moyen (ou temps de résidence) sera important.

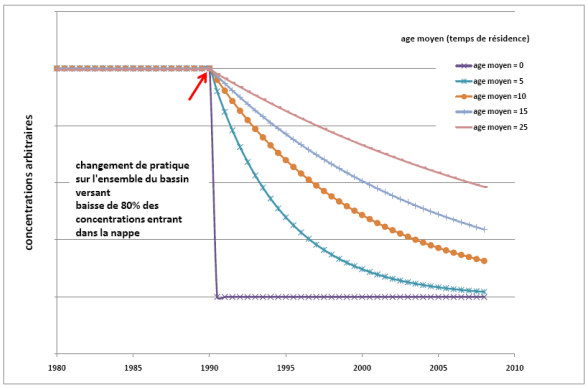



**Modèle à Recharge continue (modèle exponentiel)**

*La recharge s'effectue sur tout le bassin versants, a un point donné c'est donc un mélange d'eau de tous âges.*

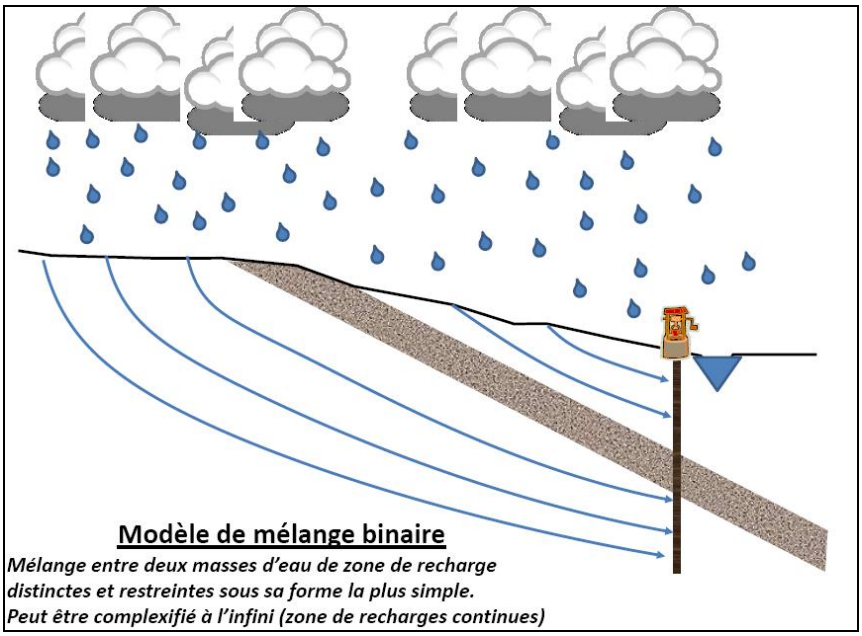
Implication en termes de réactivité au changement :

Dans ce modèle de circulation des eaux très récentes participent à l'écoulement. Tout changement de concentrations va donc se faire sentir dès la mise en place de l'action. Le temps de résidence ou âge moyen va lui gouverner la vitesse de la diminution des concentrations et la période à laquelle environ la moitié du réservoir aura été renouvelée.



## Modèle de mélange binaire :

Dans ce modèle deux masses d'eau distinctes (et donc d'âges différents) alimente le point analysé. C'est le modèle observé en cas de mélange nappe-rivière par exemple ou dans des systèmes géologiques avec des couches bien individualisées.




Dans le cadre des datations, l'hypothèse choisie est le mélange entre :

- une masse d'eau récente (0-5 à 0-10 ans)
- une masse d'eau ancienne sans CFC ni SF6

Ces hypothèses permettent d'estimer le **pourcentage maximal** d'eau récente dans le système, en effet si la deuxième masse est plus récente (a une concentration en CFC et SF6 significative), alors le pourcentage d'eau récente sera forcément moindre que celui mesuré avec les deux hypothèses extrêmes.

Implication en termes de réactivité au changement :

Dans ce schéma de fonctionnement tout dépend du modèle de chaque masse d'eau (piston ou recharge continue) et de leurs âges. Le délai de réaction du système et sa vitesse de diminution dépend des hypothèses choisies pour chacune des masses d'eau.

## Annexe 3 : résultats bruts de datation