

“Espere com la pedra. Perquè la pedra espera.

La pedra rep els dies com la terra la pluja.”

Vicent Andrés Estellés

“Il est toujours aisé d'être logique.

Il est presque impossible d'être logique jusqu'au bout.”

Albert Camus

Agraïments

En primer lloc voldria agrair a Jean François Vernoux, cap d'aquest projecte al servei EAU del BRGM d'Orléans, per haver confiat en un no francòfon per treballar en aquest estudi.

Un segon agraïment ben especial és per Arnaud Wuilleumier, company del BRGM d'Orléans en aquest projecte, per haver estat tot el temps que feia falta amb mi, ajudant-me a aprofundir en les coneixences dels Sistemes d'Informació Geogràfica.

A Nathalie Dörfliger, del BRGM de Montpellier, per donar-me un cop de mà sobre el terreny i ensenyar-me un poc més sobre l'apassionant món dels carsts.

A la resta de companys del servei EAU del BRGM d'Orléans per la bona acollida, el bon ambient i per estar sempre disposats a resoldre'm qualsevol dubte.

A Virginie Journe, Rémi i Surendra Atal per haver compartit el despatx i els moments de joia i d'estrès que hi tenen lloc.

A la tutora d'aquesta tesina a l'ETSECCPB, la Nieves Lantada, per haver estat la meua introductora en el món dels SIG.

A Enric Vázquez per haver-me motivat a emprendre el camí de l'hidrogeologia.

Per a tota la gent de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie que ens van facilitar les dades suplementàries que ens eren necessàries en el moment oportú.

Gràcies a Anne Reynaud, de l'associació AQUIL'Brie per haver-nos ajudat en el cas de Nangis.

Al ajuntament de Kernilis (Bretanya) i especialment al seu alcalde, senyor Adams, per tota l'atenció mostrada.

Un agraïment ben profund a Céline Blanc per haver fet de la meua estada a Orléans una experiència inoblidable. També un mot per Nicolas Delhomme i els companys de l'ENSG de Nancy pels bons moments passats.

A Camille Ménard, per estar en tot, per haver-me acollir al seu poble i per tantes i tantes coses. Moltes gràcies!

Als companys vilafranquins Ivan Barreda i Sara Salvador, per la seua visita a París i aportar-me així el calor del poble en la distància.

Als companys de despatx a Barcelona Radu Gogu, Violeta Velasco i Adrià Garriga per la seua companyia i ajuda en els moments d'estrès final.

Als meus pares, iaies i tio.

1. Introducció

1.1 Plantejament del problema

Aquesta tesina ha estat realitzada durant un període de quatre mesos de pràctiques entre maig i setembre de 2007 a l'institució BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minier) de França. El servei dedicat a la gestió dels recursos hídrics d'aquest organisme públic francès era l'encarregat de treballar en aquest projecte de la vulnerabilitat dels aqüífers explotats per alimentar la població. En el projecte hi col·laboraven també l'Agència de l'Aigua de la conca del Sena-Normandia (AESN) i el Ministeri del Medi Ambient francès.

La voluntat de trobar un mètode de delimitació de les zones d'alimentació de les captacions d'aigua potable i la seua vulnerabilitat naix en la política nacional de gestió de les aigües subterrànies franceses, de la seua coneixença i de la seua protecció, d'acord amb la *Directive Cadre sur l'Eau* (Directiva Marc de l'Aigua).

Enfront als problemes de contaminació d'origen agrícola que afecten les captacions de l'estat francès i per tal de poder-ne prendre'n mesures agroambientals de millora, sembla prioritari treballar a una escala que abasti tota la zona d'alimentació de les captacions. En aquest contexte cal trobar una metodologia per definir aquesta zona d'alimentació de les captacions. Després, de cara a jerarquitzar les accions a emprendre dins d'aquesta zona d'alimentació, esdevé fonamental el concepte de vulnerabilitat enfront a contaminants difusos (majoritàriament nitrats i pesticides) i l'establiment d'una metodologia per definir-la.

La llei francesa estableix tres perímetres de protecció al voltant d'una captació d'aigua potable, l'objectiu dels quals és la protecció de cara a contaminants accidentals i puntuals (accidents de trànsit, vessaments industrials) i no pas contra contaminants d'origen difús com són els generats per l'activitat agrícola i ramadera. Prendre en compte la vulnerabilitat a nivell de tota la zona d'alimentació enfront a la pressió agrícola és per tant un complement d'aquestes mesures ja establertes per la llei francesa.

La nova llei sobre l'aigua i els medis aquàtics promulgada el 30 de desembre de 2006 pel govern francès crea un dispositiu reglamentari de lluita contra la contaminació difusa permetent a les prefectures (equivalent a les diputacions provincials en el cas espanyol), després d'una fase voluntària, d'imposar un programa d'accions sobre les zones establertes de cara a protegir la zona d'alimentació del pou d'aigua potable. Aquesta eina jurídica reforçarà l'acció ja existent de les agències de l'aigua sobre les zones d'alimentació. La posada en marxa d'aquesta llei es beneficiarà dels resultats del present treball.

1.2 Objectius

L'objectiu principal d'aquest treball és facilitar a tots els actors que treballen en l'abastiment d'aigua potable de França una guia metodològica per delimitar les zones d'alimentació de les captacions d'aigua subterrània i també una sèrie de criteris per avaluar la vulnerabilitat de les aigües explotades. Aquesta guia metodològica ja ha estat publicada pel BRGM (Vernoux et al. 2007b).

Aquesta metodologia ha d'estar adaptada a les possibilitats econòmiques de les col·lectivitats locals, per tant ha de destacar per ser aplicable, sense haver-se de recórrer a estudis massa costosos a priori.

No només cal parlar de facilitar aquesta guia metodològica com a objectiu de la tesina, sinó també que aquesta metodologia hagi estat provada i validada, aplicant-se en casos reals. És per tant un dels objectius de la tesina l'aplicació en sis casos reals de la metodologia, pas a pas.

1.3 Estructura de la memòria

Aquesta tesina està organitzada de la següent manera. En una primera part, es tractaran d'explicar els conceptes bàsics i de la manera en que són emprats al llarg del treball. El capítol 3 descriu els tres grans tipus d'aqüífer que s'han considerat en aquesta tesina, les seues característiques fonamentals i els trets principals per distingir els uns dels altres. A continuació el capítol 4 explica d'una manera resumida els treballs previs i les metodologies d'avaluació de la vulnerabilitat ja existents que han servit en major o menor mesura de font d'inspiració de cara a la metodologia proposada en aquest treball.

El capítol 5 ja entra de ple en la descripció de la metodologia que s'ha proposat, pas a pas. En el següent capítol, el sisè, es presenta la fase de prova de la metodologia, des de l'elecció dels casos reals on aplicar-la fins els resultats obtinguts. Finalment hi ha les conclusions (capítol 7) així com un glossari amb alguns termes tècnics emprats i tot un seguit d'acrònims i sigles. Tenint en compte que aquesta metodologia ha estat feta a França i pensada per a ser aplicada a França hi haurà tota una sèrie de termes que necessitaran anar acompanyats de la corresponent explicació.

En l'annexe I hi ha les taules i esquemes corresponents a mètodes d'avaluació de la vulnerabilitat d'aqüífers ja existents i que han servit de base per al mètode proposat. L'annexe II conté les explicacions del funcionament d'algunes aplicacions informàtiques que s'han utilitzat al llarg d'aquest treball. Finalment en l'annex III es trobaran els informes de l'aplicació del mètode als casos reals. Aquest tercer annex només es troba en el DVD adjunt al treball. En aquests informes, en una primera part es fa una introducció als diferents contextes (clima, hidrologia, geologia, hidrogeologia, pedologia, etc) i en les posteriors parts s'explica l'aplicació de la

metodologia, amb les justificacions de totes les decisions preses. A més a més hi ha un llistat amb tots els llocs que havien estat proposats per l'Agència per tal de provar-hi el mètode proposat en el present estudi. Finalment, en el DVD adjunt també s'hi adjunta la guia metodològica que ha estat publicada pel BRGM el setembre de 2007, així com els fitxers de les modelitzacions numèriques realitzades amb diferents programes informàtics.

2. Conceptes previs i terminologia

2.1 Zona d'alimentació d'una captació

En una primera part cal definir una sèrie de conceptes que s'aniran utilitzant al llarg d'aquest estudi, que han estat extrets de Vernoux et al. (2007a). Aquests conceptes han estat explicats àmpliament en altres treballs, com ara els fets per l'ITGE (1990) o Lallemand-Barrès et al. (1989).

La **conca subterrània d'un aqüífer** és una part d'aquest on les aigües es mouen cap a un mateix punt o punts de sortida. En amunt aquesta conca es delimita per una línia divisòria d'aigües subterrània que no té perquè coincidir amb la conca topogràfica.

La **porció d'aqüífer que alimenta la captació** és tota la part d'aqüífer on les molècules d'aigua acabaran el seu recorregut al pou. Aquesta delimitació dependrà de diferents factors hidrodinàmics, estructurals i del propi règim d'explotació del pou. Aquesta porció no té perquè ser la totalitat de la conca subterrània definida anteriorment, pot correspondre a només una part d'aquesta. En els casos de surgències naturals situades a la sortida de la conca subterrània aquesta coincidirà amb la porció d'aqüífer que alimenta la captació.

La **zona d'alimentació d'una captació**. Aquesta zona no es centra en l'aqüífer sinó en la superfície del terreny i és la resposta a la pregunta, *d'on procedeix l'aigua que està dins la porció d'aqüífer que alimenta la captació que s'està estudiant?* Abarca tota la part de terreny l'aigua de pluja de la qual és susceptible d'infiltrar-se tard o d'hora i arribar a la porció d'aqüífer que alimenta la captació que ens concerna. En altres termes també és podria dir com l'àrea de recàrrega que correspon a la porció d'aqüífer que alimenta la captació.

En el cas més normal aquesta zona d'alimentació serà la simple projecció en superfície de la porció d'aqüífer que abasteix la captació (Fig. 1). En altres casos caldrà afegir-hi les conques hidrològiques del voltant, les aigües d'escorriment de les quals acudeixen a infiltrar-se sobre la porció d'aqüífer explotada (Fig. 2).

En els casos d'aqüífers captius o de superposició de diferents aqüífers (Fig. 3), la zona d'alimentació caldrà buscar-la fins allà on les aigües d'infiltració arriben a la porció afectada pel pou estudiat.

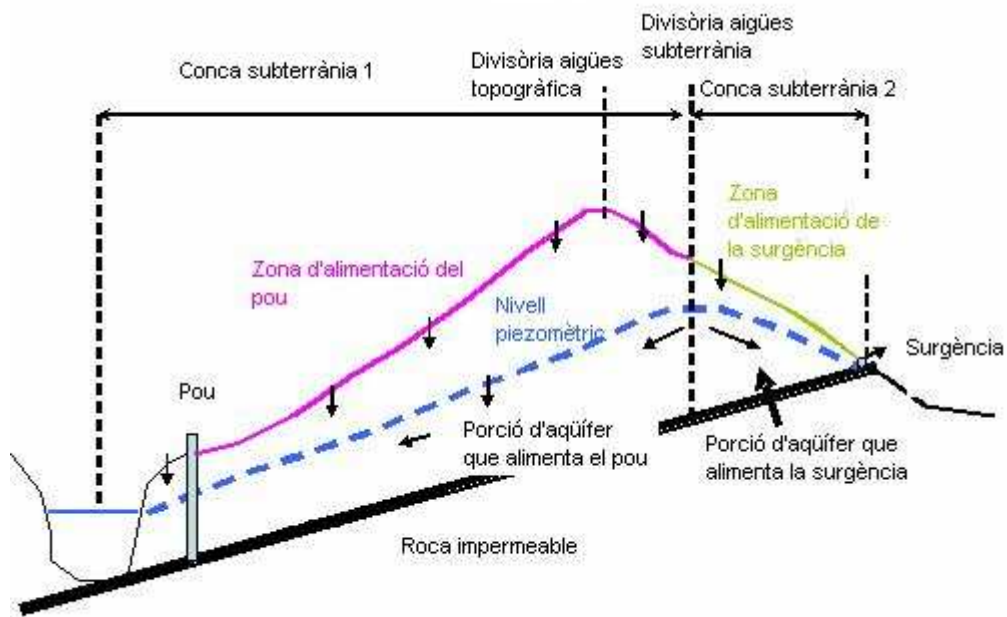


Figura 1 : esquema de la zona d'alimentació d'un pou en en cas d'un aquífer lliure, on la zona d'alimentació coincideix amb la projecció en superfície de la porció d'aquífer que alimenta el pou (Modificat de Vernoux et al. 2007a).

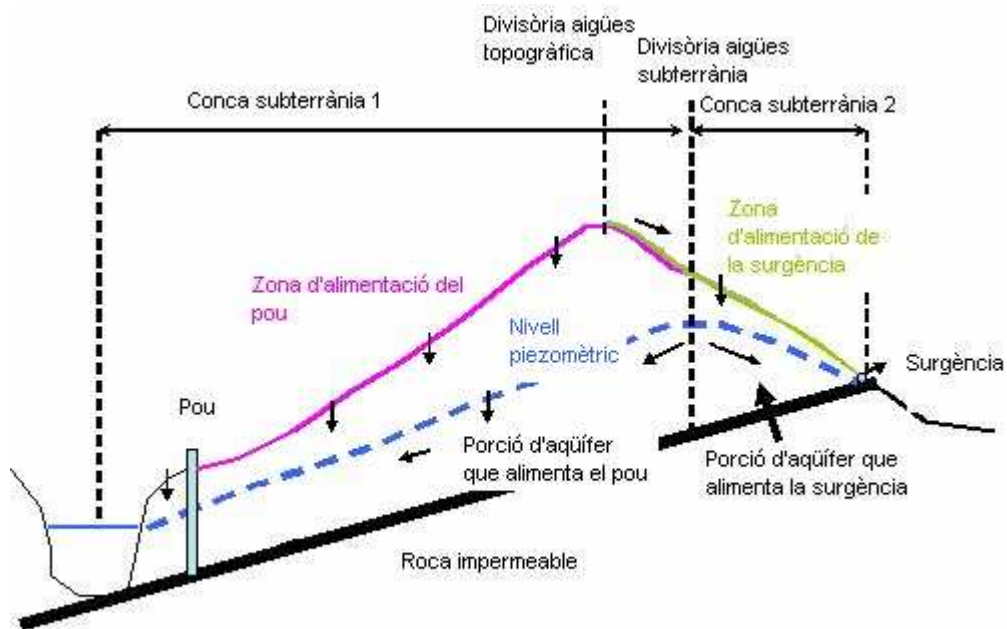


Figura 2 : esquema de la zona d'alimentació del pou i de la surgència en el cas on a la projecció en superfície hi afegim una part que alimenta gràcies al escorriment. En aquest esquema hi ha una part que alimenta el pou i la surgència a la vegada, bé sigui per les aigües que s'infiltra bé les que s'escorren (Modificat de Vernoux et al. 2007a).

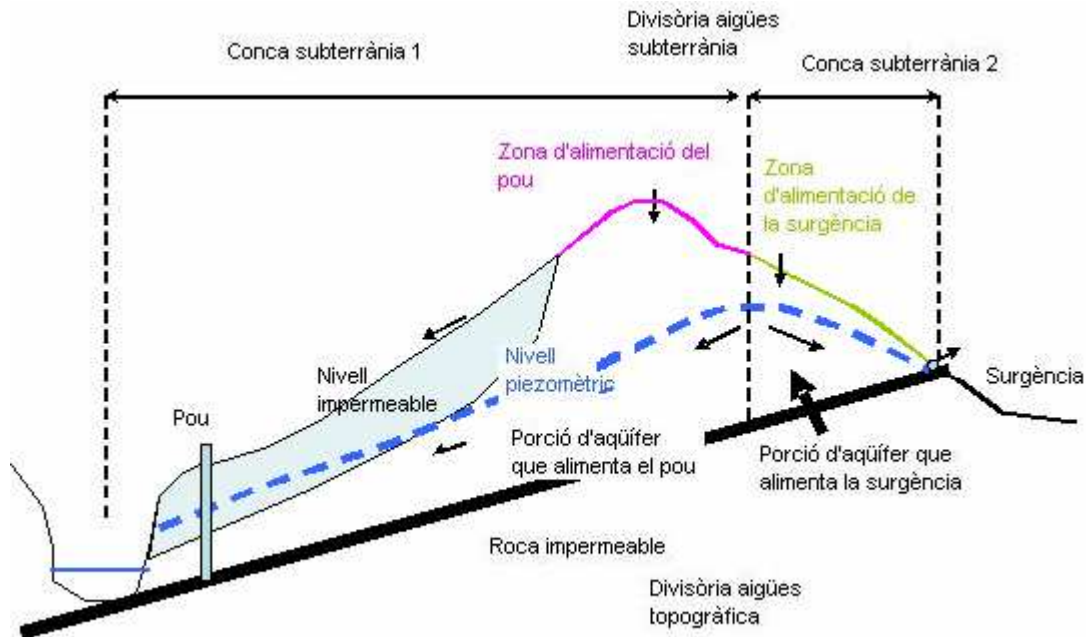


Figura 3 : esquema de la zona d'alimentació del pou en el cas d'un aquífer captiu (modificat de Vernoux et al. 2007a).

En el cas de captacions constituïdes per pous de bombeig i no surgències, la noció de porció d'aquífer que alimenta la captació dependrà del cabal explotat. Aquest concepte s'ha de diferenciar d'altres utilitzats en la literatura (Vernoux et al. 2007a), com ara la zona d'influència del bombeig, que és l'àrea al voltant del pou on el bombeig provoca un descens del nivell en relació al nivell estàtic natural (Fig. 4).

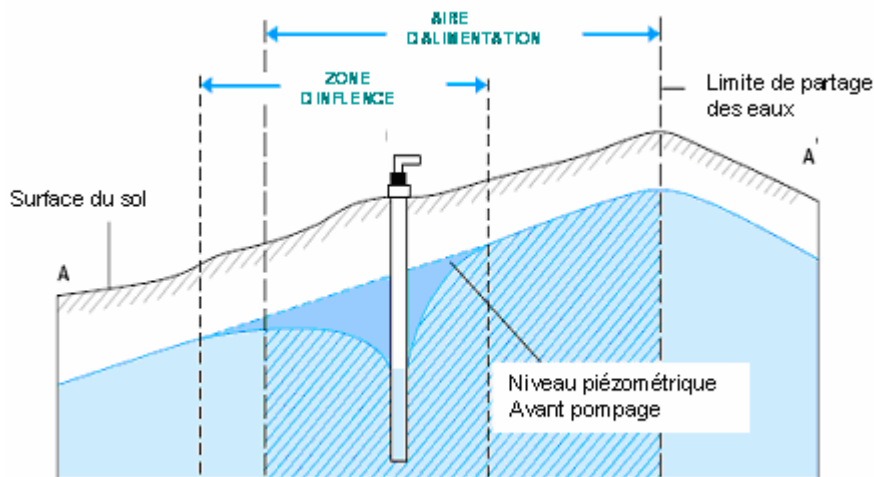


Figura 4 : esquema de la zona d'influència (*zone d'influence*) del pou de bombeig i la zona d'alimentació (*aire d'alimentation*). En blau més fort apareix el descens provocat pel bombeig en relació al nivell inicial (*niveau piézométrique avant pompage*). La zona d'alimentació s'estén fins a la línia divisòria (*Limite de partage des eaux*). (Vernoux et al. 2007a).

2.2 Mètodes de delimitació de la zona d'alimentació de la captació

Un cop definits els diferents termes que participen dins del terme zona d'alimentació de la captació, es comentaran les diferents maneres que existeixen per fer aquesta delimitació.

La base de la delimitació es situa sempre en la porció d'aqüífer que alimenta la captació. Per tant serà en aquest punt on es centraran els mètodes.

2.2.1 Mètodes estructurals

Aquest mètode es fonamenta en la delimitació del propi aquífer explotat a partir de límits geològics. Aquests límits poden ser sedimentaris, tectònics o d'alteració de la roca. Per exemple pot tractar-se d'una falla que suposa un límit impermeable, un canvi de formació sedimentària de més permeable a menys, un canvi en la fracturació de la roca o el propi cabussament de la formació geològica que actua de base de l'aqüífer.

És un mètode que pot estar adaptat en els casos de surgències, ja que en aquest cas la porció d'aqüífer que alimenta la captació i la conca subterrània coincideixen. En els casos de pous en medis fracturat o càrstic aquest mètode pot donar una bona primera aproximació (Bussard 2005).

2.2.2 Mètodes gràfics

Aquests mètodes es basen en la piezometria existent. El sentit de l'escolament subterrani sempre serà perpendicular a les isolínies de nivell. Per tant, partint des del punt representat per la captació i traçant dos línies perpendiculars a la piezometria aigües amunt fins a la línia divisòria d'aigües subterrània, s'arriba a delimitar la porció d'aqüífer que alimenta la captació (Bussard 2005). Aquesta delimitació es pot efectuar d'una manera manual o bé mitjançant amb algunes eines SIG, com ara l'aplicació Hydrotools. Aquesta eina, que treballa amb el mòdul ArcMap del paquet ArcGIS (www.esri.com), delimita a partir d'un mapa d'isolínies o d'un mapa piezomètric en format raster la conca associada a un punt que en aquest cas serà una captació d'aigua subterrània (més informació a la web d'ESRI dedicada a aquesta aplicació <http://support.esri.com/index.cfm?fa=downloads.dataModels.filteredGateway&dmid=15>).

S'aconsella emprar aquest mètode en casos on es coneix d'una manera molt precisa, en hivern i en estiu, la piezometria, i el medi en qüestió és isòtrop, sense presentar grans heterogeneïtats de permeabilitat. La delimitació resultant pot ser satisfactòria aigües en amunt però al voltant del pou es fa necessari sovint recórrer a altres mètodes (Vernoux et al. 2007a). De fet el que es traça amb aquests mètodes és la conca subterrània i no pas la porció d'aqüífer que alimenta la captació. De totes

formes en els casos de surgències o bé en pous on no és possible treballar d'altra manera pot donar una bona idea.

En alguns casos es fa una delimitació que podríem dir topogràfica, és a dir, s'assimila que la piezometria no es diferencia massa de la topografia de la zona i per tant la zona d'alimentació equival a la conca topogràfica.

2.2.3 Mètodes analítics

Els fonaments d'aquests mètodes estan en la solució analítica trobada per Bear i Jacob (1965), que diuen que en un aqüífer ideal amb un escolament uniforme, la porció del aqüífer que alimenta el pou pren una forma parabòlica (Fig. 5).

La solució no pren en compte la recàrrega ni els fenòmens dispersius, és una delimitació purament convectiva. L'aqüífer es considera com un medi porós infinit, isòtrop i homogeni.

Les solucions són:

En aqüífer confinat:

$$X_l = \frac{Q}{2\pi b K i} \quad (1)$$

$$Y_l = \frac{Q}{2b K i} \quad (2)$$

En aqüífer lliure:

$$X_l = \frac{QL}{K\pi(h_1^2 - h_2^2)} \quad (3)$$

$$Y_l = \frac{QL}{K(h_1^2 - h_2^2)} \quad (4)$$

On X_l és el punt d'estancament, és a dir, la distància entre el pou i l'extrem de la paràbola, Y_l és la meitat de l'amplada del front creat pel bombeig a l'infinit, Q és el cabal de la bomba, K és la permeabilitat del aqüífer, i és el gradient hidràulic, b és l'espessor del aqüífer, h_1 i h_2 són les altures piezomètriques de dos punts situats a la mateixa línia de corrent abans de posar-se en marxa la bomba i L és la distància entre aquests dos punts.

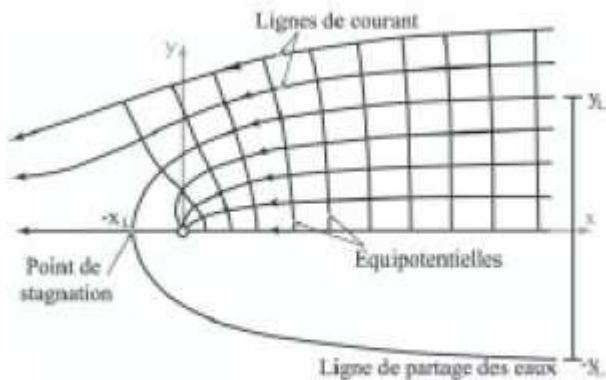


Figura 5 : esquema de la solució analítica, amb els punts X_L i Y_L , així com les línies de corrent (*lignes de courant*), les equipotenciels (*equipotentielles*) i la línia divisòria d'aigües (*ligne de partage des eaux*) (Bussard 2005).

El BRGM disposa d'una aplicació en Excel que permet calcular les coordenades X i Y de l'envoltura d'aquesta zona. Donat que de vegades la determinació de certs paràmetres com la permeabilitat, el gradient o l'orientació és incerta, aquesta aplicació permet fer un anàlisi estocàstic de la variabilitat dels paràmetres. Una explicació més detallada d'aquesta eina està al annex II.

Encara dins de les solucions analítiques està el programa WhAEM (*Wellhead Analytic Element Model*). Aquest programa es basa en el mètode dels elements analítics (Kraemer et al. 2005), ha estat desenvolupat per l'EPA (*Environment Protection Agence*) dels Estats Units i es pot descarregar gratuïtament per Internet. Permet anar una mica més lluny dins de les solucions analítiques. Així es pot afegir una recàrrega, intercanvis riu - aqüífer, límits impermeables i diferents pous bombejant a la vegada. L'aqüífer es considera homogeni, isòtrop i d'una sola capa. Els pous es considera que bombegen al llarg de tot l'aqüífer, sempre en règim permanent. Algunes heterogeneïtats poden ser introduïdes però cal anar amb compte amb la forma que prenen ja que del contrari el programa no pot calcular la solució (Kraemer et al. 2005). En l'annexe II es facilita també una explicació del funcionament d'aquest programa.

La solució de la porció d'aqüífer que alimenta la captació Whaem la troba a partir de les línies de corrent que hi convergeixen. Aquesta delimitació és purament convectiva com la que s'obté amb el mètode analític anteriorment explicat. Sembla ser un programa molt ben adaptat per a medis homogenis, simples, com per exemple un aqüífer al·luvial amb intercanvis amb un riu.

2.2.4 Mètodes numèrics

Vistos els problemes i les limitacions dels mètodes explicats fins el moment, la utilització de mètodes numèrics és cada vegada més habitual. Les modelitzacions

numèriques permeten considerar les heterogeneïtats del sistema, tant sigui de la permeabilitat, com de la base del aquífer, la presència de rius connectats amb el sistema, etc. A més a més permeten de prendre en compte els efectes d'altres bombejos al mateix temps, així com fer modelitzacions en règim transitori.

El seu principi està en discretitzar les equacions diferencials que descriuen el flux de l'aigua en un medi porós en diferents malles limitades per nodes. Cadascuna d'aquestes malles tindrà els seus propis paràmetres hidrodinàmics (permeabilitat, porositat) així com les condicions inicials. Les condicions límit també seran imposades a una sèrie de malles (contorn impermeable, nivell constant). El model es presenta com un sistema d'equacions simultànies que han de verificar les condicions de contorn, on hi haurà tantes equacions com nodes. La resolució serà en diferències finites o en elements finits (Bussard 2005). Les equacions a resoldre són les següents (Bussard 2005; Carrera 2006).

L'equació de flux (5) descriu l'escolament de les aigües subterrànies. Formalment s'escriu de la manera següent.

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (-[K] \text{grad}(h)) + Q = 0 \quad (5)$$

On S_s és el coeficient d'emmagatzemament específic [L^{-1}], h és el nivell piezomètric [L], t és el temps, K és un tensor de conductivitats hidràuliques [L/t], ∇ és l'operador divergència [L^{-1}] i Q és el terme de font volúmica [$L^3/L^3 \cdot t$]

El transport d'una massa dissolta dins del medi aquífer ve donat per la següent equació:

$$m \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-[D] \text{grad}(u) + qu) + f + \lambda u = 0 \quad (6)$$

On m és la porositat (adimensional), u és la concentració del solut [M/L^3], ∇ és l'operador divergència [L^{-1}], D és un tensor de la dispersió hidrodinàmica [L^2/t], q és la velocitat de Darcy [L/t], f és terme font de matèria dissolta [$M/L^3 \cdot t$] i λ és un terme de degradació de la matèria [t^{-1}].

Un dels avantatges dels mètodes numèrics és que permeten fer diverses simulacions fins trobar-ne la més satisfactòria i semblant a la realitat observada sobre el terreny, el que s'anomena calatge del model. També hi ha la possibilitat d'utilitzar el problema invers que permet obtenir els paràmetres del aquífer a partir de la resposta real obtinguda (Carrera et al. 1986).

Existeixen dos maneres de delimitar la porció d'aquífer que alimenta la captació amb els mètodes numèrics, la purament convectiva i la dispersiva. La primera d'aquestes

només es faria prenent en compte la resolució de l'equació de flux (5) i la segona obligaria a la resolució de l'equació de flux i de transport (5 i 6).

Delimitació convectiva

Com ja s'ha comentat anteriorment, la resolució numèrica de l'equació de flux (5) en un aqüífer dona els nivells piezomètrics en el conjunt del sistema, bé sigui en règim permanent o transitori. A partir del o dels punts que representen els pous explotats, el conjunt de línies de corrent que hi convergeixen donaran la delimitació convectiva de la porció d'aqüífer que alimenta la captació o les captacions d'aigua potable.

Es parla de delimitació advectiva o convectiva perquè està basada en el camp de flux hidràulic que representa l'intensitat i la direcció mitjana del flux subterrani sobre cada element o cèl·lula. Des d'aquest punt de vista, una partícula de contaminant que entra al sistema fora de les línies de corrent que convergeixen cap al pou no arribarà a la captació. En termes de probabilitat hi hauria un camp binari, $P=1$ dins de la zona delimitada i $P=0$ fora d'ella (Bussard 2005).

Delimitació dispersiva

La realitat és més complexa que el camp binari de possibilitats explicat anteriorment. Si hi ha una entrada de contaminant en el sistema fora de la zona convectiva això no significa que la captació al final no estigui contaminada. La dispersió, que és deguda a la tortuositat en el camí de les partícules i al moviment brownià de les molècules, és la causant d'això.

La dispersió d'un aqüífer es coneix mitjançant tres paràmetres com són la dispersivitat longitudinal, transversal i la vertical. La determinació d'aquests es pot fer a partir d'un assaig de traçadors. En el cas en que aquests assaigs no es puguin fer hi ha tota una sèrie de solucions empíriques, que depenen fortament de l'escala de l'estudi. De manera general la dispersivitat longitudinal serà més gran que les altres dos, normalment en un ordre de magnitud (Bussard 2005). Si es simplifica el medi aqüífer com un medi 2D no es considera la dispersivitat vertical. Algunes de les equacions empíriques existents s'adjunten a continuació (Bussard, 2005):

Dispersivitat longitudinal (α_L):

- R. Holländer (1989) resumeix els treballs de diferents autors i indica que α_L està normalment entre 12 i 380 m.
- Xu i Eckstein (1995) representen un gran nombre de dades i proposen correlacions determinades pel mètode dels mínims quadrats ponderats entre la dispersivitat longitudinal i l'escala de treball [L]. Una de les solucions és la següent :

$$\alpha_L = 0,94 * (\text{Log}_{10} L)^{2,693} \quad (7)$$

En el seu treball van constatar que quan l'escala de treball excedeix un kilòmetre les diferències de dispersivitat esdevenen febles.

- De Marsily (1996) indica que per un medi porós d'interstici α_L varia entre 1 i 100 metres.
- Domenico et Schwartz (1997) indiquen que cal anar en compte amb els valors de dispersivitat de la literatura ja que moltes vegades les condicions de mostreig no són òptimes i es tendeix a una sobrevaloració de la dispersivitat.

Per a la dispersivitat transversal α_T Holländer (1989) diu que representa entre el 10 i el 30% de la dispersivitat longitudinal. Gelhar (1992) indica que aquest valor sol estar per un ordre de magnitud per sota de la dispersivitat longitudinal. El mateix autor diu que la dispersivitat vertical va d'un a dos ordres de magnitud més petits que la dispersivitat transversal (Bussard 2005).

Per a l'equació de transport (6) existeixen algunes solucions analítiques per a casos particulars. Així per al cas d'una injecció puntual en un medi aquífer la solució analítica és la següent (Carrera 2006).

$$u = e^{-\lambda t} \cdot \left(ft + \frac{M}{a\pi^{n/2} \sqrt{|2Dt/a|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(x-vt)^2 (2Dt/a)^{-1} (x-vt)\right] \right) \quad (8)$$

On u és la concentració del producte injectat [kg/m^3], t és el temps [s], f és el terme font de matèria dissolta [$\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$], λ és un terme de degradació [t^{-1}], M és la massa injectada [kg], a és el coeficient de retràs, D és la dispersió que es calcula com el producte de la dispersivitat i la velocitat del flux [m^2/s], n és la dimensió del problema, x són les coordenades de qualsevol punt de l'espai per al qual es calcula la concentració [m] i v és un vector de velocitat del flux subterrani [m/s].

La forma d'aquesta solució és una campana de Gauss amb una desviació típica igual a $\sqrt{|2Dt/a|}$.

La majoria de programes de modelització d'aquífers tenen un mòdul que ressol numèricament l'equació de transport, que permet la simulació de l'expansió d'una taca de contaminant en un aquífer prenent en compte els efectes de la dispersió. Normalment s'opera de la manera següent:

- s'introdueix un punt d'entrada del possible contaminant

- s'observa a diferents temps quina és l'extensió de la taca, si aquesta afecta o no la captació d'aigua potable i en quina concentració de contaminant.

Per tant es tracta d'un càlcul en avall (*forward*). Es podria pensar en una resolució en amunt, és a dir, partint des del pou veure des de quines zones hi convergeixen les partícules, de la mateixa manera que s'operava amb la delimitació convectiva. La determinació en amunt es basa en la resolució de *l'equació backward-type de Kolmogorov* (KBE) (Uffink 1989) que descriu la situació passada del sistema coneixent-ne el seu estat actual. D'aquesta manera es determina un camp de probabilitats de que les partícules arriben al pou estudiat (Bussard 2005). El problema d'aquesta segona manera d'operar és que els programes més comuns al mercat o gratuïts no permeten resoldre la KBE i per tant no es pot delimitar aquest camp de probabilitats.

Aleshores resta com la forma més senzilla de prendre en compte la dispersió en la delimitació de la porció d'aquífer el anar provant diferents posicions d'injecció de contaminant en el sistema i veure'n la concentració que provoquen en la captació al cap d'un cert temps.

Programes

Són molt nombrosos els programes que modelitzen el flux en medi porós bé sigui per diferències finites bé per elements finits. En el cas d'aquest treball s'ha treballat amb el programa ASMWIN (Aquifer Simulation System for Windows), que és un dels més senzills i que es pot descarregar gratuïtament per Internet (<http://www.pmwin.net/asmwin6.htm>). El fet d'utilitzar aquest programa és degut a que l'objectiu del treball és oferir una metodologia que sigui aplicable i que no comporti grans modelitzacions numèriques per defecte. ASMWIN és un programa creat per el ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) de Zurich (Suïssa) que treballa en diferències finites. És fàcil d'utilitzar i serveix per modelitzar contextos senzills. Només permet introduir una sola capa (modelització 2D) i el nombre de malles és limitat (Chiang et al. 1998). Aquest fet provoca que només sigui convenient usar ASMWIN en casos de geometries senzilles. Pot treballar en règim permanent o transitori, es poden introduir canvis en els paràmetres hidrodinàmics, resol l'equació de flux i de transport (aquesta només en forma *forward*). Permet prendre en compte les relacions riu – aquífer amb un coeficient d'intercanvi riu-aquífer. El calatge dels models no sempre és senzill.

Per fer modelitzacions numèriques més complexes caldrà recórrer a programari amb millors prestacions, que permetin models 3D i sense limitacions en el nombre de malles. En aquest estudi no s'ha treballat amb cap d'aquests programes però no obstant se'n citaran alguns. El que cal tenir present és que aquests programes, que poden modelitzar pràcticament totes les geometries, necessiten un gran nombre de dades de terreny. Un dels programes comercials més estès és MODFLOW (<http://www.modflow.com/>), el BRGM en té un altre de propi i disponible al mercat anomenat MARTHE (<http://www.brgm.fr/pdf/logiciels/Marthe.pdf>) i el Grup

d'Hidrologia Subterrània de la UPC té el TRANSIN (<http://www.h2ogeo.upc.es/catala/software.htm>).

2.2.5 Mètodes complementaris

A més dels mètodes ja vistos, n'hi ha d'altres, que si bé no són suficients per sí sols, poden aportar informacions complementàries ben útils. Estaríem parlant dels assajos de traçadors, que tenen la propietat de fer comprendre millor el sistema quan aquest és molt complex.

Per exemple estan molt adaptats a un medi càrstic o fracturat, on els traçadors permeten veure la connectivitat de certs punts de la superfície amb les captacions d'aigua.

Existeixen diferents tipus d'assaig de traçadors artificials (Vernoux et al. 2007a):

- Traçadors en flux natural. S'injecta una quantitat de traçador que no altera el flux natural. S'observa la concentració del traçador en diferents punts aigües avall, sense que hi hagi un bombeig.
- Traçador convergent. S'injecta un volum petit de traçador en un punt del aquífer i s'observa la recuperació en un pou de bombeig.
- Traçador per recirculació. S'injecta el traçador amb un cabal constant en un punt del sistema i en el pou de bombeig es recupera. Els dos cabals són semblants.
- Traçadors divergents. S'injecta en un pou amb un cabal considerable, amb l'objectiu de crear un escolament subterrani divergent, i es segueix analíticament en diferents piezòmetres de la perifèria del punt d'injecció.

A més a més estan els traçadors naturals (els radioactius inclosos), és a dir, el seguiment de partícules ja presents a l'aigua del sistema. Aquests donen informació sobre els orígens de l'aigua, per exemple en els sistemes complexos on hi ha intercanvis entre aquífers de diferent quimisme o entre aigües superficials i subterrànies.

2.2.6 Delimitació de la zona de recàrrega

Ja s'ha comentat que els mètodes es centren en la delimitació de la porció d'aquífer que alimenta la captació, que és una delimitació purament subterrània. En canvi la noció de zona d'alimentació (allà on es produeix la recàrrega de l'esmentada porció) està situada en la superfície del terreny.

La situació més simple és quan l'aquífer captat és lliure sense cap altra alimentació que l'infiltració d'aigua al sòl i sense cap aquífer per sobre i per tant la zona d'alimentació serà la simple projecció en superfície de la porció d'aquífer que alimenta la captació.

En el cas d'un aqüífer captiu, que està cobert en gran part per una capa molt impermeable, la zona d'alimentació s'haurà de buscar en aquelles zones on aquesta capa desapareix i on hi té lloc la recàrrega del aqüífer.

Finalment hi ha el cas d'un aqüífer que és lliure però que no és el primer, és a dir, que per sobre seu hi ha un altre aqüífer més superficial (Fig. 6). Si existeix un drenatge del aqüífer superior per part del inferior, la projecció en superfície de la delimitació subterrània serà vàlida. Per contra, si no hi ha drenatge entre els dos aqüífer, la zona d'alimentació seran les zones on les aigües d'infiltració van a l'aqüífer captat i no pas a l'altre, sempre dins de la porció d'aqüífer que alimenta la captació.

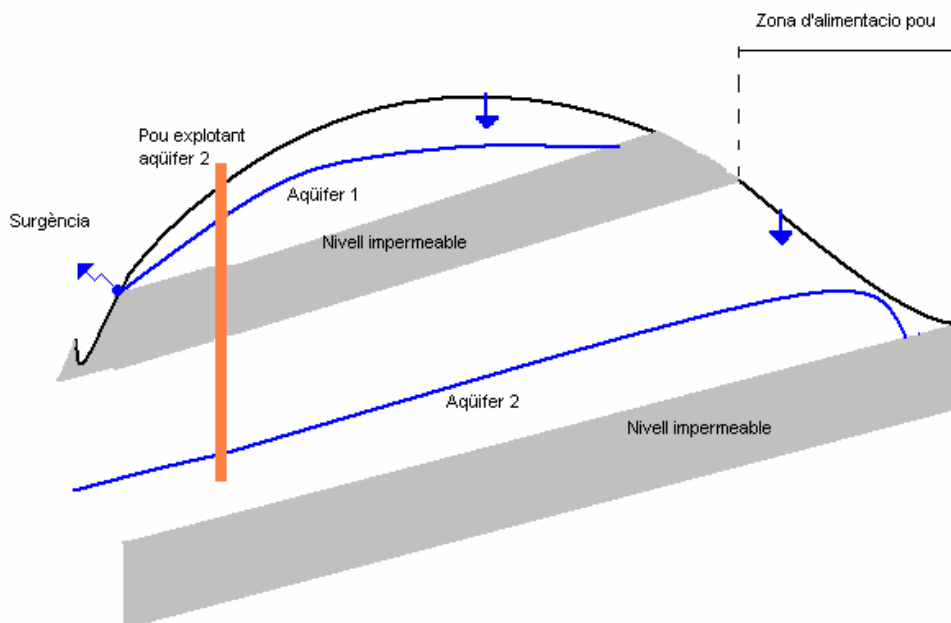


Figura 6 : esquema de la zona d'alimentació en un contexte amb dos aqüífers superposats.

En els casos on un curs d'aigua participa en l'alimentació del aqüífer es podrà prendre la seua conca hidrogràfica a aquest nivell dins de la zona d'alimentació o no, depenent del medi aqüífer en qüestió i de la mida de la conca. De la mateixa manera s'hauran de treure de la zona d'alimentació les parcel·les que tenen drenatge agrícola i que eviten que les aigües s'infiltrin dins del aqüífer. També s'han de considerar les influències d'altres bombejos.

3. Tipologies de medis aquífers

En aquest apartat es farà un resum dels tres grans tipus de medis aquífers que s'han considerat en aquest treball, els medis porosos continus, els carsts i els aquífers fracturats.

3.1 Medi amb porositat intersticial

Un aquífer amb porositat d'interstícies és definit com un medi permeable amb els porus connectats. Es pot tractar d'un medi constituït per sediments no cimentats de diferents granulometries, tals com sorres o graves, amb la presència de materials argilosos i limonosos o fins i tot un gres poc cimentat.

Un aquífer d'aquest tipus es considera continu per oposició al discontinu. La seua porositat ha d'estar connectada en el sentit de circulació de l'escolament subterrani. La porositat eficaç en el cas d'aquífer lliure pot variar entre 5 i 35% i es determina a partir d'un assaig de bombeig. Les velocitats de trànsit de l'aigua en aquest medi són de l'ordre de centímetres a metres per dia. El temps d'inèrcia és molt important, les respostes del sistema a fenòmens plujosos poden ser de l'ordre semestral o anual (Vernoux et al. 2007a).

3.2 Medi càrstic

El carst és una forma de modelat terrestre causat per l'aigua a través de processos d'erosió per meteorització química, és propi de zones amb presència de roques calcàries o d'altres roques solubles carbonatades. Presenta formacions característiques de la corrosió superficial com els rasclers i les dolines, o subterrània com els avencs i les coves, i el sistema de drenatge és fonamentalment subterrani (Viquipèdia octubre 2007). Totes aquestes cavitats subterrànies constitueixen un medi que pot emmagatzemar aigua, formant el que es coneix com aquífer càrstic (Fig. 7).

En un aquífer càrstic es troben dos zones en vertical, de dalt cap avall:

- La **zona d'infiltració**: part no saturada de l'aquífer, que assegura un flux de l'aigua a través del massís, presentant sovint un escolament horitzontal a nivell del epikarst, que és la part més somera del sistema, d'alguns metres d'espessor, que juga el rol de magatzem temporal de l'aigua.
- La **zona mullada**: es desenvolupa sota el epikarst i no té perquè estendre's per tot el massís calcari. En ella hi distingim dos zones, una composta per la xarxa càrstica que actua de drenatge i on s'hi concentren els escolaments. Una segona part està formada per blocs poc permeables que encaixen els drenatges, amb circulació de l'aigua lenta.

L'alimentació dels sistemes càrstics pot tenir lloc de dues maneres. Una és via pèrdues localitzades en superfície, on les aigües superficials que convergeixen cap aquests punts entren dins el sistema subterrani. L'altra és difusa per infiltració de les aigües de pluja sobre tota la superfície (Pételet-Giraud et al. 2000).

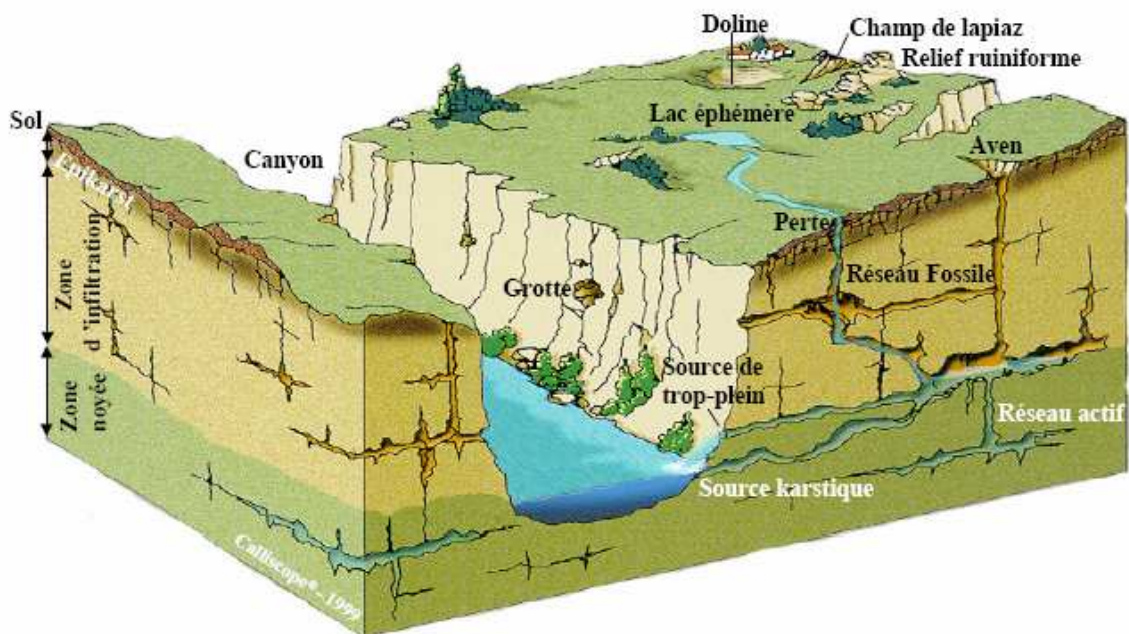


Figura 7 : esquema d'un sistema càrstic (AERMC 1999).

En carstologia es parla sovint de caràcter binari o unitari i de la funcionalitat del sistema. A continuació es definiran en detall aquests termes (Vernoux et al. 2007a):

- Carst binari. És aquell sistema on es pot distingir una doble alimentació, una a través la cobertura geològica del carst (difusa) i una altra mitjançant els diferents punts d'infiltració localitzada que reben aigües d'escolament de superfície (Fig. 8).
- Carst unitari. És el sistema on la totalitat de l'alimentació té lloc de manera difusa (Fig. 8).
- Funcionalitat. Aquest terme es refereix al comportament hidrodinàmic del sistema. Es parlarà de funcionalitat quan el sistema presenta temps de resposta molt ràpids entre les pluges i els cabals a la sortida, velocitats de circulació de l'aigua molt grans, amb un efecte memòria inferior a 20 dies. Un sistema no serà funcional quan la resposta a un esdeveniment plujós és molt retardada en el temps.

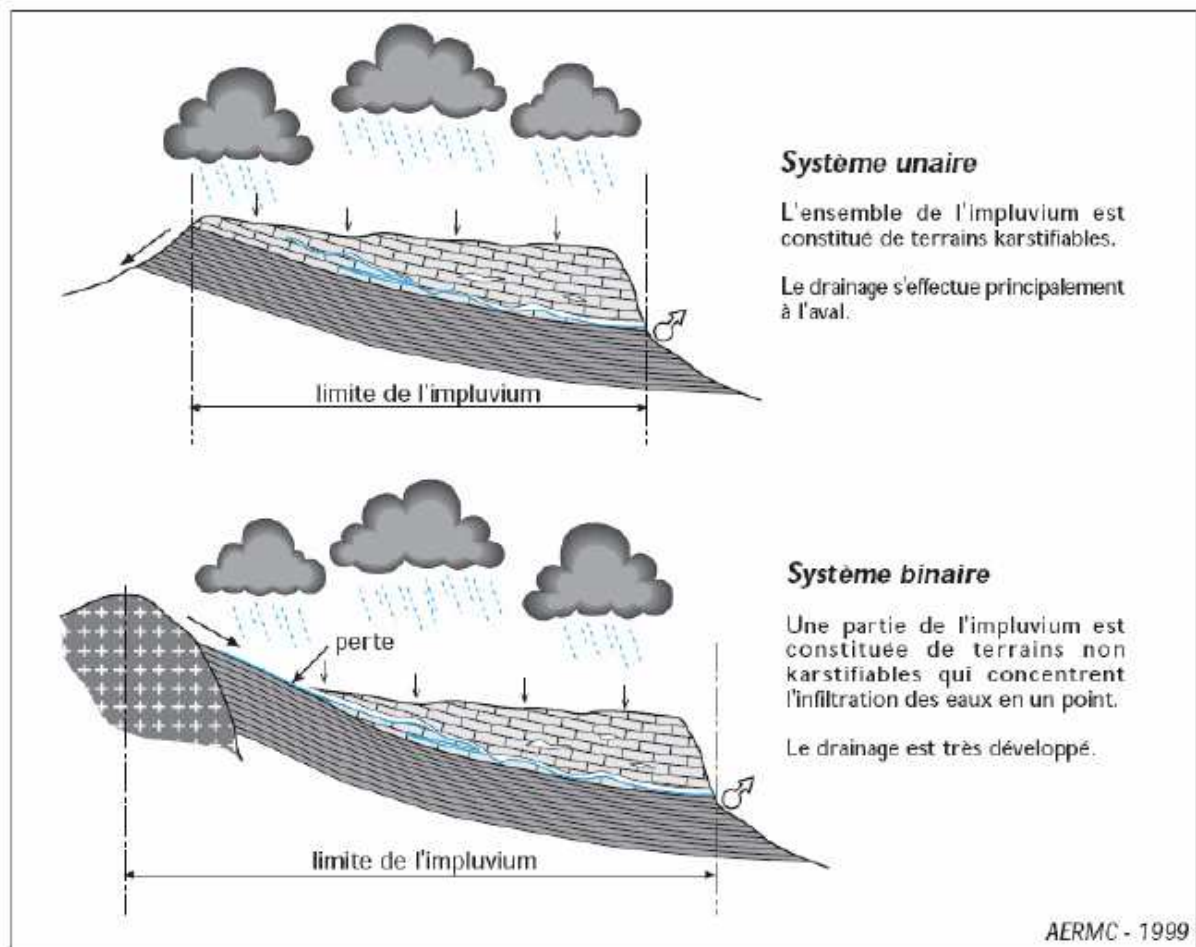


Figura 8 : esquema d'un sistema càrstic unari i binari. En un sistema unari (esquema superior) la totalitat de la recàrrega al sistema prové de la pluja que s'infiltra directament sobre el carst. En un sistema binari (esquema inferior) hi ha una part de la recàrrega que prové de les aigües d'escorriment que entren al carst a través d'una pèrdua (*perle*) (AERMC 1999; extret de Vernoux et al. 2007a).

Per determinar el caràcter binari o unari d'un sistema càrstic es recorre a diferents anàlisis i observacions de camp. Entre ells estan els anàlisis hidroquímics de traçadors naturals que proven que una part d'aigua ve d'un curs fluvial. A més a més estan les observacions de punts en superfície que suposen punts d'infiltració local. En aquests punts, si és viable, s'han de fer assajos de traçadors per tal de comprovar-ne la connectivitat amb les captacions estudiades. Aquests assajos donaran una idea de la significativitat d'aquesta alimentació puntual.

La funcionalitat d'un sistema càrstic sol mesurar-se amb la correlació d'un senyal d'entrada en el sistema (pluja, cabal) amb un senyal d'eixida (cabal de la surgència, terbolesa, alguna concentració d'un ió). La mesura ha de ser diària com a màxim.

Un cas concret, la creta

Una gran part de la conca Sena-Normandia està coberta per la creta. Aquesta roca carbonatada presenta doble o triple porositat. Una porositat primària, d'intersticis. Una segona de fissures i localment, si hi ha tingut lloc carstificació, una tercera de càrstica. Aquesta formació constitueix un aqüífer molt capaç i una de les majors fonts d'aigua potable de la regió (Equilbey 2003).

En funció del grau de carstificació els aqüífers presents en aquesta formació geològica poden ser tractats com càrstics, com fracturats o com continus. La fracturació, quasi sempre present, pot afavorir la circulació d'aigua en el sistema i de retruc la carstificació. Quan la roca està carstificada, una xarxa de conductes verticals i horitzontals prenen forma permetent el trànsit ràpid de l'aigua d'infiltració, que entra al sistema gràcies als *bétoires*. Els *bétoires* és el terme local normand per definir l'orifici natural que travessa el sòl i comunica la superfície amb la roca aqüífer (Equilbey 2003). Són punts d'infiltració ràpida i directa de les aigües de superfície en el sistema. En el cas de la presència de *bétoires* la descripció d'un medi càrstic descrita anteriorment serveix perfectament per aquest medi.

La creta pot aflorar directament o pot estar sota una cobertora. Si està sota cobertora distingim dos tipus de formacions (Vernoux et al. 2007b; Equilbey 2003):

- Les que són molt permeables, que aporten una recàrrega difusa i homogènia sobre tota la roca i que tendeixen a preservar les fractures i no es presenten signes de carstificació.
- En canvi, si la cobertora és poc permeable, l'alimentació del sistema tendeix a ser per punts d'infiltració preferencial.

4.3 Medi fracturat

Els aqüífers de tipus fracturat comprenen els aqüífers de sòcol, compostats per roques cristal·lines tant d'origen metamòrfic (pissarres, gneiss) com d'origen plutònic (granits). També hi ha dins d'aquest grup els aqüífers desenvolupats en roques sedimentàries fracturades, com un gres o una calcària fracturats. En el cas de les roques carbonatades només s'hi contempla quan hi ha fracturació i no pas carstificació (Vernoux et al. 2007b).

En aquest tipus d'aqüífers l'escolament subterrani es produeix en gran majoria a través de qualsevol tipus de discontinuïtat: les fractures, diàclasis, falles o contactes estratigràfics. Un model conceptual pot ser el següent (Pochon i Zwahlem 2003):

- Una xarxa de discontinuïtats principals que tenen una permeabilitat molt elevada, són la zona on es concentra l'escolament subterrani, drenant cap a la sortida del sistema.

- La resta de massís rocós es pot considerar relativament homogeni, amb porositat d'intersticis o de fissures, i actua com zona d'emmagatzemament d'aigua. La seua permeabilitat és més feble.
- La recàrrega del sistema té lloc tant a través de les discontinuïtats que afloren en superfície com a través del propi massís rocós.
- Aquest caràcter binari dóna que l'aigua captada sigui una barreja d'aigua que ha tingut dos temps de trànsit pel sistema ben diferents. Una aigua ha circulat via les grans fractures, estant poc temps dins del sistema que la podríem definir com *aigua jove*. Una segona aigua ha restat molt més temps dins del sistema ja que ha estat emmagatzemada en els porus o a les fissures del massís fins ésser drenada per la xarxa de grans fractures. Seria una *aigua vella*.

4. Mètodes d'avaluació de vulnerabilitat i protecció de captacions d'aigua potable

En aquest apartat es presentaran diferents mètodes i estudis ja existents per avaluar la vulnerabilitat de les aigües subterrànies i protegir el conjunt de la zona d'alimentació de les captacions d'aigua potable. No es tracta en cap moment d'un recull de totes les metodologies existents, que són molt nombroses, sinó d'explicar aquelles que han estat en major o en menor mesura importants en els resultats d'aquest treball.

Els perímetres de protecció que la llei francesa ja preveu al voltant de les captacions d'aigua potable (Lallemand-Barrès et al. 1989), així com els que preveu la llei espanyola (ITGE 1990), no s'explicaran a continuació. Cal dir que aquests perímetres tenen com funció major el protegir els pous de polucions accidentals i puntuals i no pas el protegir de contaminants difusos el conjunt de la zona d'alimentació.

4.1 Dimensionament de zones de protecció de pous a Suïssa

Bussard (2005) de la Universitat de Lausanne es plantejava en la seua tesi uns objectius similars als d'aquest treball, l'establiment d'un mètode per caracteritzar les zones d'alimentació d'una captació d'aigua potable i la possibilitat de jerarquitzar en quines zones l'alimentació és més significativa.

L'esquema que es proposa és el següent (Bussard 2005):

1. Definir la part d'aquífer que alimenta la captació.
2. A partir d'aquesta delimitació subterrània, trobar-ne la zona d'alimentació en superfície.
3. Quantificar els processos de recàrrega i d'exportació sobre la zona d'alimentació.
4. Calcular la contribució a l'alimentació en aigua de la captació en qualsevol punt i de la zona (C_i).

$$C_i = I_i(1-e_i)P_i \quad [\text{m/s}] \quad (9)$$

I_i : infiltració eficaç de les precipitacions o infiltració d'un curs d'aigua al punt i [m/s].

e_i : coeficient de les exportacions d'aigua abans que arribi a l'aquífer explotat, variant entre 0 i 1.

P_i : probabilitat de que una partícula d'aigua arribi a la captació, variant també entre 0 i 1.

5. Establir un balanç hídric i químic per tal de comprobar els resultats obtinguts. En cas negatiu cal revisar el procés des del començament.
6. Dimensionar les zones de protecció. Els sectors amb un C_i més elevat correspondran a les zones prioritàries.

Pel que fa a la delimitació de la porció d'aquífer que alimenta la captació, el que proposa Bussard és la delimitació d'un camp de probabilitats de que les partícules arriben a la captació, com ha estat explicat en l'apartat 2.2.4. En alguns casos només es podrà arribar a delimitar un camp binari, és a dir, una part on l'aigua segur que hi arriba ($P=1$) i una altra on no hi arribarà ($P=0$). En altres casos, amb els resultats d'algunes modelitzacions numèriques, el camp de probabilitats pot deixar de ser binari.

Per fer la delimitació de la zona d'alimentació, es pren la projecció en superfície de la porció d'aquífer que alimenta la captació. A més a més caldrà afegir les alimentacions del sistema per part de rius i per zones de regadiu que impliquen una recàrrega artificial. També caldrà tenir en compte les exportacions: les parcel·les que tenen un drenatge agrícola, els cursos d'aigua que drenen l'aquífer i les zones que alimenten captacions secundàries. Un esquema de tot plegat està disponible en l'esquema 1 de la figura 9.

La recàrrega de l'aquífer és la part de l'aigua infiltrada sobre el sòl que acabarà arribant a la zona saturada. Ella dependrà de les dades meteorològiques de pluja i d'evapotranspiració, de la reserva útil del sòl, i per tant de la pedologia. Sovint amb aquest paràmetre no es podrà arribar a trobar una espacialització i es prendrà homogeni sobre tota la zona d'estudi. Una altra font de recàrrega són les infiltracions dels cursos d'aigua. Ambdues infiltracions s'avaluen com una velocitat, és a dir, en m/s. Aquest paràmetre s'anomena I .

Un altre paràmetre que es considera són les zones d'exportació. Les zones d'exportació corresponen la majoria de vegades al drenatge agrícola. Es tracta de certes parcel·les agrícoles que evacuen l'aigua que s'ha infiltrat i que no ha estat emprada per les plantes, evitant d'aquesta manera que aquesta aigua arribi al nivell aquífer explotat. Altres zones d'exportació poden ser petits aquífers somers o capes impermeables que poden reduir l'infiltració cap a l'aquífer captat. El paràmetre exportació (e) s'avalua entre 0 i 1.

El càlcul de les zones contributives en resulta de l'aplicació de la fórmula (8) que considera els paràmetres I (recàrrega), e (exportacions) i P (camp de probabilitats). Un exemple de l'aplicació està en el segon esquema de la figura 9.

Bussard proposa agrupar els diferents resultats de contribució en cèl·lules d'un valor homogeni. El producte d'aquestes zones per la seua superfície dona directament el cabal que proporciona aquesta cèl·lula al total del cabal explotat per la captació. El cabal total és el sumatori del cabal proporcionat per cadascuna de les cèl·lules (9).

$$Q_{\text{capture}} = \sum C_i S_i \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (10)$$

on S_i és la superfície en m^2 de la cèl·lula i .

En el exemple del tercer esquema de la figura 9 es proposa com a zona a protegir el conjunt de cèl·lules que suposen un 90% de l'alimentació de les captacions. En total aquesta zona a protegir és només el 65% de la superfície de la zona d'alimentació establerta inicialment.

La comprovació dels resultats es basa en la comparació del cabal obtingut amb el que s'explota en realitat. Eventualment es pot fer un balanç químic. Si el resultat és negatiu el que es proposa és repetir els passos anteriors millorant les dades utilitzades, com per exemple una caracterització més precisa dels sòls.

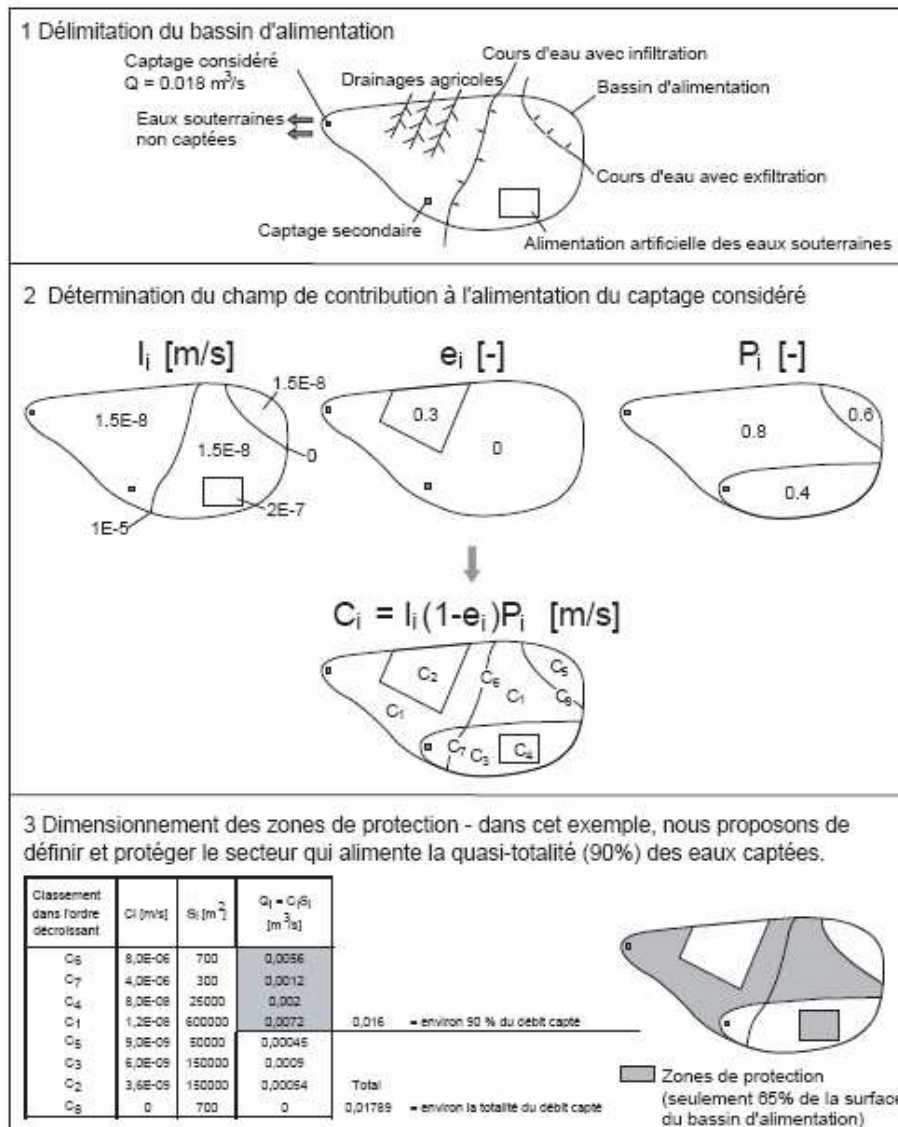


Figura 9 : esquema resum de la metodologia proposada per Bussard (2005).

Discussió crítica de la metodologia proposada per Bussard (2005)

Un dels problemes que presenta aquesta metodologia és que certs paràmetres difícilment es poden espacialitzar sobre el terreny. En el cas francès la densitat de les dades de pluja i d'evapotranspiració (ETP) no arriba a ser suficient en la majoria de casos com per trobar diferències dels valors sobre la zona d'estudi. Després aquesta metodologia es basa en una coneixença molt precisa de la pedologia del terreny, que no serà sempre possible d'obtenir a un preu assequible per les col·lectivitats locals. A més a més el camp de probabilitats de que una molécula arribe a la captació no sembla massa evident d'obtenir.

4.2 Mètodes d'avaluació de la vulnerabilitat de les aigües subterrànies

Abans d'entrar en l'exposició dels diferents mètodes d'avaluació de la vulnerabilitat de les aigües subterrànies, cal definir el terme vulnerabilitat en aquest context. Margat (1977) diu que és *la manca de protecció natural de les aigües subterrànies en funció de les condicions hidrogeològiques locals*. Aquesta definició per tant es centra en la possibilitat que una partícula d'aigua situada en superfície arribe al aqüífer.

Cal distingir entre dos tipus de vulnerabilitat: l'intrínseca, en la qual no intervé en cap moment la natura del contaminant, i l'específica, on intervé la natura d'un contaminant en concret. La vulnerabilitat és independent en el temps, és a dir, les condicions entre la superfície i la zona saturada no canvien (Vernoux et al. 2007a).

Existeixen molts mètodes d'avaluació de la vulnerabilitat de les aigües subterrànies; a continuació se'n resumeixen alguns que han estat d'especial importància en la proposició del mètode d'aquest treball.

4.2.1 Mètode DRASTIC

El mètode DRASTIC de cartografia de vulnerabilitat d'aqüífers va estar desenvolupat als EUA per l'EPA (*Environmental Protection Agency*) l'any 1987. Es fonamenta en tres hipòtesis de base (Vernoux et al. 2007):

- i. Els possibles contaminants es troben sempre en superfície.
- ii. Els contaminants arriben a la zona saturada pel mecanisme de l'infiltració eficaç.
- iii. La natura dels contaminants potencials no està considerada.

Els paràmetres que considera en són set i la seua inicial en anglès dóna nom al mètode: *Depth to water* (profunditat de la superfície piezomètrica), *net Recharge* (pluja eficaç), *Aquifer media* (medi aqüífer), *Soil media* (tipus de sol), *Topography*

(pendent), *Impact of vadose zone* (Impacte de la zona no saturada) i *hydraulic Conductivity* (permeabilitat del medi).

A cada paràmetre se li assigna un valor entre 0 i 10, corresponent el valor més alt a la major sensibilitat possible. Després cadascun dels paràmetres té un pes assignat i la vulnerabilitat final resulta de la suma ponderada dels 7 paràmetres (11).

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=7} (W_j * P_j) \quad (11)$$

On D_i és la vulnerabilitat de la unitat cartogràfica i , W_j és el pes del paràmetre j i P_j és el valor del paràmetre j a la unitat cartogràfica i .

Existeixen dos distribucions dels pesos dels paràmetres, una seria per a avaluar una vulnerabilitat amb una ocupació del sòl normal i una altra per a zones amb una activitat agrícola intensa, més adaptada per al cas dels pesticides. El conjunt dels pesos i les classes de tots els paràmetres està disponible a l'annexe I.

Derivat del mètode DRASTIC hi hauria el mètode SINTACS, desenvolupat a Itàlia a començament dels anys 90. Els paràmetres són els mateixos que per al mètode nordamericà, de manera que la seua traducció al italià dona el nou acrònim. El que canvia respecte DRASTIC és que els intervals dels diferents paràmetres i els pesos poden variar en funció de la situació (Vernoux et al. 2007a).

4.2.2 Mètode DISCO

El mètode DISCO està específicament pensat per a medis fracturats molt heterogenis. Ha estat creat a Suïssa per tal de definir els perímetres de proteccions de les captacions d'aigua potable en aquests medis (Vernoux et al. 2007a).

Només s'empra en els casos en que les heterogeneïtats són molt importants i quan s'observa una circulació de l'aigua dins del sistema molt ràpida (Pochon i Zwhalen 2003).

Es prenen en compte tres paràmetres (Pochon i Zwhalen 2003; Vernoux et al. 2007a):

- Discontinuitats: caracteritza el trànsit de l'aigua dins del aquífer fracturat i la connectivitat entre les zones d'infiltració i la captació.
- Cobertura protectora: pren en compte el caràcter infiltrant del sòl i de la formació geològica de la zona no saturada.
- Escorriment: pren en compte els fenòmens que tenen lloc a la superfície abans de l'infiltració.

De la combinació dels dos primers paràmetres el mètode ja n'extrau una vulnerabilitat. El tercer paràmetre considera l'extensió quan hi ha aigües d'escorriment que convergeixen en els punts d'infiltració.

El conjunt de taules i esquemes d'aquest mètode estan disponibles a l'annex I.

4.2.3 Mètode RISKE

Aquest mètode cartografia la vulnerabilitat en medis càrstics, interessant-se només a la major o menor facilitat en que un contaminant arribarà a l'aqüífer. La circulació dins de la zona mullada no es pren en compte.

Els paràmetres del mètode són els següents: Roca aquífer, Infiltració, Sòl, Carstificació i Epicarst. Cadascun està indexat entre 0 i 4, corresponent el 4 per a la major sensibilitat. Cada paràmetre té assignat un pes entre 0 i 1 i el resultat final n'és la suma ponderada, tal com ja es feia en el mètode DRASTIC (Dörfli et al. 2004).

- Roca. Caracteritza la roca que constitueix l'aqüífer, tant per la natura com per la fracturació. Les roques que no formen l'aqüífer no estan dins d'aquest criteri.
- Infiltració. Aquest paràmetre s'interessa a la pendent com factor que intervé decididament en l'infiltració. Així les zones de fort pendent tindran una feble infiltració i per tant seran poc sensibles i viceversa. Menció a banda mereixen les conques topogràfiques dels punts d'infiltració localitzada existents en medis càrstics (avencs, pèrdues). Qualsevol contaminant situat sobre les conques hidrogràfiques d'aquests punts pot arribar molt ràpidament a l'aqüífer. El conjunt de la conca serà indexat molt sensible.
- Sòl. Es caracteritza el caràcter més o menys infiltrant del sòl (més sorrenc o argilenc), el seu espessor, així com si està situat sobre una capa geològica més o menys permeable.
- Carstificació. Indica el grau de carstificació del sistema. És un criteri prou difícil d'avaluar i encara més de cartografiar. Els criteris emprats són els mateixos emprats per establir el caràcter unitari o binari del sistema així com la seua funcionalitat.
- Epicarst. L'epicarst és una capa sub-superficial de la formació carbonatada. Després dels períodes de pluja pot jugar el rol de reservori i a priori es considera la seua presència com protectora perquè retarda la circulació de l'aigua.

Una versió modificada del mètode agrupa l'epicarst i el sòl en un sol paràmetre anomenat *Protecció*. El que es fa es prendre el més protector dels dos paràmetres.

4.2.4 Mètode IDPR

Sobre algunes zones de l'estat francès, el BRGM ha efectuat una cartografia de la vulnerabilitat dels principals sistemes aquífers a escala regional (Corbier et al. 2003; Mardhel i Gravier 2005). Aquesta cartografia ha estat realitzada basant-se en dos paràmetres:

- IDPR. *Index de Développement et Persistance des Réseaux* (Índex de Desenvolupament i Persistència de la Xarxa hidrogràfica). Aquest índex tendeix a resumir el caràcter de les formacions geològiques de la zona no saturada en relació a la primera capa freàtica.
- Espessor de la zona no saturada, fruit de la diferència entre les cotes topogràfiques donades pel MDT (Model Digital del Terreny) i els nivells piezomètrics regionals.

L'idea del IDPR prové del fet que l'organització de la xarxa hidrogràfica depèn de les formacions geològiques que la sostenen (Mardhel i Gravier 2005).

En la hipòtesi d'un medi homogeni, és a dir, amb la mateixa litologia, només el pendent i la morfologia dels relleus condicionen la distribució dels cursos d'aigua. No obstant, les formacions geològiques, la pedologia i la cobertura vegetal juguen un rol important en l'establiment de la xarxa. Aquests paràmetres influeixen en la permeabilitat i la rugositat de la superfície, per tant en la velocitat de l'escolament superficial i en l'infiltració (Corbier et al. 2003).

La densitat de la xarxa hidrogràfica serà aleshores un indicador del caràcter infiltrant de les formacions geològiques. En una conca formada per materials molt permeables la densitat de la xarxa serà feble i al contrari en un medi impermeable (Corbier et al. 2003; Mardhel i Gravier 2005).

L'IDPR el que fa és comparar una xarxa hidrogràfica teòrica amb la xarxa natural observada en realitat. La xarxa teòrica s'obté a partir del MDT i considera que tot el medi és homogeni sense heterogeneïtats de les formacions geològiques. La xarxa natural es basa en la cartografia de l'IGN (Institut Geogràfic Nacional de França) (Corbier et al. 2003).

El càlcul de l'IDPR consisteix en un quocient entre la distància d'un punt al curs d'aigua real més proper i la distància al curs d'aigua teòric més proper. L'índex varia entre 0 i 2000 (els valors majors a 2000 són transformats a 2000). Quan l'IDPR és inferior a 1000, la xarxa real és menys densa que la xarxa teòrica, la qual cosa significa que el terreny és més aviat infiltrant. Del contrari, si l'IDPR és superior a 1000, la xarxa real és més densa que la teòrica calculada amb el MDT i aleshores els terreny tendeixen a ser poc infiltrants (Corbier et al. 2003; Vernoux et al. 2007a).

L'IDPR està disponible en format raster sobre tot l'estat francès. Com que l'IDPR surt d'un càlcul a partir del MDT, la mida del pixel és la mateixa que el MDT francès, és a dir, 25 metres (Vernoux et al. 2007b). En altres països d'Europa també ha estat calculat però en l'actualitat es troba en una fase de test.

Una de les modificacions que es sol fer sobre el IDPR és fer-ne una estadística espacial sobre els polígons de les diferents formacions geològiques i associar a cada polígon un valor mitjà de l'índex, filtrant-se d'aquesta manera possibles errors puntuals en un sol pixel (Corbier et al. 2003; Vernoux et al. 2007b).

La cartografia de la vulnerabilitat emprant l'IDPR i la profunditat del nivell es fa d'una manera semblant als mètodes DRASTIC o RISKE, és a dir, amb una suma ponderada. Els pesos assignats a cada paràmetre no són fixos però es sol treballar amb 0,5 per a cadascun (Corbier et al. 2003; Vernoux et al. 2007a).

5. Descripció de la metodologia proposada

La metodologia que es proposa i que s'ha provat en aquest treball es divideix en tres fases:

1. Identificació de la tipologia d'aquífer: medi continu, càrstic o fracturat.
2. Delimitació de la zona d'alimentació de la captació en la superfície del terreny. Aquesta està dividida en dos fases, la primera és la delimitació de la porció d'aquífer que alimenta les captacions i la segona en la zona d'alimentació o de recàrrega.
3. Cartografia de la vulnerabilitat. Identificar a l'interior de la zona d'alimentació les zones les més vulnerables.

L'estudi geològic i hidrogeològic de la zona és determinant ja que d'ell en dependrà l'elecció del tipus de medi i la delimitació de la zona d'alimentació.

La següent taula resumeix el procés establert per la metodologia:

Fase 1: Determinació de la tipologia d'aquífer	Continu	Càrstic	Fracturat
	Roques sedimentàries, socle alterat, medi assimilable a continu	Roques carbonatades, medi molt heterogeni amb circulacions de l'aigua molt ràpides. Xarxa de drenatges dins la roca.	Roques plutòniques, volcàniques, metamòrfiques o sedimentàries fracturades. Medi molt heterogeni amb circulació molt ràpida.
Fase 2A: Determinació de la porció d'aquífer que alimenta la captació			
	Continu	Càrstic	Fracturat
	Mapa piezomètric, càlculs analítics o numèrics, balanç hidrològic.	Assajos de traçadors, mètodes estructurals, inventari de fenòmens càrstics, balanç hidrològic.	Assajos de traçadors, mapes piezomètrics, mètodes estructurals, balanç hidrològic.
Fase 2B: Delimitació de la zona d'alimentació de la captació			
Extensió: cursos d'aigua que alimenten la captació.			
Exportació: drenatges agrícoles que drenen cap altres zones, altres pous explotats en permanència, zones impermeables.			
Fase 3: Avaluació de la vulnerabilitat adequada per a cada tipus de medi			

Taula 1 : esquema a seguir en la metodologia proposada.

Pel que fa a l'avaluació de la vulnerabilitat proposada en els tres medis cal dir que es treballa sempre en vulnerabilitat intrínseca, sense tenir en compte la natura de cap contaminant. Els vectors de contaminació difusa com poden ser els nitrats o els

pesticides poden tenir comportaments molt diferents en la seua migració des del sòl fins la zona saturada. Els nitrats es caracteritzen per una forta mobilitat i en canvi els fitosanitaris tenen una mobilitat molt variable en funció del producte. A més a més estan els fenòmens de la desnitrificació en medi reductor, la degradació de fitosanitaris amb la presència de matèria orgànica, etc. Per tant no és possible determinar la vulnerabilitat prenent en compte el conjunt d'aquests comportaments. Considerar la natura del contaminant suposaria elaborar diferents mapes de vulnerabilitat, un específic per a cada contaminant. Per tant en la metodologia exposada, i per a tots tres medis, es suggereix un mètode de vulnerabilitat intrínseca sense considerar la natura dels contaminants (Vernoux et al. 2007b). No obstant, per als pesticides, que són un dels contaminants situats a l'origen d'aquest treball, es recomana l'ús dels criteris del projecte FOOTPRINT (<http://www.eu-footprint.org/>). Aquest projecte europeu, on hi ha participat activament el BRGM, donarà una eina a partir de 2008, que serà de domini públic i que permetrà avaluar el risc de contaminació de les aigües (tant subterrànies com superficials) per pesticides (Dubus 2007). Aleshores el que es proposa és afegir els criteris d'aquesta eina als criteris intrínsecs del aquífer explicats a continuació. Una explicació més detallada del projecte FOOTPRINT està a l'annexe I.

Un altre aspecte a comentar és l'ocupació del sòl. Aquesta no té per què ser intrínseca al sistema, ja que pot canviar al llarg del temps, com per exemple passar d'una zona de bosc a una de cultiu. De totes formes, una vegada obtinguts els resultats de l'avaluació de la vulnerabilitat, aquests es poden superposar amb un mapa d'ocupació del sòl a l'hora d'identificar les zones on prendre mesures, és a dir, aquelles on hi ha activitat agrícola o ramadera i coincideix amb zones de vulnerabilitat significativa. Les zones boscoses teòricament no tindran cap abocament de fertilitzants o de pesticides i per tant quedarien fora de les zones prioritàries.

Per altra banda, el que està en joc no és la vulnerabilitat de les aigües subterrànies d'una manera general, sinó les aigües explotades per la captació. Per tant la vulnerabilitat ha de considerar no només la circulació de l'aigua des del sòl fins l'aquífer, sinó també la circulació dins de l'aquífer (Vernoux et al. 2007b).

5.1 Discussió del medi

En l'apartat anterior s'han presentat els tres medis aquífers que s'han considerat en aquest treball. Ara, dins de la pròpia metodologia, s'explicaran els criteris que aquesta recomana per distingir-ne un de l'altre. En primer lloc el que s'aconsella és esbrinar si el medi en que es treballa és **continu o discontinu** (o fracturat o càrstic, sense entrar a distingir entre aquests dos).

Un primer pas cal fer-lo emprant els mapes geològics, hidrogeològics regionals, campanyes de geofísica, etc. que normalment seran les informacions més fàcilment a l'abast. En el cas de sediments d'origen al·luvial o qualsevol altra formació sedimentària no cimentada quasi immediatament es pot tractar com medi continu

porós, sense necessitat d'anar més lluny en la discussió (cas A a la figura 10) (Vernoux et ql. 2007b).

La variació dels diferents paràmetres del aquífer al llarg del temps serviran de criteris per a distingir entre un medi continu o discontinu. Si un sistema no presenta grans variacions del nivell piezomètric al llarg del any (de l'ordre de 2 o 3 metres), si les variacions en un sol dia del nivell no són molt significatives (centimètriques) i si el sistema té una gran inèrcia, és a dir, els cicles sec i humit són mensuals, es pot dir amb molta certesa que el medi és continu. A més a més es pot afegir com a criteri no observar variacions sobtades dels paràmetres fisicoquímics (Vernoux et al. 2007b). Per a calcular el temps de semi-decreixement, el BRGM disposa d'un petit programa matemàtic que calcula aquest temps. S'adjunta una explicació més detallada del funcionament de l'aplicació en l'Annex II. El temps de semi-decreixement és un temps característic de d'una crònica de nivells piezomètric on la tendència global és a disminuir. En funció d'aquest temps es pot posar un ordre de magnitud als cicles del nivell del sistema aquífer.

Algunes formacions geològiques que aparentment no són medis continus podrien entrar en el grup sota certes condicions. Per exemple les formacions carbonatades que presenten carstificació però de tipus no funcional, es poden considerar com a medi continu. Tota la xarxa de drenatges del sistema en aquestes condicions està dins de la zona saturada i presenta continuïtat hidràulica que ha de ser contrastada amb suficients mesures del nivell piezomètric. Les fluctuacions del nivell piezomètric no seran massa importants en aquests sistemes (Vernoux et al. 2007b).

Un altre exemple són alguns aquífers fracturats, que podran ésser considerats com continus en el cas en que certs paràmetres com el nivell piezomètric, la conductivitat elèctrica, etc. no presenten variacions massa significatives després d'un esdeveniment plujós. És el que de vegades es coneix com medi fracturat equivalent a continu (cas B a la figura 10).

Un cop discutits tots els casos que podran entrar dins de la metodologia de medi continu, es planteja una segona discussió entre un **medi càrstic** i un **medi fracturat**.

El **medi càrstic**, desenvolupat en formacions carbonatades, es caracteritza pel seu escolament subterrani condicionat per una estructura de grans buits que actuen de xarxa de drenatge. L'existència de contrastos molt forts de permeabilitat és la responsable de l'aparició de discontinuïtats hidràuliques, que fan que certes mesures en alguns piezòmetres no tenen res a veure amb d'altres (Vernoux et al. 2007a). Així no té massa sentit emprar els mapes piezomètrics perquè no donen una idea del sentit del escolament real. La llei de Darcy no és aplicable. Els medis que presenten aquestes característiques seran considerats com càrsticsgura (cas D a la figura 10).

Seràn considerats com a aquífers fracturats aquells que es troben en roques de sòcol o gres fracturats que no poden ésser tractats com continus. En el cas de roques carbonatades, només hi seràn dins d'aquest grup les que no estan ni dins del

medi continu ni dins de les carstificades. Seran medis caracteritzats també per una heterogeneïtat aparent, contrastada per la variació dels paràmetres, per la presència de zones d'infiltració preferencial i per la variació de les velocitats del flux (Vernoux et al. 2007b). De totes formes no es sol arribar a una situació com en un medi càrstic on les heterogeneïtats són tals que es parla de discontinuïtat hidràulica (cas C a la figura 10).

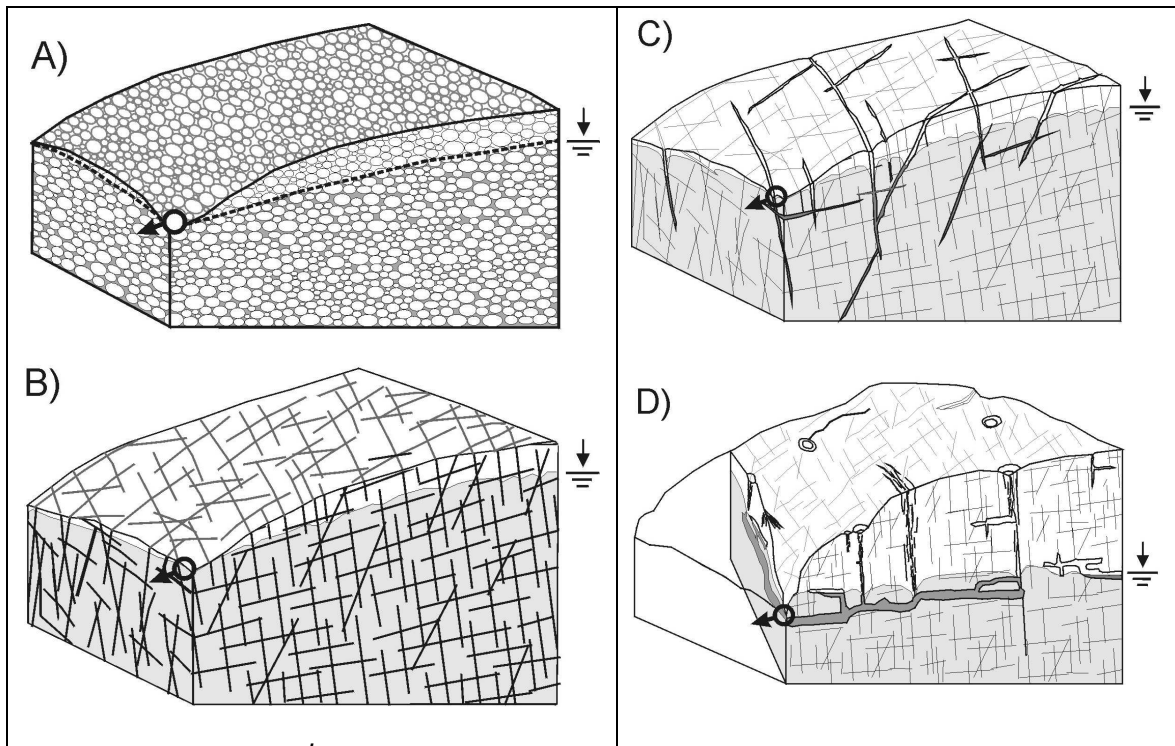


Figura 10 : esquema de quatre tipus d'aquífer cada vegada més heterogenis. A) Medi porós homogeni, B) medi fracturat feblement heterogeni, C) medi fracturat molt heterogeni i D) medi càrstic (de Pochon i Zwahlen 2003).

Tot seguit s'adjunta una taula on apareixen tota una sèrie de criteris a tenir en compte a l'hora de distingir entre els tres medis (Vernoux et al. 2007b). Aquesta taula no és més que una llista de tots els criteris que poden emprar-se per fer tombar la balança cap a un costat i cap a l'altre, amb alguns ordres de magnitud indicatius.

Metodologia de delimitació de la zona d'alimentació de captacions d'aigua potable i la seua vulnerabilitat enfront de contaminacions difuses

Formació	Roca sedimentària, sòcol alterat	Roca sedimentària i metamòrfica, sòcol	Roca carbonatada
Litologia	Sorra, grava, gres, sauló, creta, calcària	Calcària, gres, granit, esquist, gneiss, basalt, creta	Calcària, dolomia, creta, calcàries margoses
Estructura	Medi porós homogeni o fissurat homogeni	Medi heterogeni, presència de discontinuïtats delimitant blocs	Estructura càrstica, medi molt heterogeni, xarxa de drenatge subterrani
Geomorfologia	Absència de zones d'infiltració localitzada	Zones d'infiltració preferencial sobre les fractures, gran obertura de les discontinuïtats	Morfologia càrstica : dolines, avencs, pèrdues als rius
Mida de la conca subterrània	Variable	Generalment de mida petita, pocs km ² .	Variable, fins a centenars de km ² .
Cabal de producció	Mitjà a elevat, 30 a 200 m ³ /h	Feble < 5 m ³ /h	Pot ser molt elevat, > 1000 m ³ /h
Fluctuacions del cabal (en surgència)	Feble	Forta	Molt forta, resposta a la pluja
Temperatura	Constant	Variacions al llarg del cicle hidrològic	Variacions al llarg del cicle hidrològic
Conductivitat	Constant	Variacions al llarg del cicle hidrològic	Variacions al llarg del cicle hidrològic
Hidrogeoquímica	Constant	Variacions al llarg del cicle hidrològic	Variacions al llarg del cicle hidrològic
Terbolesa	Rar	Possible després de pluges	Possible després de pluges
Superfície piezomètrica	Relativament plana	Lligada a la topografia	/
Variació del nivell	Fluctuacions anuals de febles a mitjanes, cicles llargs (més d'un mes).	Fluctuacions anuals de febles a mitjanes	Variable en funció de la cavitat, no continuïtat hidràulica
Infiltració	Lenta, a través la capa de sòl	Mixta : ràpida a través les discontinuïtats i lenta fora	Mixta : molt ràpida a nivell dels avencs etc. i lenta i difusa a la resta de zones
Permeabilitat	Variable, però generalment inferior a 0,1 m/s	Mixta, forta a les discontinuïtats i feble a les altres parts	/
Porositat	D'intersticis, normalment entre 5 i 30%	Doble : d'intersticis i de fractura	Doble : d'intersticis i de cavitats. De vegades també de fissures
Velocitat de transport	Generalment feble < 1 m/d	Important, de 1 m/d a 1 m/h	Molt important, de 10 a 50 m/h, fins i tot 100 m/h
Temps de circulació de l'aigua al sistema	Augmenta globalment a mesura que ens allunyem de la captació	Ràpid, d'algunes hores a alguns dies	Molt ràpid, algunes hores
Assaig de traçadors	Dispersió del pic en un llarg període	Taxa de restitució elevada i dispersió feble en el temps	Taxa de restitució elevada i dispersió feble en temps
Temps d'estada de l'aigua al sistema	Pot ser molt gran, excepte en els al·luvions	Mescla d'aigües velles i noves	De manera general curt, en funció de la inèrcia del sistema (d'alguns dies a alguns mesos)
	Medi continu	Medi fracturat	Medi càrstic

Taula 2 : diferents criteris vàlids per a diferenciar entre els tres medis.

5.2 Mètode proposat per a un medi continu

Un cop decidit en quin medi està situada la captació, el següent pas és delimitar la zona d'alimentació i avaluar-ne la seua vulnerabilitat. A continuació s'explicarà detalladament la metodologia proposada per a cadascun dels tres medis, tot començant pel medi continu.

En els següents apartats s'entra molt més en detall en aquesta delimitació adaptada a cadascun dels medis així com en la determinació de la vulnerabilitat.

5.2.1 Delimitació de la zona d'alimentació

En l'apartat 2.2 s'han explicat d'una manera general, a tall de presentació, els diferents mètodes existents per delimitar la zona d'alimentació. A continuació s'explicaran les diferents formes que es proposen per fer-ho en un medi continu així com les diferents casuístiques que poden aparèixer.

Es considera que poden existir quatre tipus de sistemes dins dels medis continus o assimilables a continus (Vernoux et al. 2007b):

- 1) La captació és una surgència, és a dir, no hi ha un bombeig d'aigua dins de l'aqüífer sinó que l'aigua brolla de manera natural.
- 2) La coneixença del sistema demostra que l'escolament subterrani segueix una direcció preferencial sense diferències massa grans. No hi ha el drenatge de cap riu. A priori es pot assegurar que la porció d'aqüífer que alimenta la captació resta dins dels límits de la conca subterrània.
- 3) L'escolament dins del aqüífer no segueix una direcció principal, altres bombejos influencien aquest escolament, l'aqüífer drena un curs d'aigua. El sistema pot ser modelitzat per un aqüífer lliure d'una sola capa.
- 4) La modelització del flux dins del sistema necessita prendre en compte un sistema multicapa. Sistemes semicaptius o captius. Existeixen relacions complexes entre l'aqüífer i els cursos d'aigua.

Cas 1: la captació és una surgència

En aquest cas l'escolament dins del sistema no és alterat per cap bombeig, ell segueix els gradients naturals establerts per la piezometria. La porció d'aqüífer que alimenta la surgència coincideix amb la conca subterrània i es pot traçar amb un mètode gràfic basant-se en un mapa piezomètric adaptat a l'escala de treball. Posteriorment cal fer-ne l'extensió d'aquesta delimitació subterrània a la zona de recàrrega. Cal assegurar-se que la captació estigui protegida de les aigües d'escolament superficial ja que del contrari la conca topogràfica d'aquestes aigües ha d'estar integrada dins de la zona d'alimentació.

Els atlas hidrogeològics departamentals, que estan a una escala 1:100 000 sobre tot el territori francès, no haurien de ser utilitzats en els casos de zones d'alimentació de pocs km².

Es dona ben sovint el cas on la surgència brolla dins d'un pou que serveix de dipòsit i dins d'aquest pou es bombeja. S'ha de demostrar que l'escolament continua sent natural i no és alterat per aquest bombeig, és a dir, que el volum bombejat és inferior o igual al volum del pou més el volum subministrat per la surgència durant el temps de bombeig.

Cas 2: delimitació en un sistema simple amb una direcció preferencial d'escolament subterrani

En aquest cas les aigües segueixen una direcció preferencial d'escolament, sense grans diferències al llarg de l'any i sense el drenatge de cap curs d'aigua. En aquestes circumstàncies, la porció d'aqüífer que alimenta la captació es pot delimitar amb un mètode analític. Es recomana l'aplicació Excel que resol la solució analítica i que a la vegada fa un anàlisi estocàstic de l'incertesa de les variables emprades (transmissivitat i gradient). Aquesta aplicació permet aplicar un coeficient d'amplificació de la porció d'aqüífer que alimenta la captació per prendre en compte d'aquesta manera els efectes de la dispersió, tot i que la correlació entre aquest coeficient i els coeficients de dispersivitat no està clara encara. Cal assegurar-se que dins de la porció d'aqüífer no hi ha inclosos altres pous que siguin susceptibles d'influenciar l'escolament subterrani.

Cas 3: delimitació en un sistema d'una sola capa.

Dins d'aquesta aproximació, l'aqüífer pot ser representat per un sistema d'una sola capa, en aqüífer lliure. Les variacions laterals dels paràmetres són assumibles. Sobre el domini poden existir diferents pous que bombegen el sistema i n'alteren la piezometria. Les relacions entre l'aqüífer i el riu que no siguin massa complexes podran entrar en aquest cas.

El domini es podrà modelitzar amb un programa de modelització numèrica senzill, com ara ASMWIN (Chiang 1998), o bé amb un programa que treballa dins dels elements analítics, com ara Whaem (Kraemer et al. 2005).

Es treballarà sempre en règim permanent. Es calarà la piezometria amb les mesures piezomètriques més recents, tenint ben present si aquestes han estat preses en règim d'explotació o no.

En el cas d'intercanvis de l'aqüífer amb un curs d'aigua es podran considerar com simples línies de potencial imposat, que suposen que el cabal que l'aqüífer drena al riu és negligible amb comparació amb el cabal que circula pel riu (Vernoux et al. 2007b). Si es saben dades de la permeabilitat del llit del riu es podran incorporar aquestes dades en les simulacions. Que l'aqüífer dreni els cursos d'aigua no

significa necessàriament que l'aigua captada provingui d'allà. Caldrà verificar-ho amb traçadors geoquímics o per anàlisis isotòpics. L'incorporació o no de la conca hidrogràfica del curs fluvial a la zona d'alimentació en el cas en que aquest alimenta les captacions ha de discutir-se des de diferents punts de vista: significativitat (quantitat, variacions al llarg del any) i aplicabilitat de les mesures agroambientals posteriors (mida de la conca). En una conca hidrogràfica molt gran no tindria cap tipus de sentit avaluar la vulnerabilitat de les captacions i per tant s'ha d'acceptar tal com és la qualitat de l'aigua entrant en el sistema.

Cas 4: sistema multicapa.

Es tractarà dels casos d'una complexitat major que no hauran pogut ser tractats en els tres casos anteriors.

Les modelitzacions del sistema no poden ser resoltes amb un model d'una sola capa en un aqüífer lliure. Això pot ser degut a la vertadera existència de diferents nivells explotables, a zones captives, a un cabussament important de les capes, a relacions entre l'aqüífer i el riu que no poden ser resoltes amb una simple imposició de nivell, etc.

Els programes que permeten anar més lluny en les modelitzacions numèriques poden ser MARTHE (<http://www.brgm.fr/pdf/logiciels/Marthe.pdf>), desenvolupat pel BRGM, MODFLOW (<http://www.modflow.com/>) o TRANSIN que ha estat desenvolupat per l'Universitat Politècnica de Catalunya (<http://www.h2ogeo.upc.es/Docencia/curs%20VTe/GUIA%20VT.pdf>).

5.2.2 Avaluació de la vulnerabilitat per a un medi continu

La vulnerabilitat serà calculada per als tres medis aqüífers com la suma ponderada de diferents paràmetres (12).

$$D_i = \sum_{j=1}^{j=n} (W_j R_j) \quad (12)$$

On D_i és l'índex de vulnerabilitat global d'una unitat cartogràfica, W_j és el factor de ponderació o pes del paràmetre j , R_j és l'índex del paràmetre j i n és el nombre de paràmetres considerats que en el cas del mètode per a un medi continu en seran 5.

Aquesta manera d'operar és la mateixa que els mètodes de cartografia de la vulnerabilitat explicats en l'apartat 4 com RISKE o DRASTIC. Cada paràmetre serà indexat entre 0 i 4, corresponent el valor 4 a la major sensibilitat en el paràmetre en qüestió i el 0 correspondrà a la sensibilitat nul·la. El conjunt de pesos de tots els paràmetres sumarà 1 de manera que la vulnerabilitat final també variarà entre 4 i 0. Un valor de 4 serà la vulnerabilitat màxima i el 0 seria el cas d'una vulnerabilitat nul·la.

Els paràmetres escollits per a un medi continu estan inspirats i adaptats del mètode DRASTIC, explicat a l'apartat 3.2.1 d'aquest treball.

Els paràmetres considerats per a determinar la vulnerabilitat d'un medi continu són pluja eficaç (P), Sòl (S), IDPR, espessor de la zona no saturada (H) i permeabilitat de l'aqüífer (K).

- Pluja eficaç, P.

La pluja eficaç és la part de la pluja que és susceptible d'infiltrar-se en el sòl o de circular en superfície, és a dir, és la pluja total menys l'evapotranspiració real. Es calcula a partir de la pluviometria mitjana mensual, de l'evapotranspiració (ETP) i de la reserva fàcilment utilitzable del sòl (RFU). La seua discretització a escala d'una zona de pocs km² sembla difícil, especialment amb les dades de ETP i en certa mesura de la pluja. L'existència d'una cartografia de la RFU dels sòls sembla ser el factor que permetrà presentar una discretització de la pluja eficaç. En absència de dades sobre el conjunt de la zona es considerarà el valor de la estació meteorològica més propera com constant (Vernoux et al. 2007b).

Els intervals que es prenen per definir les classes han estat decidits en funció dels valors mitjans de pluja eficaç a França metropolitana (Vernoux et al. 2007c).

- Sòl, S.

Aquest paràmetre s'interessa a la cobertura pedològica i el seu comportament hidrodinàmic. La manera d'avaluar-lo és exactament la mateixa que hi ha al mètode RISKE de medis càrstics.

Les formacions pedològiques formen una cobertura protectora sobre les roques aquíferes. Per a la determinació del criteri S es consideren dos tipus d'informació: l'espessor del sòl i la seua natura i la presència d'un horitzó geològic protector entre el sòl i la roca aquífer.

Els paràmetres importants en termes de protecció, a més a més de l'espessor, són aquells que condicionen la velocitat d'infiltració, és a dir, el contingut en argila, sorra i llims i el contingut en pedres. Es defineixen tres classes de textures a partir d'estudis precedents (Desprats et al. 1998; Dörfliker 1996; Suais et al. 1990), dominància d'argila, dominància de sorra i dominància de llims. De la mateixa forma es defineixen tres classes del contingut en pedres: 0-15% de pedres, 15-60% de pedres i > 60% de pedres.

Un cop establertes les tres classes de textures i de contingut en pedres, amb la taula 3 es determina la natura del sòl. De la combinació de la natura del sòl i de l'espessor d'aquest en surt l'indexació final del paràmetre S. En la taula 4 la versió completa

d'aquesta conversió, on es diferencia entre els sòls situats sobre una capa geològica protectora (argiles, margues) i els que estan sobre una capa no protectora (al·luvions, col·luvions).

		Textura		
		1 (argila)	2 (l·lim)	3 (sorra)
% de contingut en pedres	1 (0-15%)	1	1	2
	2 (15-60%)	1	2	3
	3 (>60%)	2	3	3

Taula 3: taula de determinació de la natura del sòl en funció de la textura i del contingut en pedres. (Vernoux et al. 2007b).

Característiques				Característiques				Index
Sòl sobre matriu nua o sobre un horitzó geològic poc protector (al·luvions, col·luvions).				Sòl sobre un horitzó geològic important de feble permeabilitat (argiles, margues, roca massiva)				
Natura sòl desconeguda	Natura del sòl coneguda			Natura del sòl desconeguda	Natura del sòl coneguda			
	1	2	3		1	2	3	
	-	-	-	Cobertura protectora > 5 metres (amb sòl o sense)				0
Espessor >100 cm	Espessor > 100 cm	-	-	Cobertura protectora 1-5 m o > 1m amb un sòl de textura desconeguda o de tipus 1 > 20 cm				1
Espessor 20 – 100 cm	Espessor 20 – 100 cm	Espessor > 100 cm	-	Espessor 0 – 20 cm	Espessor 0 - 20 cm	Espessor 20 - 100 cm	-	2
Espessor 0 – 20 cm	Espessor 0 – 20 cm	Espessor 20 – 100 cm	Espessor > 100 cm	Absència de sòl	Absència de sòl	Espessor 20 – 100 cm	Espresso r 0 – 100 cm	3
Absència de sòl	Absència de sòl	Espessor 0 – 20 cm	Espessor 0 – 100 cm	-	-	-	-	4

Taula 4: resum dels índexs del paràmetre S en funció de la natura del sòl, de l'espessor i de l'horitzó geològic (Vernoux et al. 2007b).

La cartografia existent a nivell pedològic sobre el territori francès és a escala 1:250000, que està previst que abasti tot el territori tot i que a agost de 2007 només abarcava algunes regions (GISSOL, agost 2007), tot i que també existeixen certs mapes a escala més reduïda (1:50000 o 1:100000) que estan disponibles, a finals d'agost de 2007, sobre ben poques parts del territori (GISSOL, agost 2007). L'escala d'aquests mapes sembla poc adaptada a la que es demana en els estudis de

vulnerabilitat de la zona d'alimentació de la captació, essent doncs necessària una cartografia pedològica més precisa.

- IDPR

L'IDPR, com s'ha comentat en l'apartat 3.2.4, dona una idea del caràcter més o menys infiltrant de les roques que estan entre la superfície del terreny i el primer aqüífer. Els seus valors varien entre 0 i 2000, corresponent el 0 per als terrenys amb molta preponderància a l'infiltració i el 2000 pels terrenys amb dominància de l'escorriment. Des d'un punt de vista de la vulnerabilitat de les aigües subterrànies correspondrà l'IDPR igual a 0 a la pitjor situació.

Per tal d'indexar el paràmetre entre 0 i 4, es divideix l'IDPR en 5 classes que abasten intervals de 400.

S'ha d'anar en compte amb l'utilització de l'IDPR en el cas en que l'aqüífer explotat per la captació estudiada no sigui el primer que es troba en profunditat, havent-hi entre els dos una capa poc permeable. Si aquesta capa és molt impermeable i es consideren els dos aqüífers aïllats, la pròpia delimitació de la zona d'alimentació exclourà els afloraments que corresponen a zones d'infiltració del primer aqüífer. En el cas en que hi ha cert drenatge a través de la capa poc permeable, les zones on les aigües s'infiltrin sobre el primer aqüífer seran indexades amb un 0 (Vernoux 2007).

L'IDPR està disponible en format raster sobre tot el conjunt de l'estat francès metropolità. Es recomana no treballar-hi amb el format raster sinó combinar-lo amb els polígons de la cartografia geològica. Després d'un anàlisi estadístic zonal de l'IDPR sobre cadascun d'aquests polígons de la geologia, a cada polígon se li assigna el valor mitjà de l'IDPR. Posteriorment seran aquests valors mitjans els que seran classificats en els intervals de 400 per tal de fer-ne l'indexació del paràmetre.

- Espessor de la zona no saturada, H.

En un medi continu, la vulnerabilitat del aqüífer disminuirà amb la profunditat de la zona saturada. Aquest espessor es calcula com la distància entre la superfície del sòl i el nivell piezomètric en un aqüífer lliure. En un aqüífer captiu es considerarà la distància entre la superfície del terreny i el sostre de l'aqüífer. De totes formes, aquest darrer cas no hauria d'aparèixer ja que les zones on l'aqüífer és captiu haurien d'estar excloses de la zona d'alimentació.

Si es disposen de diferents mapes piezomètrics, s'empraran en preferència els que corresponen a una situació de nivell alt, ja que d'aquesta manera es pren la visió la més pesimista. S'ha de tenir cura en la significació de les mesures utilitzades.

Els intervals utilitzats per definir les classes del paràmetre estan adaptats del mètode DRASTIC. A partir d'una profunditat de 30 metres es considera que la sensibilitat és molt feble (índex = 0).

- Permeabilitat de l'aqüífer, K.

Aquest paràmetre pren en compte la capacitat de l'aqüífer a deixar circular l'aigua. Per tant ens interessem a la circulació de l'aigua dins del sistema i no només a la capacitat de que una partícula de contaminant arribi a l'aqüífer.

Es tracta d'un paràmetre novament adaptat del mètode DRASTIC. En el mètode nord-americà hi ha dos paràmetres, natura del aquífer (A) i conductivitat hidràulica (C), que poden ser en certa mesura repetitius. El primer és qualitatiu i mira si les formacions geològiques que constitueixen l'aqüífer són a priori més o menys permeables. El segon es basa en els valors de conductivitat hidràulica. En el mètode proposat es fusionen els dos paràmetres en un. Si es disposen de dades de la permeabilitat s'empraran aquestes per avaluar el paràmetre. Si no es té cap dada es farà una avaluació qualitativa, basant-se per exemple en les correlacions entre litologia i permeabilitat que es troben en obres generals d'hidrogeologia.

Les classes han estat definides en funció dels ordres de magnitud més habituals de la permeabilitat en medis aquífers. Molt sovint la permeabilitat es coneixerà només a partir dels assajos de bombeig fets en la posada en marxa del pou. Per tant de vegades el paràmetre serà homogeni sobre tota la zona. D'altres vegades es podrà fer una cartografia del paràmetre gràcies a dades més nombroses, canvis de fàcies geològiques, una major fracturació de la roca en fons de vall, etc. L'objectiu és posar en evidència les zones més permeables que la resta.

Valor de l'índex	Classes P (en mm)	Classes IDPR	Classes H (en m)	Classes K (en m/s)
4	> 300	0 - 400	< 2	$> 10^{-3}$
3	200 a 300	400 - 800	2 a 5	$10^{-4} - 10^{-3}$
2	100 a 200	800 - 1200	5 a 15	$10^{-5} - 10^{-4}$
1	50 a 100	1200 - 1600	15 a 30	$10^{-6} - 10^{-5}$
0	< 50	1600 - 2000	> 30	$< 10^{-6}$

Taula 5 : classes dels paràmetres P, IDPR, H i K per a un medi continu.

- Pes dels paràmetres

Els pesos dels paràmetres han estat inspirats en el mètode DRASTIC (veure la taula 6). S'ha intentat ponderar d'una manera més forta els paràmetres que s'estima que són més independents entre ells i més fàcilment cartografiats i variables sobre la zona.

DRASTIC té com els dos paràmetres més importants l'intercepció a la zona vadosa (I, amb un pes de 21%) i la profunditat del aquífer (D, amb un pes de 21%). L'IDPR es podria considerar la suma dels paràmetres I i T de DRASTIC (pendent, 4% de

pes a DRASTIC) i d'aquesta manera en el mètode proposat esdevé el paràmetre amb més pes (30%). Els paràmetres IDPR i profunditat de l'aqüífer (H), són a priori molt independents entre ells i per tant es tracta de dos criteris molt bons. A H se li dóna un pes de 20%.

El sòl a DRASTIC té un pes feble (8%) però cal tenir present que la pluja eficaç que depèn de la RFU dels sòls conté també certa informació pedològica. Com serà més fàcil fer una cartografia pedològica que no pas una de la pluja eficaç, es ponderarà més fort el paràmetre sòl (S) i no pas la pluja eficaç (P) (Vernoux et al. 2007c).

Finalment a la permeabilitat del medi (K) se li dóna un pes equivalent al del paràmetre C de DRASTIC. No se li ha sumat el pes que correspondria al paràmetre A de DRASTIC, ja que a l'escala d'una zona d'alimentació es corre el risc de que el paràmetre sigui homogeni (Vernoux et al. 2007c).

Paràmetre	Abreviatura	Pes (%)
Pluja eficaç	P	10
Sòl	S	25
Índex de Desenvolupament i Persistència de la Xarxa hidrogràfica	IDPR	30
Espessor ZNS	H	20
Permeabilitat del aqüífer	K	15
Total		100

Taula 6 : pesos corresponents a tots els paràmetres de la metodologia per a un medi continu.

- Resultat final

Basant-se en aquesta ponderació dels paràmetres, l'avaluació de la vulnerabilitat en un medi continu o assimilable a continu quedarà de la següent manera:

$$\text{Vulnerabilitat} = 0,1 P + 0,25 S + 0,3 \text{ IDPR} + 0,2 H + 0,15 K \quad (13)$$

Els resultats es reclassifiquen en cinc grups de vulnerabilitat (Taula 7). En el cas en que aquesta classificació doni un mapa amb poques variacions, es pot fer una classificació que augmenti les diferències, com ara el mètode dels intervals naturals de Jenks que ofereix ArcMap. No obstant, en aquest cas cal no oblidar que el resultat ha donat una vulnerabilitat quasi igual arreu. Es recomana associar a cada categoria de vulnerabilitat els colors proposats en la taula 7.

Valors índex	Vulnerabilitat	Color
3,2 – 4	Molt elevada	Roig
2,4 – 3,19	Elevada	Taronja
1,6 – 2,39	Moderada	Groc
0,8 – 1,59	Feble	Blau
0 – 0,79	Molt feble	Verd

Taula 7 : classes de vulnerabilitat, per als tres mètodes.

Pel que fa a les aigües d'escolament superficial que posteriorment s'infilten i alimenten les captacions no hi ha un criteri per avaluar-les. En el cas en que això es produeixi una de les possibilitats podria ser assignar a aquestes zones on es produeix aquest escorriment la mateixa vulnerabilitat que tenen les zones on van a infiltrar-se aquestes aigües.

En el cas de cursos d'aigua, les conques dels quals poden ser gigantesques, ja s'ha dit anteriorment que es discutirà l'inclusió dins de la zona d'alimentació en funció de diferents criteris com ara la mida, la significativitat de l'alimentació, etc. En el cas en que estiguin dins de la zona d'alimentació el que es podria classificar-les com una zona sensible, on totes les activitats que hi tenen lloc a dins poden afectar la qualitat de les aigües de la captació, sense avaluar-hi la vulnerabilitat a dins.

- Format dels paràmetres

L'avaluació de la vulnerabilitat es realitza mitjançant un Sistema d'Informació Geogràfica (SIG). Els paràmetres d'entrada estaran disponibles en diferents formats: raster o vectorial (polígons, isolínies, punts). Els fitxers vectorials no poligonals hauran d'ésser espacialitzats, bé sigui per interpolació d'isolínies o de punts o bé per restitució estadística de valors puntuals sobre polígons. L'encreuament dels paràmetres i l'avaluació de la vulnerabilitat es farà en format raster, d'una resolució adaptada a l'escala de les dades utilitzades. Aquesta manera d'operar serà la mateixa per als altres medis aquífers.

5.3 Mètode per a un medi càrstic

5.3.1 Delimitació de la zona d'alimentació

La delimitació de la zona d'alimentació de les captacions de surgències o pous en medi càrstic ha de prendre en consideració el tipus de sistema. Aquesta caracterització necessita un reconeixement del terreny, aforaments sobre els cursos d'aigua on es suposa que hi ha pèrdues dins del sistema, seguiment de la precipitació i del cabal de la surgència al llarg d'un cicle hidrològic com a mínim, etc.

Es pot efectuar la delimitació a partir de :

- L'estructura geològica i els resultats d'assajos de traçadors artificials. Els traçadors proven les connexions hidràuliques en diferents condicions hidrològiques (a notar l'existència de diferències en funció de les condicions hidrològiques al llarg del any).
- A partir de la delimitació de la conca hidrològica dels cursos d'aigua que alimenten avencs o altres punts de pèrdua. Es poden delimitar amb el MDT o de manera manual amb els mapes topogràfics del IGN a escala 1:25 000.
- Amb el càlcul d'un balanç hidrològic, que permet obtenir la superfície de la zona d'alimentació. No es tracta d'una delimitació pròpiament dit sinó d'una

verificació de la superfície de la zona delimitada amb els mètodes anteriors. Consisteix en avaluar per un període donat, el volum d'aigua que surt i el volum de pluges que renova les reserves i manté el flux al llarg d'un any. Es calcula la superfície que hauria de tenir la zona d'alimentació per equilibrar les entrades i les sortides (Vernoux et al. 2007b).

Superfície zona d'alimentació = Volum que surt del sistema / Pluja eficaç

En un medi càrstic podran aparèixer grans superfícies per a la zona d'alimentació. Al contrari que en un medi continu, ací es tendirà a prendre sempre la conca hidrogràfica dels cursos d'aigua que alimenten el sistema.

5.3.2 Avaluació de la vulnerabilitat en un medi càrstic

El mètode escollit per avaluar la vulnerabilitat en un medi càrstic és directament el mètode RISKE explicat en l'apartat 4.2.3 d'aquest present treball. Només s'hi han afegit algunes lleugeres modificacions.

Aquest mètode en un principi només es preocupa en el risc de que una partícula arribe de la superfície del terreny a l'aqüífer, sense interessar-se de la circulació de l'aigua dins de l'aqüífer. Això contrasta clarament amb el que s'ha dit en la presentació del mètode general, on es deia que no s'avaluava només la capacitat de circular per la zona no saturada sinó que també la circulació dins del sistema. El que en un medi continu pot ser relativament senzill d'avaluar, com ara les zones més permeables, en un medi càrstic no ho és tant. De totes maneres, la delimitació de la zona d'alimentació de la captació ja s'encarrega de separar els punts que comuniquen amb la captació i els que no, i per tant dins de la noció de zona d'alimentació ja hi ha certa noció de circulació de l'aigua dins del sistema.

El funcionament del mètode en medi càrstic segueix exactament el mateix principi que el d'un medi continu. L'únic que hi canvia són els paràmetres escollits, que són els mateixos del mètode RISKE, comentats lleugerament a l'apartat 4.2.3, és a dir, són un total de quatre paràmetres, roca aquífer (R), infiltració (I), protecció (P) i carstificació (K).

- Roca aquífer, R.

Aquest criteri caracteritza la roca aquífer. La natura de les formacions geològiques controla la circulació de l'aigua. La fracturació també està considerada dins del criteri al mateix temps que la litologia. Es consideren sempre les formacions que constitueixen l'aqüífer i no pas altres formacions de cobertura, que entrarien dins del criteri sòl. En el cas de grans accidents tectònics, si aquests es poden cartografiar independentment a l'escala de treball, també seran considerats.

La cartografia del criteri R es farà a partir dels mapes geològics a 1:50 000 i completada per visites sobre el terreny. L'indexació es fa de la següent manera:

- R0: influència nul·la a molt feble sobre la vulnerabilitat. Aquesta classe reagrupa les formacions margoses (35-65% d'argila) que, si poden ser aqüífer, tindrien una influència molt limitada en termes de vulnerabilitat. La circulació de l'aigua és lenta.
- R1: influència feble sobre la vulnerabilitat. Agrupa les formacions margo-calcàries (25-35% d'argila).
- R2: influència moderada sobre la vulnerabilitat. S'agrupen les formacions de calcàries margoses (10-25% d'argila).
- R3: influència forta en la vulnerabilitat. S'hi troben les formacions calcàries i dolomítiques, bé massives en grans bancs no fracturats, bé en petits bancs amb intercalacions margoses amb fracturació homogènia. Aquest tipus de formació permet circulacions relativament fàcils i ràpides.
- R4: influència molt forta en la vulnerabilitat. Es reagrupen les formacions calcàries de grans bancs massius afectades per una fracturació important.

- Infiltració, I.

En aquest criteri es fa una distinció entre infiltració difusa i localitzada. En la primera el paràmetre que hi juga és el pendent, i en la segona és la presència de punts d'infiltració ràpida en el sistema.

El pendent es classifica a partir del mapa de pendents en format raster, que s'obté amb el MDT. Les conques hidrogràfiques dels punts d'infiltració localitzada (dolines, avencs, etc.) es poden delimitar també amb el MDT o de manera manual sobre un fons topogràfic del IGN. Les classes del paràmetre I són les següents:

- I0: en aquesta classe estan les zones amb un pendent molt fort (>50%) que afavoreixen un escolament en superfície i no pas la infiltració que serà molt feble.
- I1: zones amb un pendent fort (15-50%) que afavoreixen l'escorriment.
- I2: zones on el pendent és moderat (5-15%) i/o zones on l'escolament superficial és limitat en terrenys carbonatats.
- I3: zones de pendent feble (0-5%) amb preferència de l'infiltració. Les zones amb dolines i poljés estan dins aquesta classe, així com les zones on els cultius estan llaurats en direcció perpendicular a la de màxim pendent.
- I4: manifestacions d'infiltració concentrada en un punt (avenc, *bétoire*). Només es consideren els punts situats en un curs d'aigua temporal o no, no pas a qualsevol cavitat. Aquest coeficient s'aplicarà a tota la conca hidrogràfica del curs d'aigua que alimenta aquests punts.

- Protecció, P.

Aquest criteri consisteix en l'avaluació de dos paràmetres del mètode RISKE, el sòl (S) i l'epicarst (E), i prendre'n aquell que dona una major protecció.

El criteri sòl és avaluat de la mateixa manera que per a un medi continu, com ha estat explicat en l'apartat 5.2.2.

L'epicarst correspon a una part superficial de les formacions carbonatades sota cobertora o no. Aquesta zona està molt fracturada i pot actuar de retardador de l'infiltració de l'aigua en el sistema. Identificar un epicarst no és fàcil, sobretot si està cobert. A més a més l'extensió lateral no és forçosament contínua.

- E0: existència d'un epicarst espès (>1m) continu lateralment i molt ben desenvolupat, presentant figures de dissolució horitzontals i verticals, mostrant la dissolució en medi mullat.
- E1: epicarst menys potent (50 cm a 1m), més o menys continu lateralment, podent emmagatzemar temporalment aigua en proximitat de la superfície.
- E2: epicarst poc espès (20 a 50 cm), moderadament desenvolupat i discontinu, amb una capacitat d'emmagatzemament moderada.
- E3: epicarst poc potent (<20 cm) o absent localment, discontinu i poc desenvolupat, amb feble capacitat d'emmagatzemar aigua.
- E4: no hi ha epicarst.

Si el criteri E es pot caracteritzar, es fa una síntesi entre ell i el criteri S per trobar-ne el més protector (taula 8). Aquesta operació es pot dur a terme amb les eines SIG sobre tot el conjunt de pixels. Si no es pot identificar l'epicarst només es treballarà amb el sòl.

P	S	E
P0	S0 o bé S0 a S4	E0 a E4 E0
P1	S1 o bé S1 a S4	E1 a E4 E1
P2	S2 o bé S2 a S4	E2 a E4 E2
P3	S3 o bé S3, S4	E3, E4 E3
P4	S4	E4

Taula 8: selecció del criteri P considerant els paràmetres S i E.

- Carstificació, K.

S'entén com carstificació el grau de dissolució de la roca i la presència i magnitud dels fenòmens càrstics en el sistema.

La manera d'avaluar-lo es basa en les dades que surten de l'estudi del cabal a la sortida del sistema, de la correlació entre la pluviometria i el cabal o altres paràmetres a la sortida, els assajos de traçadors, etc. Bàsicament es tracta de discutir la funcionalitat i el caràcter binari o unitari del sistema, com ha estat explicat en l'apartat 3.2. Serà un paràmetre que difícilment es podrà espacialitzar sobre la zona.

Es defineixen les següents classes de carstificació:

- K0: carst unitari no funcional, és a dir, un sistema carbonatat amb un grau de carstificació que no permet pas un funcionament càrstic. En el cas d'un assaig de traçadors hi ha una feble recuperació.
- K1: carst unitari poc/mitjanament funcional. Les velocitats en els assajos de traçadors són lentes i els temps d'estada de l'aigua al sistema són grans.
- K2: carst unitari funcional, amb índexs de carstificació desenvolupats. Les velocitats dels traçadors són ràpides, hi ha una forta variabilitat del cabal i de la química de la surgència o bé un carst binari no/poc funcional.
- K3: carst binari poc/mitjanament funcional.
- K4: carst binari molt funcional.

- Resultat final

Els pesos assignats als paràmetres del mètode per a un medi càrstic (Doërflioger 2007) varien en respecte als del mètode RISKE (taula 9).

Paràmetre	Abreviació	Pes (%)
Roca	R	30
Infiltració	I	50
Protecció	P (S o E)	10
Carstificació	K	10

Taula 9: taula dels pesos dels paràmetres per a un medi càrstic.

Basant-se en aquests pesos la vulnerabilitat final per a cada unitat cartogràfica (pixel) és la següent:

$$\text{Vulnerabilitat} = 0.3 P + 0.5 I + 0.1 P(S) + 0.1 K \quad (14)$$

Les 5 classes de vulnerabilitat són les mateixes que per un medi continu (taula 7).

5.4 Mètode per a un medi fracturat

5.4.1 Delimitació de la zona d'alimentació

La zona d'alimentació en un medi fissurat dependrà en gran part de la cartografia de les fissures i fractures que estan connectades a la captació. Els mètodes de delimitació de la zona d'alimentació estaran per tant basats en l'estructura geològica, així com en tot un seguit de mesures sobre el terreny, com ara els assajos de traçadors. Les conques hidrogràfiques dels cursos d'aigua que acaben infiltrant-se en les fractures i alimentant la captació entraran dins de la zona d'alimentació.

5.4.2 Avaluació de la vulnerabilitat en medi fracturat

El mètode DISCO va ser desenvolupat per avaluar la vulnerabilitat en aqüífers fracturats molt heterogenis, amb l'objectiu d'establir perímetres de protecció. Una adaptació d'aquest mètode ha estat feta, de manera que es sigui coherent amb la resta de mètodes per als altres medis. Sobretot pel que fa al nombre de classes per paràmetre i l'ordre dels índexs.

S'han considerat tres paràmetres, discontinuïtats (D), infiltració (I) i sòl (S).

- Discontinuitats, D.

Es tracta d'identificar les zones caracteritzades per grans contrastos de permeabilitat dins de l'aqüífer, materialitzat per la presència de falles regionals, de zones més o menys fracturades, per fractures amb una obertura més o menys gran. Aquest paràmetre cal acompanyar-lo d'assajos de traçadors que provin la connexió entre els punts d'injecció i la captació d'aigua potable. El paràmetre es classifica en 5 grups, de D0 a D4, de menys a més vulnerable (Döerfliger 2007).

- D0: roca sana no alterada i no fracturada. Absència de connexió hidràulica amb la captació.
- D1: sector amb connexió hidràulica lenta amb la captació (>15 a 30 dies) posada en evidència per un assaig de traçadors. Existència d'atenuació en la restitució del traçador. Sector caracteritzat per feble conductivitat hidràulica. Zona de fractures en roca sana.
- D2: sector amb feble i lenta connexió hidràulica a la captació, sobre 10 dies. Zona de conductivitat hidràulica mitjana o bé una discontinuïtat sense connexió hidràulica ràpida amb la captació.
- D3: zona de discontinuïtats ben connectades a la captació amb atenuació limitada, provat per assajos de traçadors (resposta ràpida i i concentrada del pic, en pocs dies). Dins de la zona fissurada de l'aqüífer, grans fractures ben connectades amb la captació.
- D4: zona de discontinuïtats connectades de manera ràpida (entre 10 i 24 hores), no hi ha fenòmens d'atenuació.

La cartografia del paràmetre s'efectua a partir de la reconeixença sobre el terreny, dels mapes geològics, de l'anàlisi de les fotografies aèries i si es fa necessari de sondejos geofísics. Les característiques dels diferents tipus de discontinuïtat poden ser avaluades bé amb observacions de terreny (orientació, obertura, freqüència, extensió, zones d'infiltració preferencial) bé amb els resultats dels assajos de traçadors.

- IDPR.

Aquest paràmetre que indica el caràcter més favorable a l'infiltració o a l'escolament en superfície de les formacions geològiques de la zona no saturada ja ha estat explicat detalladament anteriorment. La classificació que se'n fa és molt similar a la d'un medi continu, excepte pel que fa als cursos d'aigua que s'infiltrin en les discontinuïtats.

Els cursos d'aigua, tant permanents com temporals, que s'infiltrin i alimenten la captació, tindran un índex igual a 3 sobre el conjunt de la conca topogràfica. Sobre aquesta zona no s'aplicarà l'IDPR. Sobre la resta de zones sí que s'aplicarà l'IDPR de la mateixa manera que ha estat fet per a un medi continu.

- Sòl, S.

Aquest criteri és avaluat exactament de la mateixa manera que per als altres dos medis.

- Resultat final.

El mètode DISCO no funciona de la mateixa manera que RISKE o DRASTIC, ja que de fet no hi ha ponderació dels paràmetres. En un primer pas DISCO relaciona el paràmetre D amb la cobertora protectora i ja n'extrau una primera vulnerabilitat. Després fa una extensió de les zones a protegir en funció del pendent i de la infiltració. El que s'ha fet és adaptar DISCO a la manera d'operar que s'ha seguit en els anteriors casos. No havent-hi res més en que basar-se, el paràmetre D serà el que tindrà un pes més important. Allà on hi ha fractures en superfície connectades a la captació serà evidentment una zona vulnerable. Els altres dos paràmetres tenen un pes més feble però significatiu segons la proposició feta per Döerfliger (2007) (taula 10).

Paramètre	Abreviació	Pes (%)
Discontinuitats	D	50
Infiltració IDPR	I	30
Sòl – cobertora protectora	S	20

Taula 10 : pesos dels paràmetres per a un medi fracturat.

Amb aquests pesos la vulnerabilitat per unitat cartogràfica serà :

$$\text{Vulnerabilitat} = 0.5 D + 0.3 I + 0.2 S \quad (15)$$

6. Prova del mètode

Un cop explicada la metodologia que s'ha establert per als tres tipus de medis, es feia necessari provar-la en diferents medis. Tot i que aquí s'ha presentat primer la metodologia amb tots els seus detalls i després es presenten les proves, en realitat no fou aquest l'ordre. Les mateixes proves amb els casos reals ajudaren de manera decisiva a definir i refinar la metodologia.

La prova del mètode es pot dividir en tres fases. La primera, l'elecció dels llocs a provar. La segona seria l'adquisició de dades suplementàries així com una visita de camp per a cadascun dels llocs. Finalment hi havia l'última fase, corresponent a l'aplicació del mètode pròpiament dit.

6.1 Elecció dels llocs a provar

L'Agència de l'Aigua del Sena-Normandia (AESN) va facilitar tota una sèrie d'estudis al BRGM, en total 55 informes (Fig. 11). Aquests estudis anaven des d'estudis de vulnerabilitat de la zona d'alimentació fins a les propostes de delimitació de perímetres de protecció de les captacions. Els autors dels estudis eren diferents gabinets d'enginyers de l'estat francès així com algun estudi fet per el propi BRGM.

Tots aquests estudis es troben repartits al llarg de tota la zona que correspon a l'Agència, tot abastant els contextos geològics més comuns dins de la conca. Aquests contextos són:

- Els al·luvions. Es troben al llarg dels cursos d'aigua de la zona, com el Sena i la Marne, però també prop de cursos d'aigua molt menys importants.
- Els aqüífers en medi sedimentari no càrstic. Dins d'aquest grup estarien totes les zones on la creta (*craie*) no està carstificada, així com altres formacions sedimentàries que poden ser tractades com un medi porós.
- Els aqüífers en medi sedimentari càrstic. En aquest grup està tota la part on la creta sí que està carstificada, així com altres formacions carbonatades.
- Els aqüífers de sòcol, en roques metamòrfiques i plutòniques. A la conca del Sena-Normandia són ben escassos els afloraments de roques de sòcol, trobant-se només al departament de Manche i Calvados a la Baixa Normandia (extrem Oest) i a l'extrem Sud-est de la conca.
- Els aqüífers en formacions argiloses. Es tracta de petits aqüífers de materials més porosos situats en regions argiloses, d'extensió molt limitada.

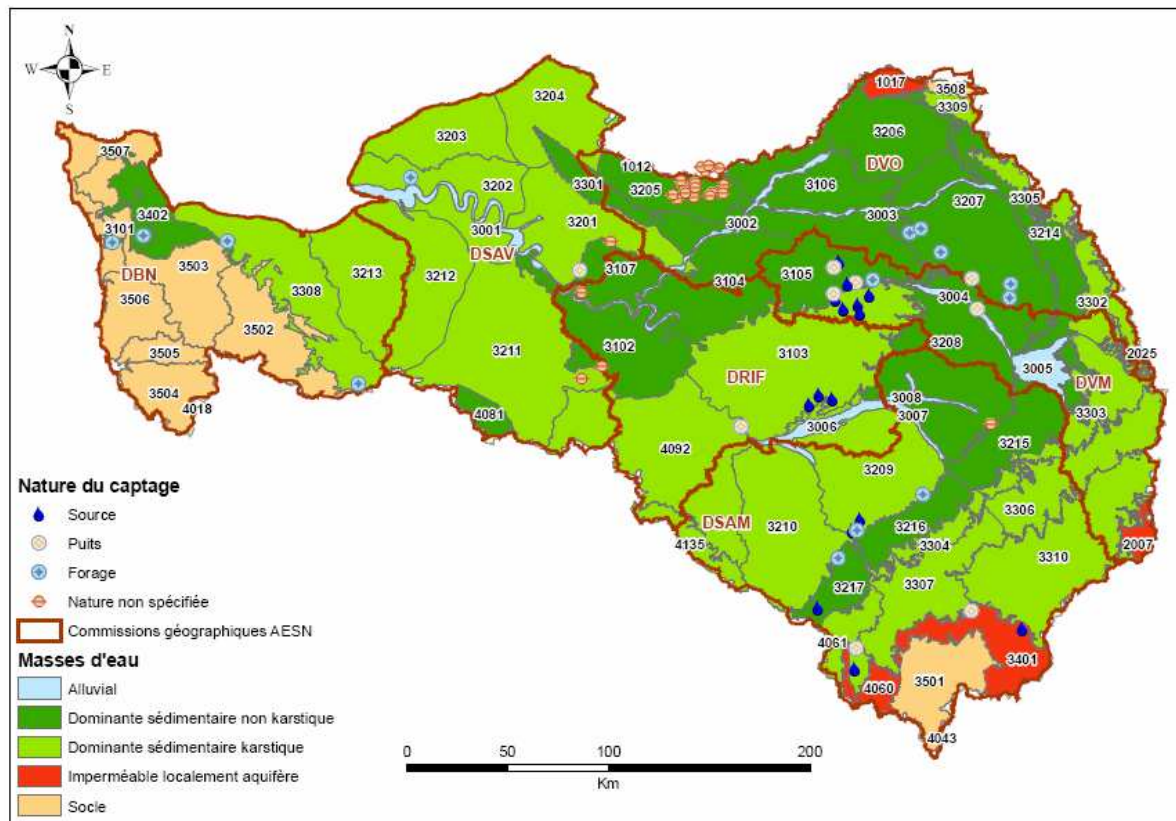


Figura 11 : mapa amb la distribució dels diferents estudis facilitats per l'Agència de l'Aigua Sena-Normandia (Vernoux et al. 2007a).

Entre tots aquests informes i estudis es va mirar com s'actuava fins al moment pel que fa a la delimitació de la zona d'alimentació i de la vulnerabilitat.

Pel que fa als mètodes de delimitació de la zona d'alimentació (Fig. 12), de tots els casos en tots els medis, el mètode de delimitació basat en els límits topogràfics és el més comú (23 casos). El segon més habitual està basat en els mapes piezomètrics, el que s'ha anomenat mètode gràfic (21 casos). Basant-se en els mapes geològics n'hi havia 12, en un balanç hidrogeològic 6, en assajos de traçadors 7, en solucions analítiques 2 i en simulacions numèriques 3. Cal dir que no era l'objectiu de tots els treballs la delimitació de la zona d'alimentació i per tant en alguns casos aquesta delimitació es feia d'una manera lleugera o fins i tot no estava feta.

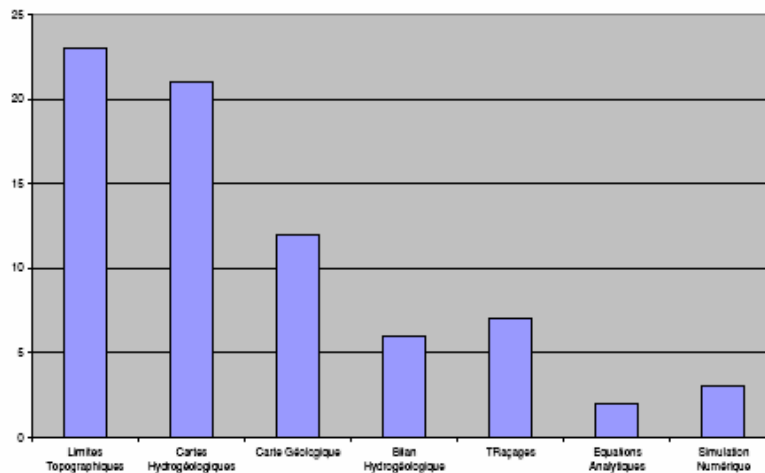


Figura 12 : recompte dels mètodes utilitzats en els informes consultats per a delimitar la zona d'alimentació.

Pel que fa als mètodes d'avaluació de la vulnerabilitat (Fig. 13), novament cal dir que en molts informes no era l'objectiu i no hi havia entre els resultats una cartografia d'ella. Per tant, només en els casos en que s'avaluava, es van anotar els criteris utilitzats intentant associar-los als paràmetres del mètode DRASTIC. Això no significa que aquests criteris s'avaluessin com el mètode DRASTIC, de fet es va observar una gran variació en la forma d'avaluar els paràmetres. Així en 13 casos es considerava el sòl com un paràmetre a tenir en compte per avaluar la vulnerabilitat de la zona d'alimentació. El segon paràmetre més considerat era la natura de la zona no saturada (equivalent de I de DRASTIC) i el tercer la profunditat de la zona saturada (D de DRASTIC). Els altres criteris que es troben en els informes, més rarament, són: natura de l'aqüífer, pendent, indicis càrstics, ocupació del sòl, proximitat a la captació, proximitat a la xarxa hidrogràfica i entorn humanitzat.

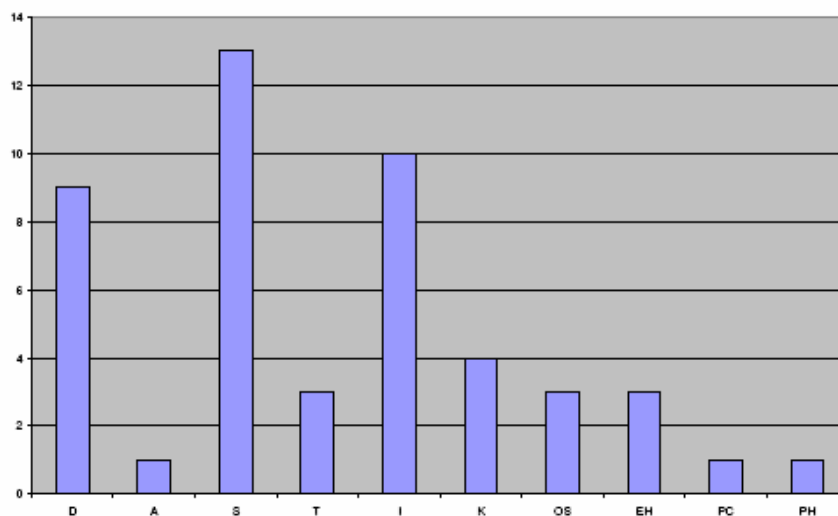


Figura 13 : recompte dels criteris emprats en el conjunt dels estudis consultats per avaluar la vulnerabilitat. Els criteris D, A, S, T i I corresponen als paràmetres equivalents de DRASTIC. A més a més K : indicis càrstics, OS : ocupació del sòl, EH : entorn humanitzat, PC : proximitat captació, PH : proximitat xarxa hidrogràfica.

A l'hora de la prova de la metodologia, el BRGM i l'AESN van estipular que haurien de ser sis els casos provats, abastant tots els contextos hidrogeològics possibles. Donat que a la conca del Sena-Normandia són poc nombroses les captacions en un medi de sòcol es va acordar cercar algun cas fora del domini de la conca per a aquest tipus d'aquífer (Comité de pilotage 2007). Per a captacions situades en contexte volcànic, que no es troben en els dominis de la conca Sena-Normandia, també es va decidir en aquesta mateixa reunió mirar de buscar-ne en altres zones de territori francès. D'aquesta forma el BRGM es va posar en contacte amb els seus serveis regionals arreu de França metropolitana i d'ultramar. Aquesta cerca va ser negativa per al cas d'una captació en medi volcànic i positiva per a una captació en granits.

Els criteris utilitzats en l'elecció foren els següents:

- La major variabilitat possible de contextos geològics.
- El nombre i la qualitat de les dades possibles en els informes facilitats per l'AESN.
- La coneixença de l'existència d'altres estudis
- La relativa normalitat dels casos, intentant evitar els casos molt complexos.
- Els criteris dels agents a les diferents regions de l'AESN, així com dels hidrogeòlegs del BRGM de cada regió i alguns actors locals (associació AQUI'Brie).
- Una distribució dels punts relativament equitativa al llarg de la conca.

Després d'una reunió al juny de 2007 a la seu de l'AESN a Nanterre entre l'agència, el BRGM i el Ministeri de Medi Ambient es va decidir la següent llista de casos reals per aplicar-hi el mètode (veure taula 11 i figura 14).

Cas	Nom de la captació	Departament i regió	Medi
1	Captació de Kerzulant, Kernilis	Finisterre, Bretanya	Sòcol, granit alterat
2	Captació de Punay, Moul	Calvados, Baixa Normandia	Calcàries del Batonià, no càrstic.
3	Captacions de La Ferme St-Marcel i St-Antoine-la-Fóret	Seine maritime, Alta Normandia	Creta carstificada
4	Captacions de Saint Martin la Garenne i Guernes	Yvelines, Íle-de-France	Al·luvions del Sena i creta fracturada
5	Captacions de Nangis	Seine-et-Marne, Íle-de-France	Calcàries de Champigny, indicis de carstificació
6	Surgència de Rupt-aux-Nonains	Meuse, Lorena	Calcàries del Portlandià, carstificades

Taula 11 : captacions d'aigua potable escollides per a dut a terme la prova del mètode.

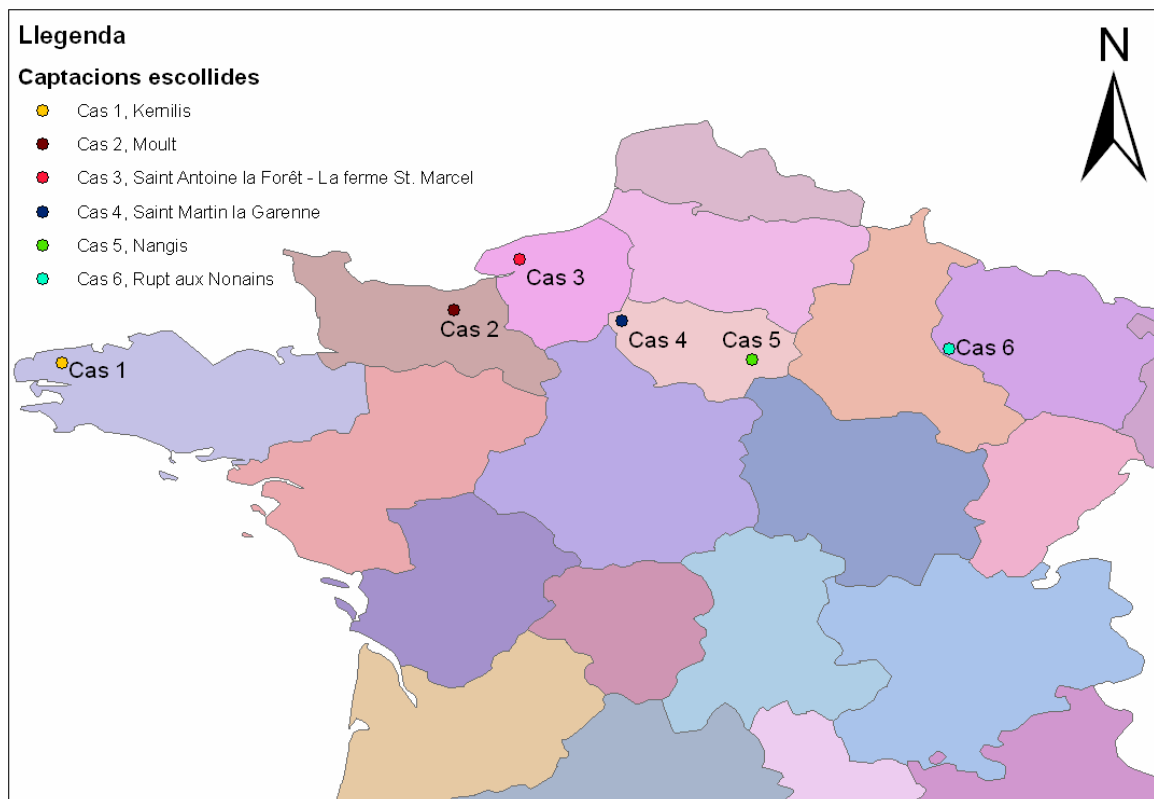


Figura 14: esquema de situació de les sis captacions d'aigua potable escollides per a la prova del mètode.

6.2 Col·lecta de dades

Un cop elegits tots els llocs va vindre una fase de col·lecta de dades suplementàries. A partir de les pròpies referències dels estudis disponibles es van trobar altres documents que aportaven un poc més. Per altra banda el servei de documentació del propi BRGM va ser també de gran ajuda així com el criteri dels hidrogeòlegs del serveis regionals del BRGM.

El tipus de dada que interessava buscar era:

- Informacions concernant el règim d'explotació de les captacions, el cabal mitjà diari, la profunditat dels pous...
- Dades sobre el clima i la hidrologia. Pluja eficaç, ETP, variacions del cabal dels rius, influències en el sistema subterrani de les aigües superficials, colmatatge del llit del riu.
- Mapes d'isopiezes, a poder ser en estiatge i en època humida.
- Caracterització geològica i hidrogeològica suficientment precisa. Descripció del caràcter hidrogeològic de les diferents formacions, els resultats d'assajos de bombeig i de traçadors.
- Cròniques de cabal de les surgències.
- Cròniques de nivell piezomètric en algun dels piezòmetres de control, a poder ser dins de la zona d'estudi i si no en algun piezòmetre proper i en el mateix contexte hidrogeològic.
- Modelitzacions numèriques del aqüífer.
- Caracterització pedològica, caràcter hidrològic del sòl, contingut en matèria orgànica.
- Cartografia de geologia del Quaternari i de formacions superficials.
- Existència d'altres pous que exploten el sistema, drenatge agrícola.
- Qualitat de l'aigua i evolució al llarg del temps.
- Punts sensibles en superfície com ara dolines, avencs, etc.

Un cop recollides les informacions de cadascun dels sis llocs, aquestes eren separades entre aquelles que podien ser de gran interès de cara a l'aplicació del mètode i aquelles que n'eren secundàries.

En el cas de qualsevol mapa que contingués informacions interessants i que tenia alguna relació amb els paràmetres de la metodologia, s'escanejaven, es georeferenciaven i es vectoritzaven mitjançant el mòdul ArcMap del programa ArcGIS (www.esri.com) en el cas en que aquests no estiguessin ja en format digital.

La síntesi de totes les informacions recol·lectades està en uns informes, havent-hi un de diferent per a cadascuna de les captacions elegides. Aquests informes es troben en l'annex III. Basant-se en aquests informes i en les mancances detectades de cara a la correcta aplicació de la metodologia es va dissenyar la campanya de camp.

6.3 Campanya de camp

La campanya de camp en el cas de les sis captacions elegides es va plantejar amb l'idea de fer-hi una ràpida visita per veure el contexte i eventualment prendre alguna mesura o dada que mancava en les informacions prèvies.

Les visites a cadascuna de les captacions van tenir lloc la darrera setmana d'agost i la primera de setembre de 2007, dedicant-hi un sol dia per a cada lloc. En cap cas s'ha de considerar que la metodologia i l'estudi de vulnerabilitat que es proposa en aquest treball es pot resoldre amb una ràpida visita sobre el terreny. Cal tenir en compte que es partia en els sis casos d'estudis prou complets que van estalviar tota una gran part de feina de camp.

Un dels paràmetres emprats en totes tres metodologies d'avaluació de la vulnerabilitat és el sòl. La cartografia pedològica a l'estat francès corre a càrrec normalment de l'INRA (Institut National de Recherche Agricole) i es disposen de ben poques fulles a escala 1:50 000, no havent-hi cap de les captacions estudiades sobre aquestes fulles. Per tant va ser aquest paràmetre, el sòl, un dels que es va mesurar dins de les limitacions de temps sobre el terreny, tot i que en alguns casos es partia d'alguna dada puntual, de mapes a 1:250 000 i de mapes de formacions superficials.

Sobre el terreny es van realitzar tota una sèrie de sondejos pedològics amb una gúbia d'un metre com a màxim de profunditat (Fig. 15). Es va mirar de situar-los sobre les diferents formacions geològiques, per tal de poder correlar el tipus de sòl al substrat. El que s'anotava era la composició granulomètrica del sòl i els possibles canvis d'aquest en profunditat, la coordenada X Y del sondeig amb un GPS i la profunditat assolida amb el sondeig. Després es situava el punt sobre el mapa geològic.



Figura 15 : fotografia d'un sòl extret per un sondeig amb gúbia a Kernilis, agost de 2007.

En els casos que corresponien a un medi càrstic, és a dir, Rupt-aux-Nonains (cas 6), Nangis (cas 5) i St-Antoine-la-Fóret (cas 3), sobre el terreny s'havien de veure els punts sensibles de suposar una entrada d'aigua directa al sistema com ara dolines i avencs. En alguns casos en aquests punts s'havia fet un assaig de traçadors però en d'altres no hi havia cap tipus de mesura.

Donar una ullada a aquests punts fou especialment útil en els casos de St-Antoine-la-Fóret i Nangis. En el primer es partia d'un inventari i un mapa de tots els punts sensibles de ser un *bétoire* (un avenc en contexte de la creta normanda). Sobre el terreny es va veure en canvi que alguns d'aquests punts només eren simples esquerdes d'erosió molt superficials i no semblaven tenir un risc massa significatiu de ser punts d'infiltració puntual.

En el cas de Nangis (cas 4) es partia d'una cartografia d'avencs sobre el sector. Tres d'ells no es van considerar significatius donat que no semblaven arribar fins a l'aqüífer explotat. En canvi un quart punt es va considerar, juntament amb N. Dörfliger, que comportava un risc ja que un rierol s'hi infiltrava completament i segons el mapa geològic ho havia de fer dins de l'aqüífer explotat.

Un dels aspectes que s'havia de veure si existia i en quina mesura en totes les zones eren els drenatges agrícoles. Aquests recullen les aigües infiltrades en el sòl d'una parcel·la agrícola no utilitzades per les plantes i són abocades a un col·lector que desemboca en un curs d'aigua. Es tracta d'una qüestió important ja que aquestes parcel·les no alimenten l'aqüífer, excepte si el curs d'aigua realimenta l'aqüífer. Per veure l'existència d'aquests drenatges cal seguir els cursos d'aigua i veure si hi desemboquen tubs i si és possible saber de quines parcel·les venen. En aquests casos sol ser de gran ajuda el testimoni dels agricultors de la zona, que saben si hi ha drenatge o no i la magnitud d'aquest. D'entre les sis captacions elegides només es va veure drenatge agrícola a Nangis.

Finalment en tots els casos s'intentava trobar una zona d'aflorament de la roca, per així poder-se'n fer una idea del substrat i comparar-ho amb les informacions ja conegudes. Això fou d'especial interès en el cas de Kernilis, on en un aflorament es podia veure un horitzó de granit alterat.

6.4 Resultats

Una vegada recollides totes les informacions del terreny, correctament tractades i digitalitzades, ja es disposaven de tots els ingredients per poder començar a aplicar la metodologia proposada d'identificació de les zones d'alimentació de les captacions i d'avaluació de la vulnerabilitat.

6.4.1 Identificació del medi

El primer pas que s'ha de fer és la identificació del medi en que es treballa. Tots els criteris que poden ser emprats estan a la taula 2.

- Cas 1: Kernilis.

La captació de Kerzulant, a Kernilis, estava situada en l'horitzó d'alteració i fissurat de roques granítiques. No hi havia cap dada que fes pensar en un medi fracturat, ni alimentacions localitzades a nivell de fractures, ni ràpides circulacions del aigua dins del sistema. L'infiltració de l'aigua és difusa sobre tota la zona d'alimentació. Finalment, i tot i que era un lloc pensat com exemple de medi fracturat, es va decidir aplicar-hi un mètode propi de medi continu. Això va provocar que no es pogués aplicar el mètode de medi fracturat enlloc.

- Cas 2: Moul.

El pou de Moul explota un aqüífer format per les calcàries del Batonià. Aquestes calcàries, segons el propi llibret del mapa geològic del sector, presenten una porositat d'interstícis i de fissures. Calia descartar la possibilitat de l'existència de fenòmens de circulació ràpida en el sistema i les grans fluctuacions del nivell en poc temps per poder-lo tractar com un medi continu. L'anàlisi del temps de semi-descens del nivell piezomètric en alguns piezòmetres dins de la zona fou el criteri utilitzat (Fig. 16). Els cicles de descens del nivell duren diferents mesos, de l'ordre entre 200 i 400 dies, depenent del punt observat. Per tant no existeixen fluctuacions ràpides del nivell, més pròpies d'un medi discontinu. Tampoc s'observen variacions sobtades dels paràmetres fisicoquímics.

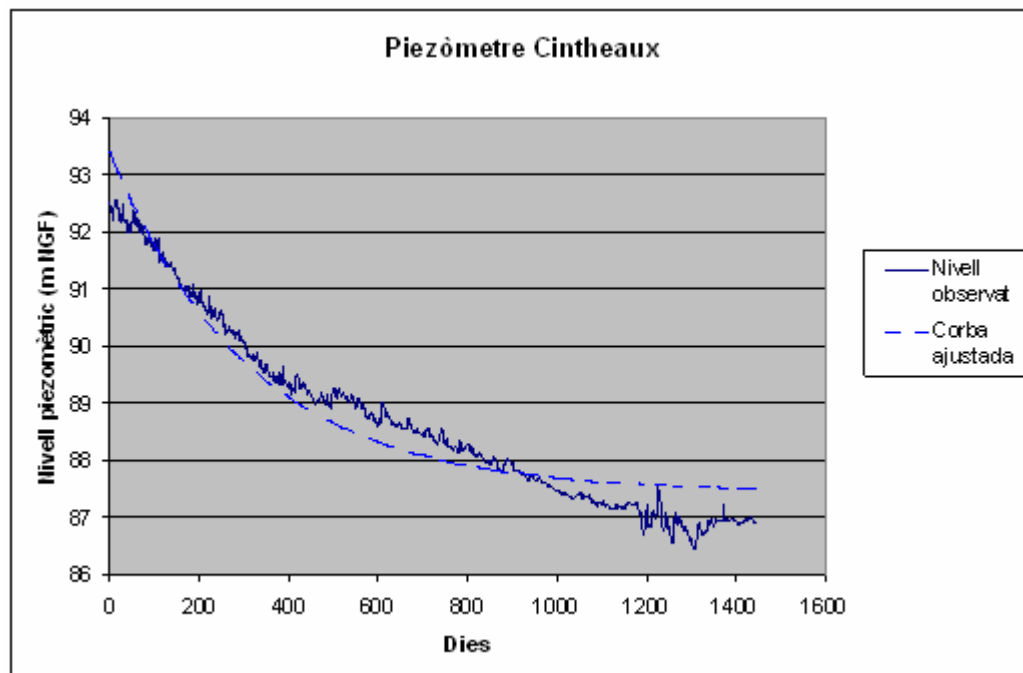


Figura 16 : ajustament d'una corba de decreixement en el descens del nivell piezomètric a Cintheaux, a l'aqüífer del Batonià, prop de Moul. El coeficient de correlació R de l'ajustament és 0,93 i el temps de semi-decreixement és de 216 dies. El període observat va de l'agost de 1995 fins el desembre de 1999.

- Cas 3: St-Antoine-la-Forêt i la Ferme St-Marcel.

Les captacions de St-Antoine-la-Forêt i La Ferme St-Marcel estan en un context geològic molt particular de l'Alta Normandia, la creta. Aquesta roca té un triple porositat, intersticial, de fissures i en el cas d'aquesta zona també de carstificació. Això ha estat confirmat per diferents estudis sobre la regió. A més a més, en superfície es van identificar tota una sèrie de fenòmens càrstics, com el que s'anomena *bétoires*, que són forats en el terreny que connecten la superfície amb l'aqüífer i poden ser punts d'infiltració ràpida. En algun d'aquests punts es va fer un assaig de traçadors, el resultat fou positiu als pous d'aigua potable i amb una velocitat de circulació de 100 m/h, molt ràpida. Aquests elements van fer classificar l'aqüífer captat per aquests pous com un aquífer carstificat.

- Cas 4: Saint Martin la Garenne.

Els pous de Saint Martin la Garenne estan en un meandre del Sena. L'aqüífer captat és de doble capa, una primera formada pels al·luvions del Sena i una altra per la creta. Les dos capes estan en contacte i es comuniquen. En aquest cas la creta està fracturada però presenta pocs indicis de carstificació, de fet això sol ser així en el cas on està recoberta per una formació permeable. La major part de la infiltració té lloc a través dels al·luvions del riu i per consegüent és una infiltració difusa i no pas concentrada en cap lloc. Això ja és un punt a favor de que es tracti d'un medi continu. L'anàlisi del descens del nivell piezomètric en un piezòmetre situat en un

meandre proper en el mateix contexte hidrogeològic mostra que els cicles de descens són plurimensuals i no presenten variacions sobtades, pròpies d'un medi discontinu. Tampoc a nivell dels pous s'ha observat una variació sobtada i ràpida del cabal o dels paràmetres fisicoquímics. Per tant es va considerar el medi com continu.

- Cas 5: Nangis.

Les dos captacions d'aigua potable de Nangis estan en un contexte geològic particular, les calcàries de Champigny. Aquestes calcàries estan sota un altre aqüífer, el de les calcàries de Brie, havent-hi una capa de margues entre els dos. L'alimentació del aqüífer explotat es fa de tres maneres, bé a través d'infiltració localitzada en avencs, per infiltració difusa en els afloraments de les calcàries de Champigny i en menor mesura per drenatge del aqüífer superior. En un avenc de la zona es va fer un assaig de traçadors amb resultat negatiu, però no va fer-se en les condicions idònies. Els valors de permeabilitat del aqüífer són molt elevats, tals que donen unes velocitats de circulació del aigua dins del sistema de l'ordre de 300 m/d. Fins aquí, tenint en compte tots aquests factors, es podria pensar en un medi càrstic. Però l'estudi de la crònica diària dels nivells piezomètrics no ofereix cap resultat propi d'un medi molt heterogeni, sinó que s'observen cicles interanuals i no pas variacions molt ràpides en resposta a episodis plujosos. Com la funcionalitat i el caràcter càrstic no és evident de demostrar-lo, es considerarà aquest medi com continu. Ara bé, com hi ha alimentacions puntuals, s'aplicarà una metodologia de medi càrstics per a les zones d'alimentació d'aquests punts.

- Cas 6: Rupt aux Nonains.

La surgència de Rupt-aux-Nonains es situa en les calcàries del Portlandià, que estan prou carstificades. Els indicis per demostrar-ho van des de la crònica del cabal de la surgència comparada amb la crònica de pluja, així com les variacions de la terbolesa en funció també de la pluja. La diferència de temps entre els pics de pluja i els de terbolesa són d'un sol dia. A més a més alguns assajos de traçadors de resultat positiu han posat de manifest l'alimentació del sistema per part d'un curs d'aigua. Finalment sobre el terreny es van identificar diferents morfologies pròpies d'un medi càrstic com ara avencs, dolines i cavitats.

6.4.2 Delimitació de la zona d'alimentació

La delimitació de la zona d'alimentació s'ha basat en els diferents mètodes existents. En alguns casos la delimitació ja estava feta en els treballs previs i per tant no s'ha fet res més que comprovar-ne la validesa.

- Cas 1: Kernilis.

La captació de Kerzulant, de Kernilis, és una surgència. Per tant la conca subterrània equivaldrà a la zona d'alimentació. Només es disposava d'una campanya piezomètrica feta l'estiu de 1992, a partir de la qual, els redactors de l'estudi van fer una delimitació gràfica de la zona d'alimentació (Fig. 17). En aquest cas la densitat dels punts de mesura estava plenament adaptada a l'escala de la zona d'alimentació. Els redactors del treball van assegurar-se també que el rierol que passa a la vora de la surgència no participa en cap cas a l'alimentació de la captació, de manera que la seua conca hidrogràfica no ha de ser considerada.

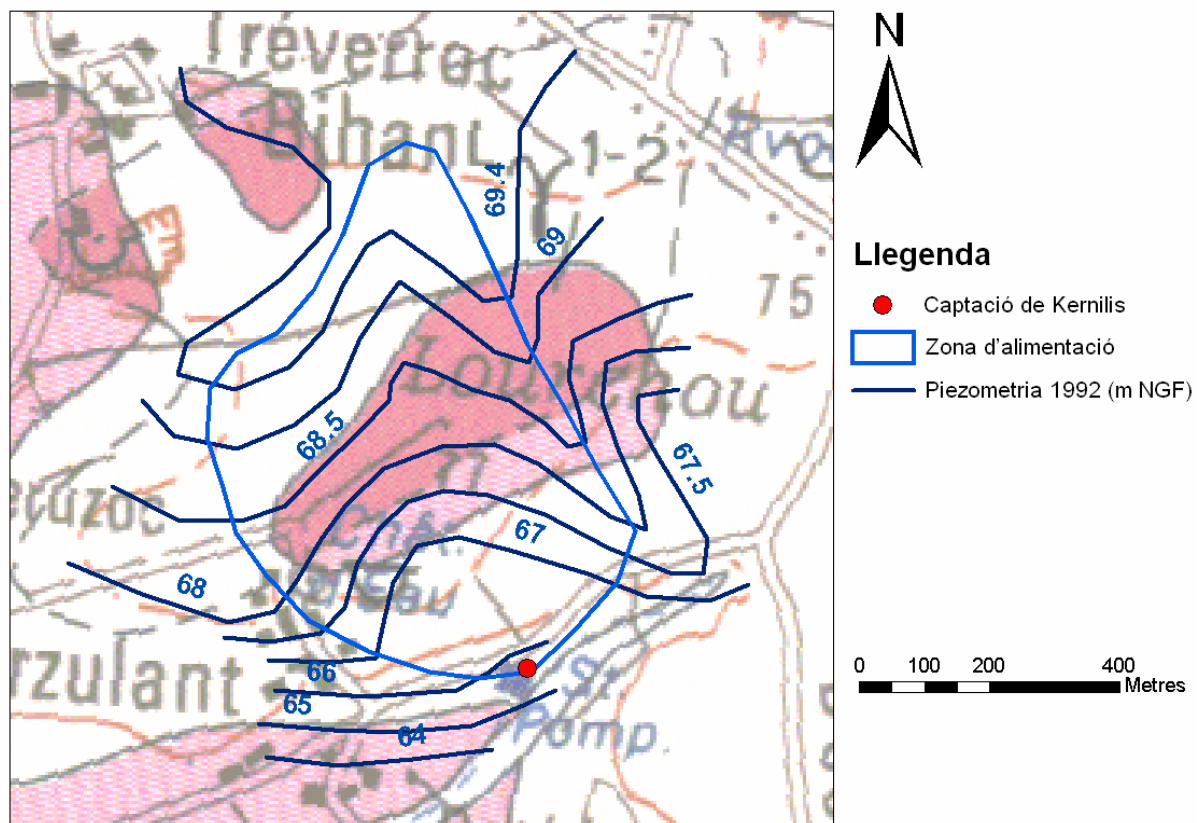


Figura 17 : Zona d'alimentació de la captació de Kernilis, delimitada per un estudi del BRGM de 1992 (Fons mapa geològic BRGM, fulla de Plebenec).

- Cas 2: Moul.

El pou de Punay, a Moul, està en un medi continu. Es coneixen diferents piezometries, essent la més recent la del atlas hidrogeològic del departament de Calvados, feta pel BRGM i actualitzada al juliol de 2007. A partir d'ella es pot fer una delimitació gràfica de la conca subterrània de la qual el pou és el punt més avall. Al tractar-se d'un bombeig i no d'una surgència, tota aquesta zona no serà la zona d'alimentació. Per tant la conca subterrània només pot ser utilitzada com primera aproximació.

Una delimitació amb una solució analítica s'ha calculat. De manera general, i amb certes irregularitats, es pot considerar que hi ha una circulació general de direcció SSW-NNE. A partir de les dades piezomètriques s'estima un gradient. Amb l'ajuda de l'aplicació creada amb Excel per el BRGM es calcula a zona d'alimentació, prenent en compte les incerteses en la determinació de la transmissivitat, del gradient i de la direcció. Se li ha aplicat un coeficient d'ampliació igual a 1,5, que podria ser un equivalent a un coeficient de seguretat per tenir en compte de certa manera la dispersió. El resultat és una zona d'alimentació que s'estén cap al Sud, en la direcció d'escolament que s'ha estimat (Fig. 18). En comparació a la conca subterrània estimada amb la piezometria hi ha certes zones d'aquesta zona d'alimentació que estarien fora de la conca subterrània. Utilitzant el programa Whaem, que treballa en elements analítics, es van obtenir resultats similars als de la solució analítica, però molt més estret degut a no aplicar cap coeficient d'amplificació.

Una delimitació simplista com aquesta possiblement es queda curta en el cas de Moul. L'aquífer es caracteritza pel pas d'un rierol que drena l'aquífer, per un cabussament de les capes del Batonià (la base del aquífer no és constant) i per una zona captiva al Nord de les captacions. A més a més hi ha algunes intercalacions dins de l'aquífer de nivells més argilosos que en fan un aquífer multicapa no homogeni. A més cap la possibilitat d'interferències amb altres pous que exploten el mateix aquífer. Es va provar de fer una modelització numèrica amb el programa ASMWIN però la complexitat del sistema era massa gran per a un programa amb les limitacions de ASMWIN i no es va obtenir cap resultat reeixit. En aquest cas seria aconsellable fer una modelització amb un programa potent (MODFLOW, MARTHE, TRANSIN) que permeten simular un sistema multicapa amb totes les peculiaritats esmentades. Això no es va dur a terme dins d'aquesta tesina ja que significava un temps que es perdia en detriment dels altres casos i tampoc estava entre els objectius del treball fer models numèrics d'aquesta magnitud. El que s'ha fet és prendre com a resultat de la zona d'alimentació el que es va determinar amb la solució analítica, tot sabent que és un resultat aproximatiu.

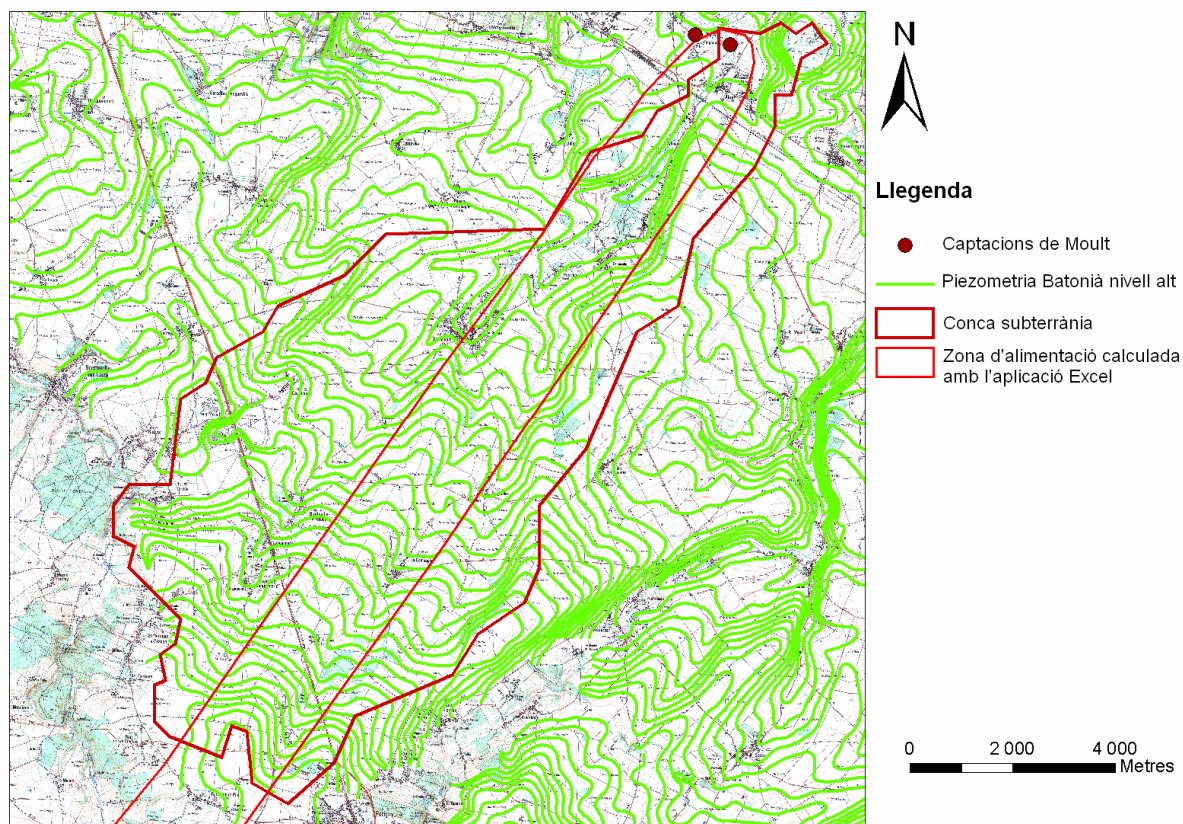


Figura 18 : delimitació analítica de la zona d'alimentació del pou de Punay a Moul (cas 2) feta amb l'aplicació Excel. En una traça més gruixuda està la conca subterrània. La piezometria són dades el BRGM del aquífer de Batonià per a un nivell alt.

- Cas 3 : St-Antoine-la-Forêt i la Ferme St-Marcel.

Les captacions de St-Antoine-la-Forêt i la Ferme St-Marcel, en medi carstificat, havien de comptar amb una delimitació basada en l'estructura geològica i els fenòmens càrstics. Entre les investigacions fetes pel despatx d'enginyers dels pous hi havia un cens de punts sensibles (*bétoires*) (Fig. 19) de ser llocs d'infiltració ràpida i dos assajos de traçadors en dos d'aquests punts. Un d'aquests assajos fou positiu en tots els pous i l'altre negatiu. Lògicament tota la conca hidrològica que convergia cap al punt on el resultat fou positiu ha d'estar dins de la zona d'alimentació. A més a més cal delimitar una zona on l'infiltració difusa a través de la cobertura pot arribar a les captacions.

Malgrat ser un medi carstificat on la piezometria de vegades no aporta res, en el cas d'aquesta zona aparentment hi ha continuïtat hidràulica i la piezometria pot ésser utilitzada. Només es disposava de les dades del Atlas hidrogeològic del departament, que estan a una escala no convenient, però no havent-hi res més es va delimitar una porció d'aquífer que alimentava les captacions amb aquestes dades (Fig. 20). L'àrea d'aquesta zona es va ajustar amb un balanç hidràulic. Finalment es

va desestimar considerar la conca hidrològica d'un rierol que circula vora les captacions tot i que aquest de vegades alimenta l'aqüífer i les captacions. Es va desestimar perquè la significació d'aquesta alimentació era escassa, després d'anàlisis de traçadors radioactius. A més a més calia tenir present la temporalitat d'aquesta alimentació.

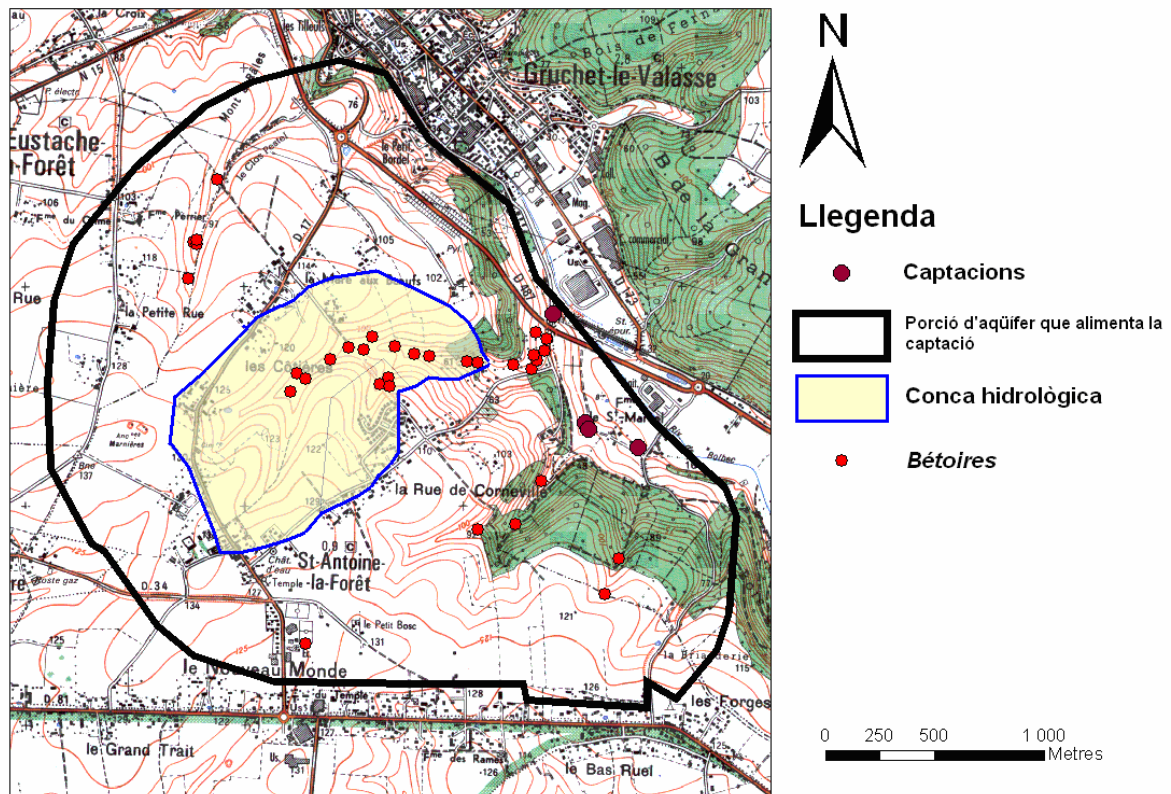


Figura 19: situació dels avencs (*bétoires*) o cavitats en la zona d'alimentació del cas 3, de Saint Antoine la Forêt. La conca hidrològica marcada correspon a la del *bétoire* que està connectat amb les captacions d'aigua potable.

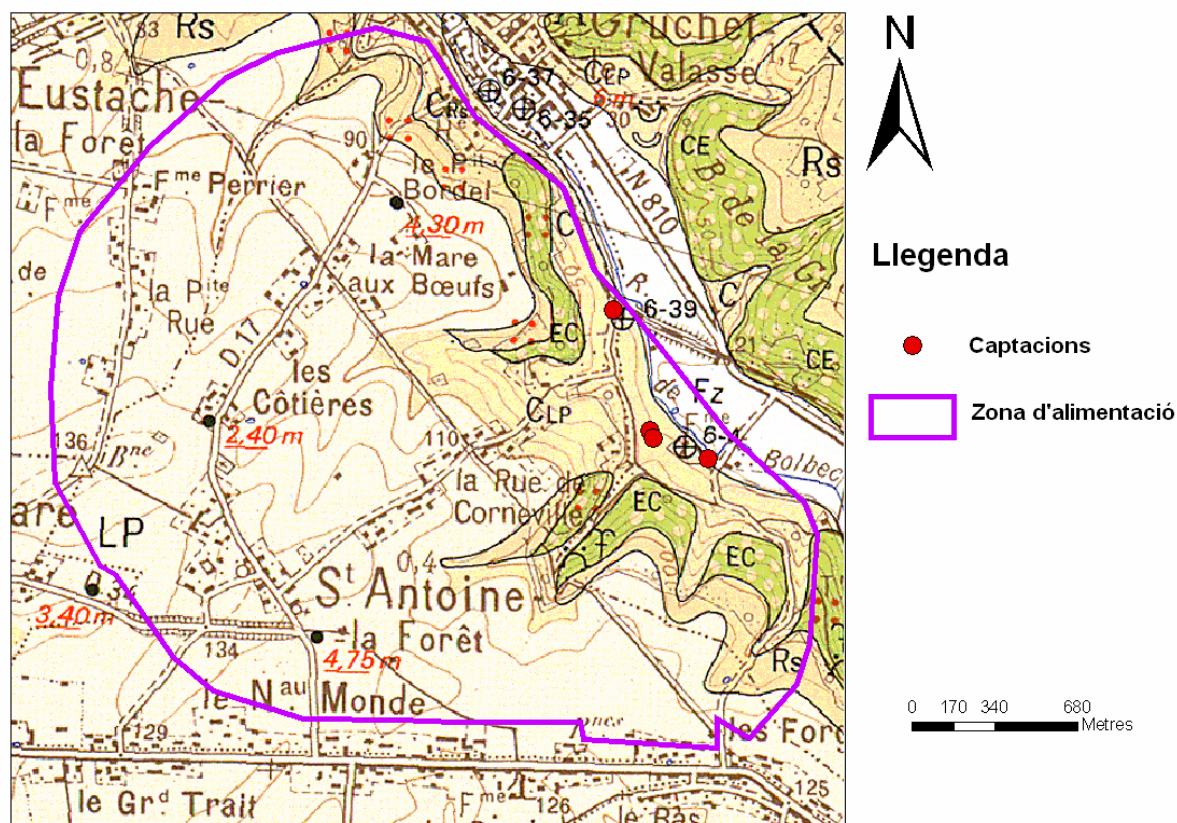


Figura 20 : zona d'alimentació de les captacions de St Antoine i la Ferme St-Marcel (fons mapa geològic BRGM 1 :50000).

- Cas 4: Saint Martin la Garenne.

El conjunt de captacions d'aigua potable de Saint Martin la Garenne havien estat objecte de diferents estudis, entre ells una modelització numèrica. Aquesta estimava que l'aigua explotada pels pous que provenia del Sena podia ser molt significativa, arribant a ser el 70 % del total segons les condicions hidrològiques. Aquest fet ja posava un problema de base, si es considerava tota la conca hidrològica en amunt d'aquest punt com zona d'alimentació de les captacions. Donada la magnitud de la conca i la quantitat de processos i vessaments que hi tenen lloc en les aigües del Sena es va descartar totalment aquesta possibilitat. En aquest sentit es farà confiança en una millora de la qualitat de les aigües de superfície que de retruc repercutirà en una millora de la qualitat de les aigües subterrànies. De totes maneres dins del meandre segueix havent-hi una zona on les aigües d'infiltració arribaran a les captacions i per tant les activitats de superfície influenciaran en la qualitat. La mateixa modelització numèrica descartava també la significació de l'alimentació de les captacions amb aigua que prové de la calcària de l'altra riva del Sena, on es situa un altre conjunt de captacions.

Per fer una delimitació de la porció d'aquífer que alimenta les captacions es va recórrer als dos programes gratuïts, l'ASMWIN en diferències finites i Whaem en elements analítics. Tots dos donen resultats satisfactoris en medis com aquest, en contacte amb un riu (figures 21 i 22). La limitació és que es suposa un sistema d'una sola capa quan en realitat no és així. Els resultats d'ambdós programes s'assemblaven a les darreres piezometries que es coneixien, però cal tenir en compte que la piezometria és molt sensible als nivells que presenta el Sena. El total de les porcions d'aquífer que alimenta les captacions ocupa bona part de l'àrea del meandre. Això sense tenir present els efectes de la dispersió, les variacions en la piezometria i altres heterogeneïtats. Per situar-se del costat de la seguretat prendre tota la superfície del meandre com zona d'alimentació no és una hipòtesi aberrant i de fet coincideix amb el que deia un dels estudis previs amb els que es comptava des d'un principi.

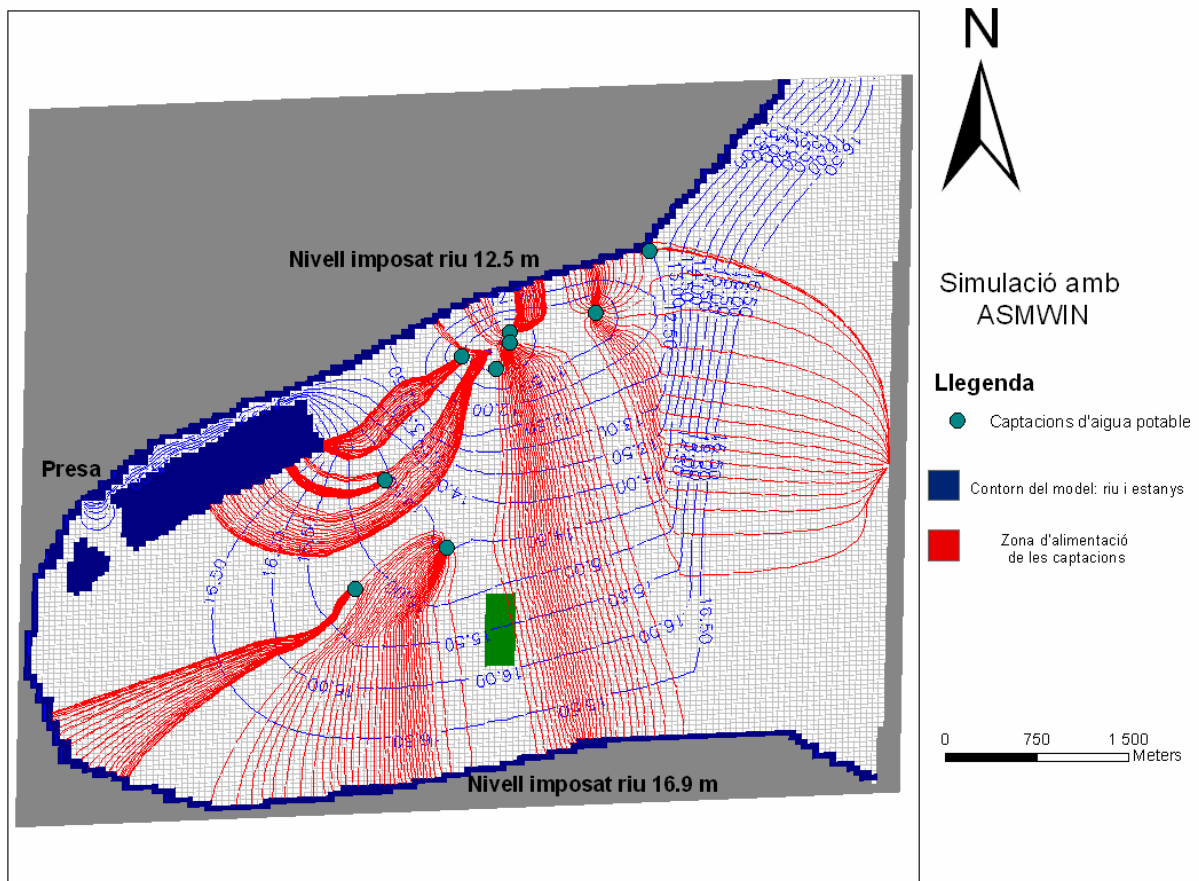


Figura 21 : resultat d'una simulació numèrica amb ASMWIN en el cas de les captacions de Saint Martin la Garenne. Les línies roges són les partícules que convergeixen als diferents pous. Els detalls de la modelització estan en l'annex III, en l'informe del cas 4.

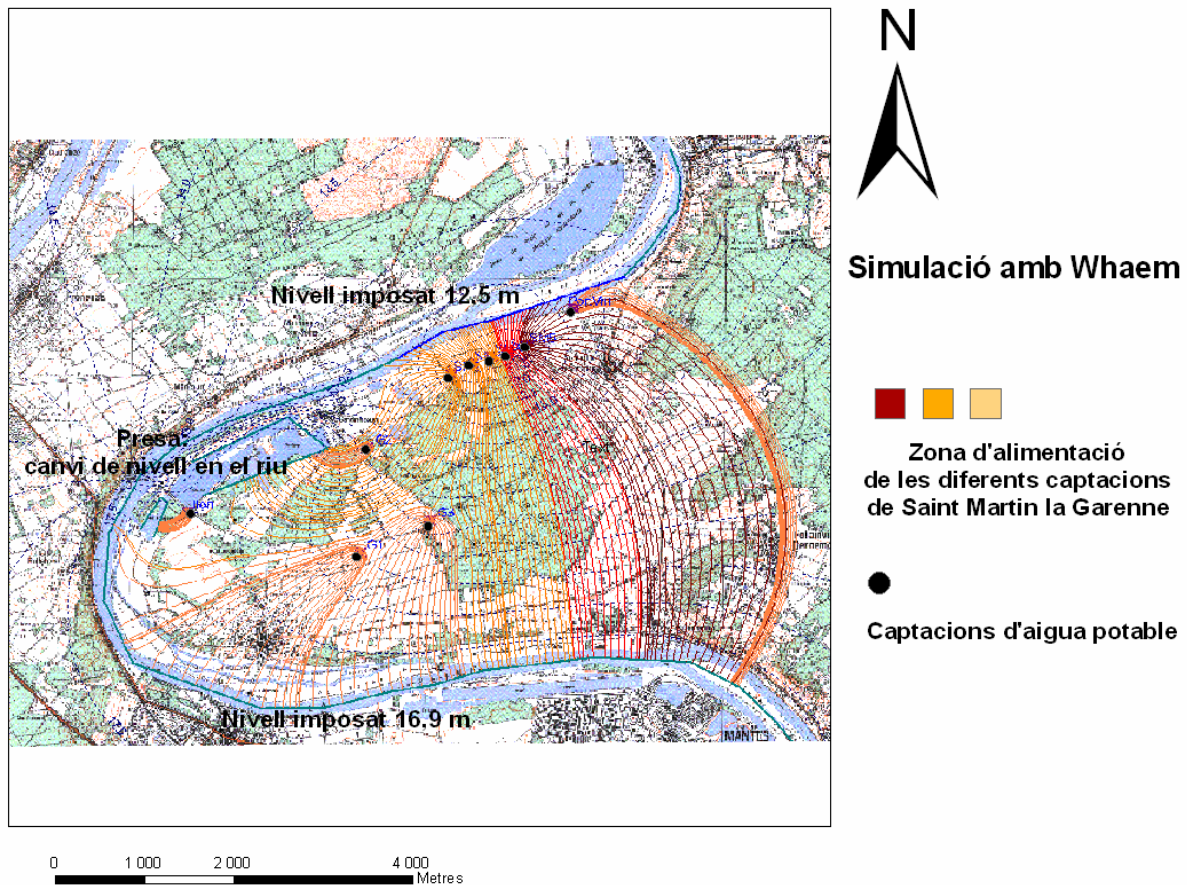


Figura 22 : zona d'alimentació per al cas 4, simulada amb el programa Whaem.

- Cas 5: Nangis.

Els dos pous de Nangis estaven en un contexte prou particular. Ja en la discussió del medi s'ha vist que hi havia indicis per tractar-lo com un medi càrstic i indicis per fer-ho com un medi continu. A més a més està el paper del aquífer superior que no està totalment aïllat del inferior.

Es partia d'una piezometria de base, de 2004, que indica una direcció general d'escolament subterrani així com una línia divisòria d'aigües. Aquesta piezometria no és massa precisa ja que té una densitat de mesures no massa gran, però novament és l'única dada que es disposa. En els treballs precedents s'havia intentat fer un càlcul analític de la porció d'aquífer que alimenta les captacions però la transmissivitat del medi és tan gran que els resultats no són satisfactoris. De fet el que es troba és una franja molt estreta, d'uns pocs metres, que al no saber la direcció exacta del flux costa molt situar-la en l'espai.

Els mètodes numèrics en un medi tan heterogeni com aquest, amb indicis de carstificació i amb les dades poc precises disponibles, no semblen ser els idonis. Per

fer una bona modelització caldria disposar de mesures piezomètriques més precises així com dades de la geometria del aqüífer. Un programa com ASWIN potser es quedaria curt per a aquest model i s'hauria de recórrer a un de més potent. Finalment la delimitació que s'ha fet ha estat utilitzant un mètode gràfic, tot i no tractar-se d'un medi on aquest mètode és aconsellat (Fig. 23). La mateixa associació AQUI'Brie (2007), que treballa per la protecció dels aqüífers de la regió, en altres estudis en el mateix context ha operat d'una manera similar per definir la porció d'aqüífer que alimenta una captació.

Sobre una gran part d'aquesta porció d'aqüífer que alimenta les captacions es troba l'aqüífer de les calcàries de Brie. Com existeixen alguns mecanismes d'alimentació d'aquest aqüífer superior al de Champigny, s'ha pres tota la projecció en superfície de la porció d'aqüífer que alimenta l'aqüífer com zona d'alimentació de les captacions. A més a més es compta amb un avenc per on un rierol s'infiltra totalment dins del sistema de les calcàries de Champigny dins la porció delimitada. Tota la conca hidrogràfica del rierol formarà part també de la zona d'alimentació.

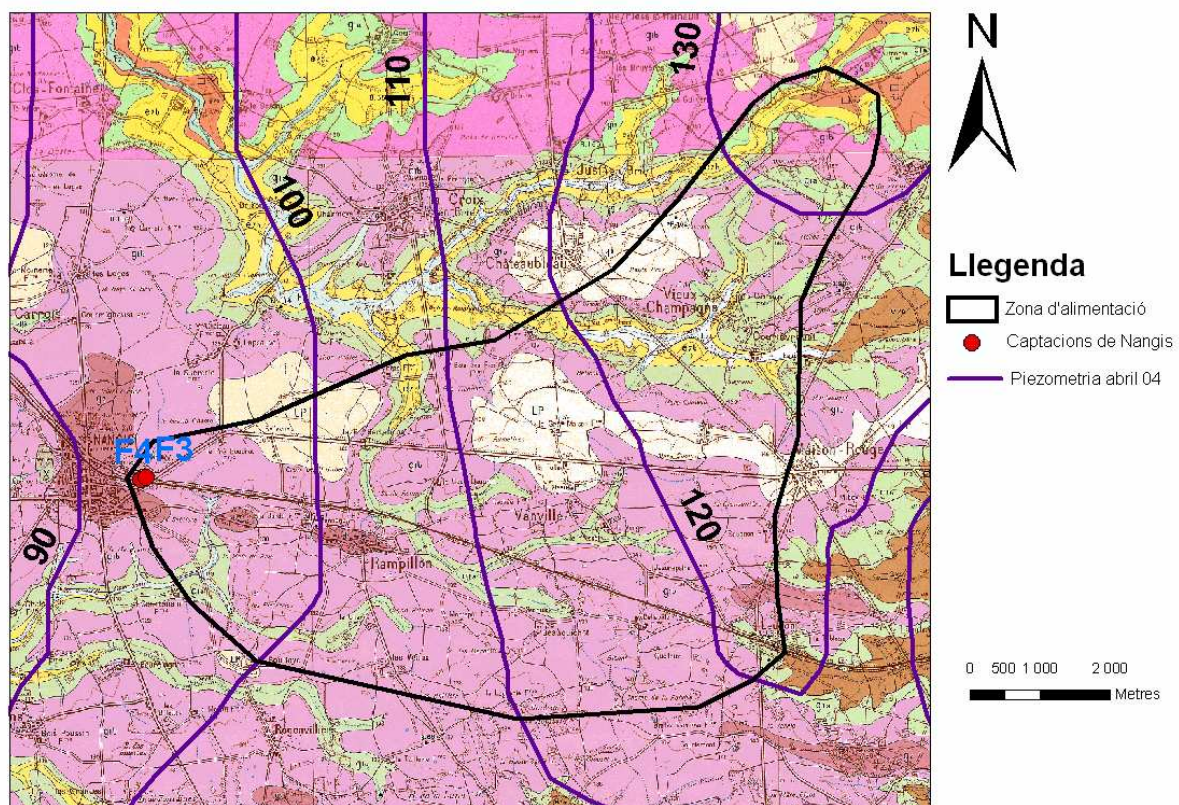


Figura 23 : delimitació gràfica de la zona d'alimentació per a les captacions de Nangis (fons mapa geològic BRGM amb mapa piezomètric d'abril de 2004).

- Cas 6: Rupt aux Nonains.

Les surgències de Rupt-aux-Nonains, entre elles la que és explotada per alimentar en aigua potable la comarca, estan en un medi càrstic. Els estudis consultats parlen de diferents maneres d'aquestes surgències: gràcies a les pèrdues en els cursos d'aigua, a les infiltracions ràpides en avencs i en infiltracions difuses.

En el curs d'aigua més important del sector es coneixen tres assajos de traçadors positius a les surgències de Rupt. La conca hidrogràfica que correspon al punt d'injecció situat més avall en el rierol formarà part aleshores de la zona d'alimentació de la captació.

La zona on pot tenir lloc una alimentació difusa és més difícil de delimitar. Els assajos de traçadors fets sobre alguns avencs a l'altiplà al Sud de les surgències de Rupt han estat negatius, comunicant una altra zona. De totes formes s'ha pres una zona al Sud de les captacions (Fig. 24). El balanç hídric és complicat de calcular, ja que no es coneix el cabal mitjà anual de totes les surgències de Rupt. Tampoc es tenen dades de la significativitat de l'alimentació per part del riu (anàlisi d'isòtops, etc).

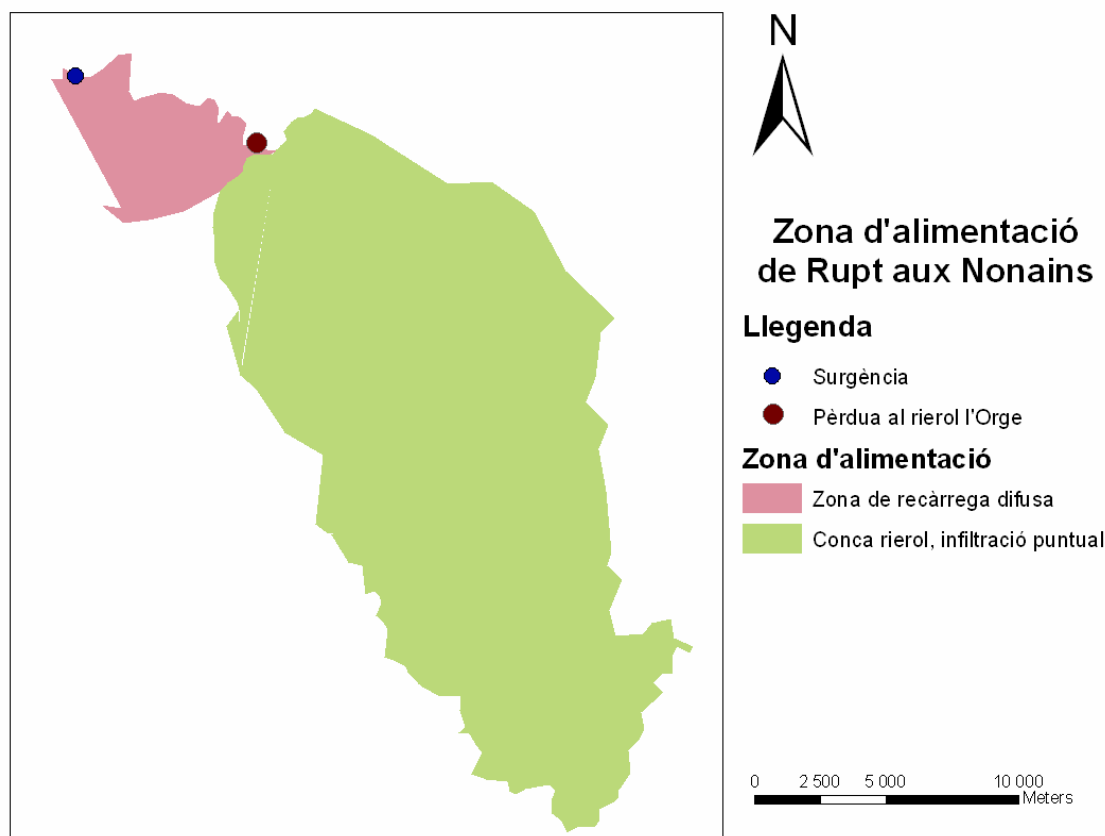


Figura 24 : esquema de la zona d'alimentació de la surgència de Rupt aux Nonains. Es diferencien dos zones, l'una és la conca del rieron l'Orge, que s'infiltra en un punt i acaba apareixent a les surgències de Rupt, i una altra zona on l'aigua que s'infiltra en el sòl acaba alimentant també les surgències de Rupt.

6.4.3 Avaluació de la vulnerabilitat

Els resultats aquí exposats de l'avaluació de la vulnerabilitat dels sis casos reals són els resultats finals. En alguns casos es van arribar a obtenir fins a 8 resultats previs que no s'exposen i que només serviren per veure com havia de tractar-se la informació, quins eren els pesos idonis per a cada paràmetre i en quines classes havia de dividir-se. Es tracta doncs de resultats intermedis que no tenen massa interès un cop explicada la metodologia final.

- Cas 1: Kernilis.

En el cas de la zona d'alimentació de Kernilis per a l'avaluació de la vulnerabilitat es va emprar un mètode de medi continu. D'entre tots els paràmetres que s'usen només n'hi havia dos que presentaven algunes variacions, l>IDPR (Fig. 25) i la profunditat de la zona saturada (H) (Fig. 26). La resta eren homogenis sobre tota la zona. S'ha de tenir present que es tractava d'una zona molt petita, de 32 ha i que en aquests casos serà complicat arribar a molt nivell de detall. El resultat, presentat amb les cinc classes de vulnerabilitat establertes, dona una vulnerabilitat quasi homogènia sobre tota la zona d'alimentació (Fig. 27). Aquest resultat no és aberrant després de la visita sobre el terreny, ja que no es va identificar cap zona que semblés més favorable a l'infiltració que una altra.

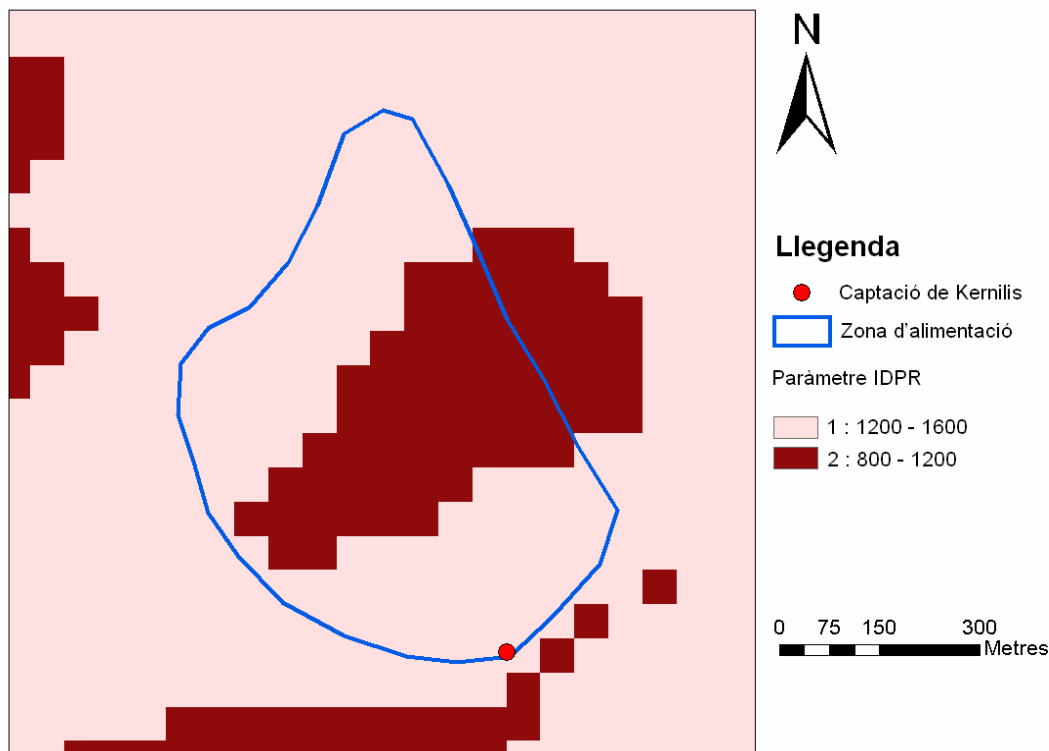


Figura 25: mapa del paràmetre IDPR en el cas 1.

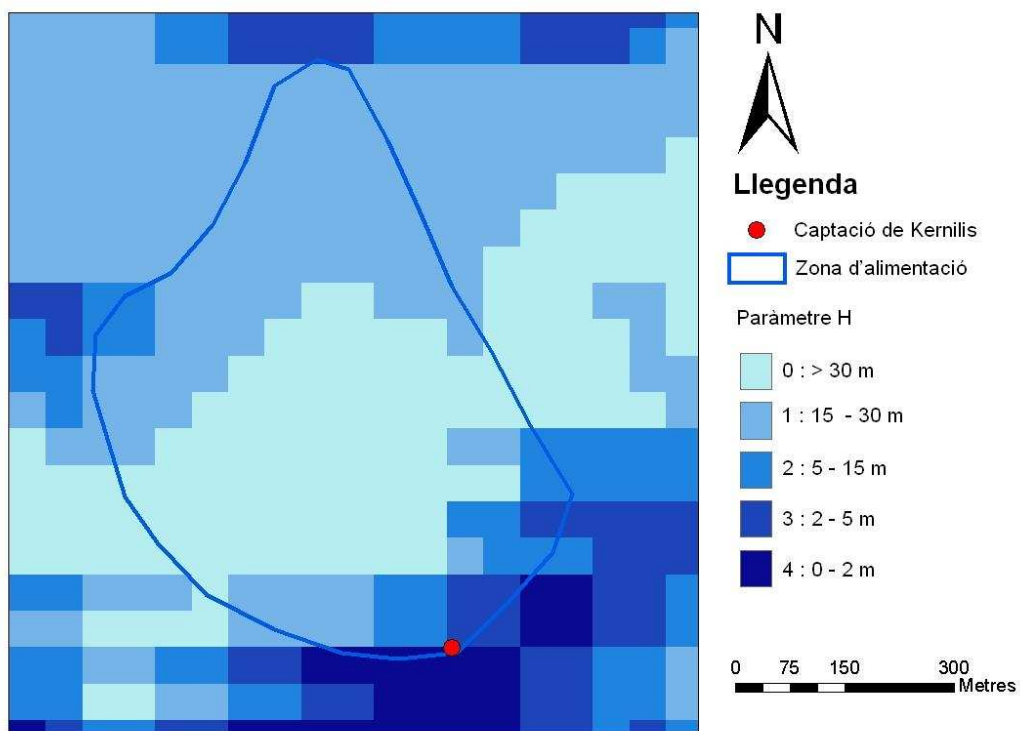


Figura 26: mapa del paràmetre H en el cas 1.

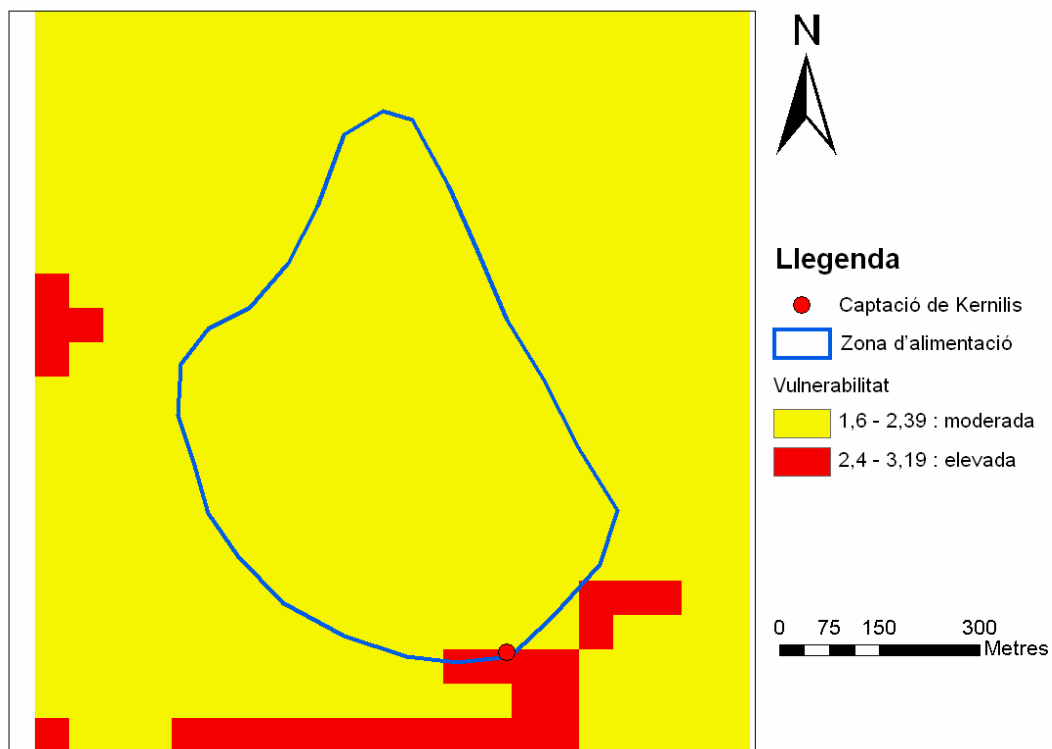


Figura 27: mapa amb el resultat de l'avaluació de la vulnerabilitat a Kernilis.

- Cas 2: Moul.

La zona d'alimentació de Moul comptava amb tres paràmetres que no eren homogenis, l'IDPR, la profunditat de la zona saturada (H) i el sòl (S). En el sòl es distingien els sòls sobre les calcàries del Batonià, infiltrants i poc potents, i els sòls dels al·luvions del riu, més argilosos i espessos (Fig. 28). El IDPR indicava un caràcter favorable a l'infiltració de totes les formacions geològiques del Batonià i més desfavorable en el cas dels al·luvions de fons de vall (Fig. 29). La profunditat del aqüífer és fonamental en aquest cas, ja que es troba a molt poca profunditat als fons de vall (Fig. 30).

El resultat de tot plegat és una vulnerabilitat elevada sobre la majoria de la zona (Fig. 31), excepte la part dels al·luvions del rierol on aquesta va de moderada a feble. Les zones de major vulnerabilitat corresponen a un sector on els tres paràmetres són desfavorables, relativa poca profunditat del aqüífer, sòl infiltrant i afloraments del Batonià en la zona no saturada. Si s'haguessin de prendre mesures agroambientals seria en aquesta zona on s'haurien de prioritzar les accions.

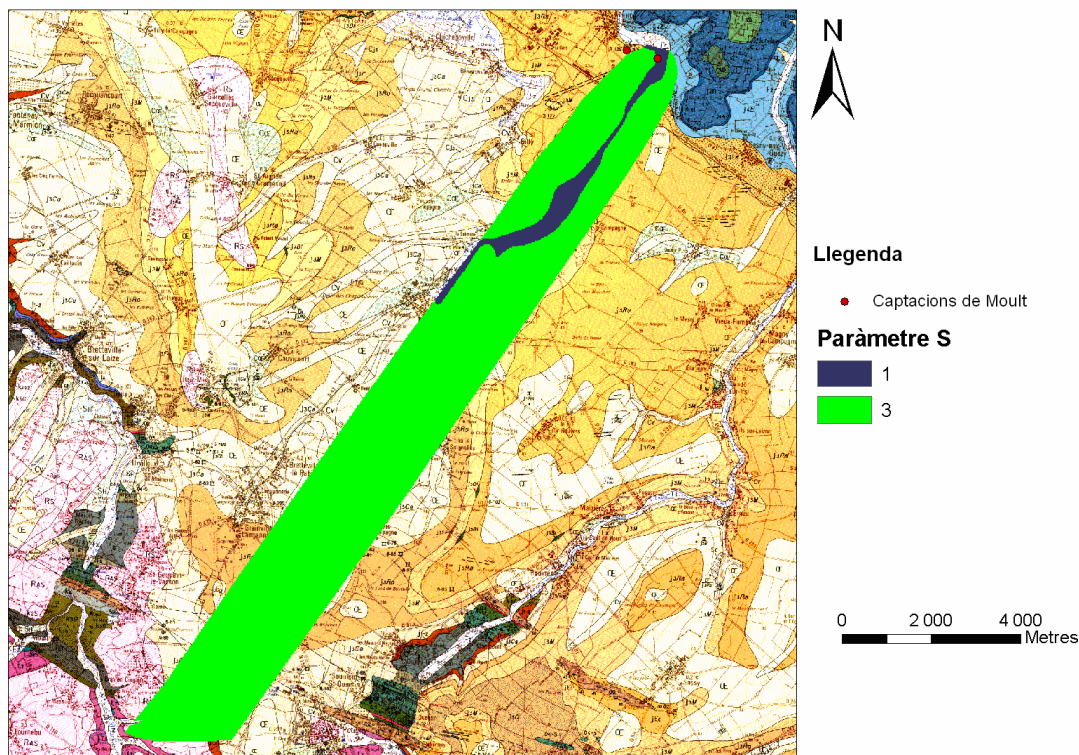


Figura 28: mapa de distribució del paràmetre sòl (S) al cas 2. Fons mapa geològic BRGM, fulla de Mézidon.

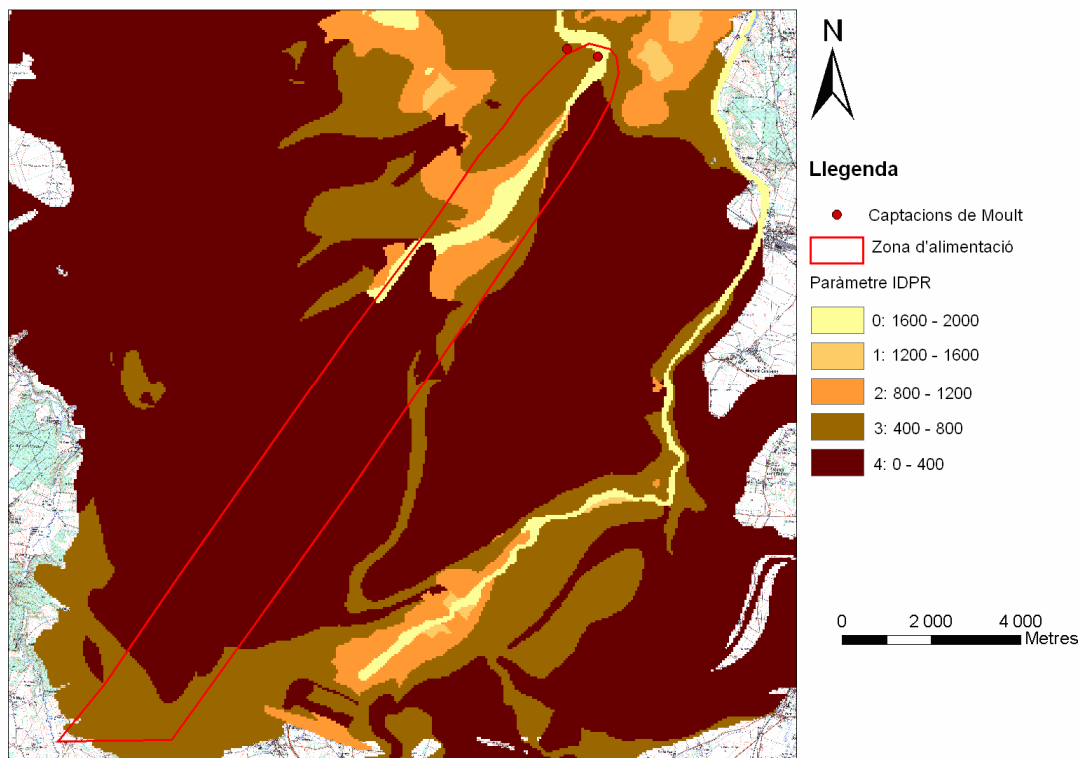


Figura 29: mapa de distribució del paràmetre IDPR al cas 2.

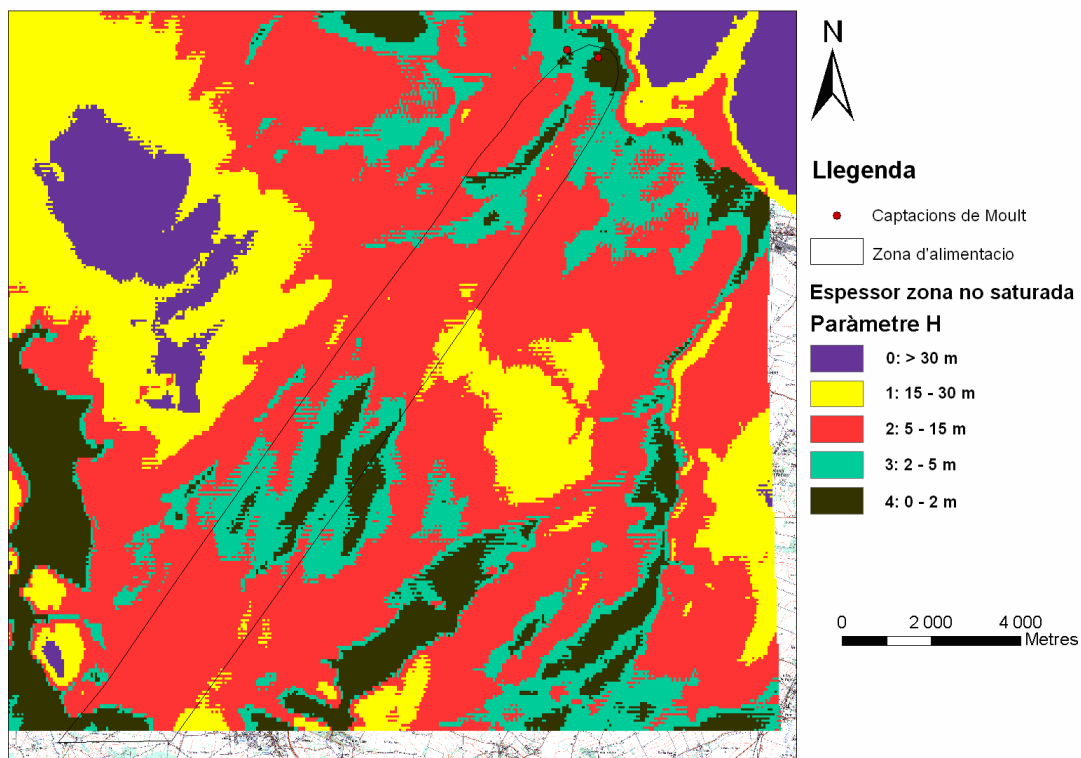


Figura 30: mapa de distribució del paràmetre H al cas 2.

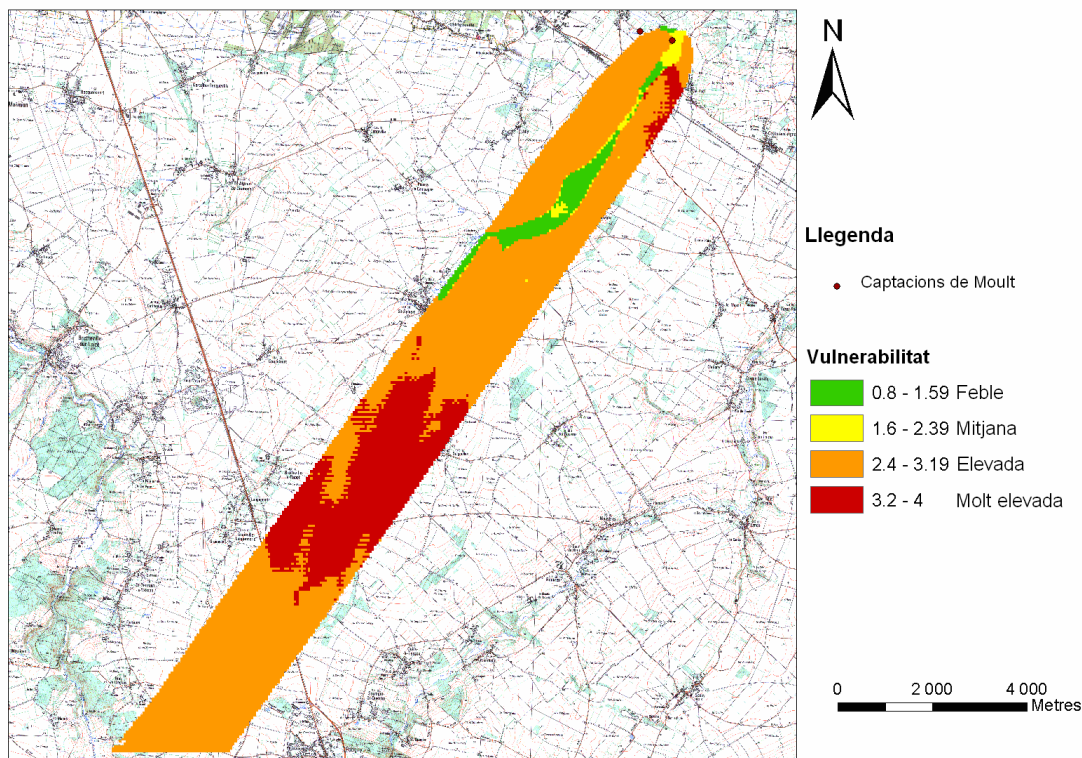


Figura 31 : mapa amb l'avaluació de la vulnerabilitat de Moulit.

- Cas 3: St-Antoine-la-Forêt i la Ferme-St-Marcel.

En aquestes captacions s'hi ha aplicat un mètode d'avaluació de la vulnerabilitat de medi càrstic. Els paràmetres Carstificació (K) i Roca (R) no es van poder espacialitzar sobre la zona i són homogenis. El criteri infiltració (I) (Fig. 32) contemplava la conca d'un punt d'infiltració ràpida i per a la resta era el pendent el criteri que comptava. Pel que fa al sòl es van identificar dos tipus, uns més infiltrants que els altres (Fig. 33).

El criteri roca (R) es dubtava entre indexar-lo 3 o 4 i per tant es va provar amb els dos valors per a fer el càlcul de la vulnerabilitat. En els dos casos s'observa clarament com la conca del *bétoire* on les aigües s'infiltra és la zona més vulnerable. Si R val 3, la resta de zona és de vulnerabilitat moderada, ja que hi ha una compensació dels paràmetres: les zones de fort pendent tenen un sòl menys protector i en canvi les zones de fort pendent tenen una cobertura molt protectora. Si R val 4, en la segona versió del mapa de vulnerabilitat apareixen tres zones (Fig. 34), les de feble pendent són de vulnerabilitat major que les de molt pendent. Tot i ser un paràmetre homogeni el que canvia, hi ha variacions en les zones que apareixen en el resultat final degut a que es visualitzen els resultats en intervals fixos.

Metodologia de delimitació de la zona d'alimentació de captacions d'aigua potable i la seua vulnerabilitat enfront de contaminacions difuses

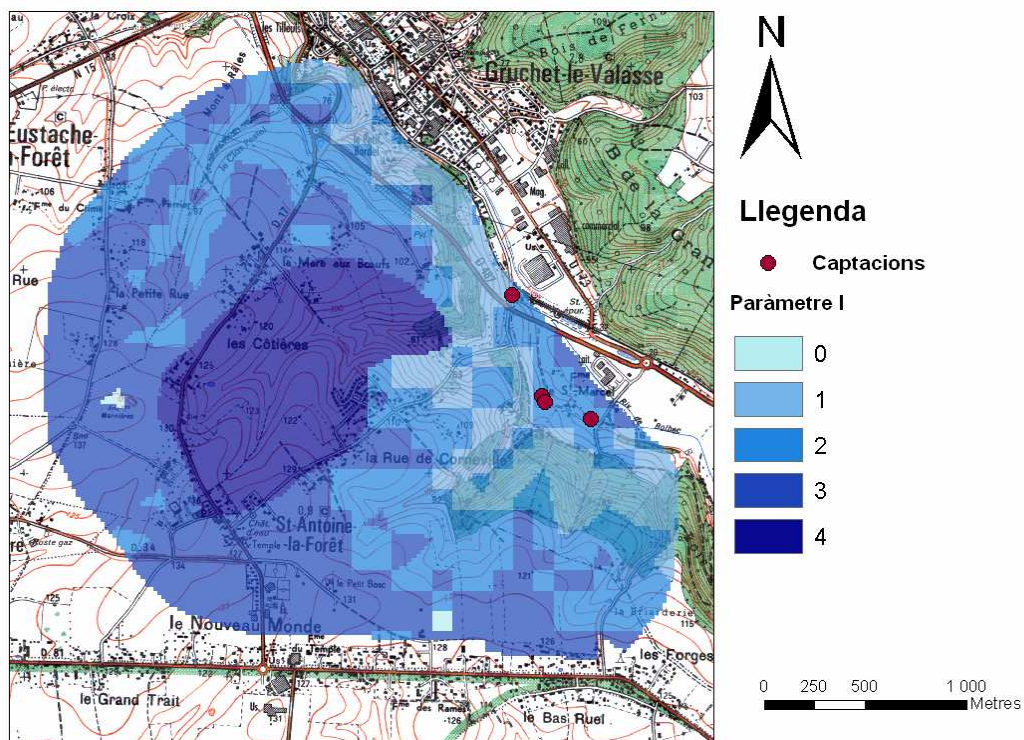


Figura 32: mapa de distribució del paràmetre I per al cas 3.

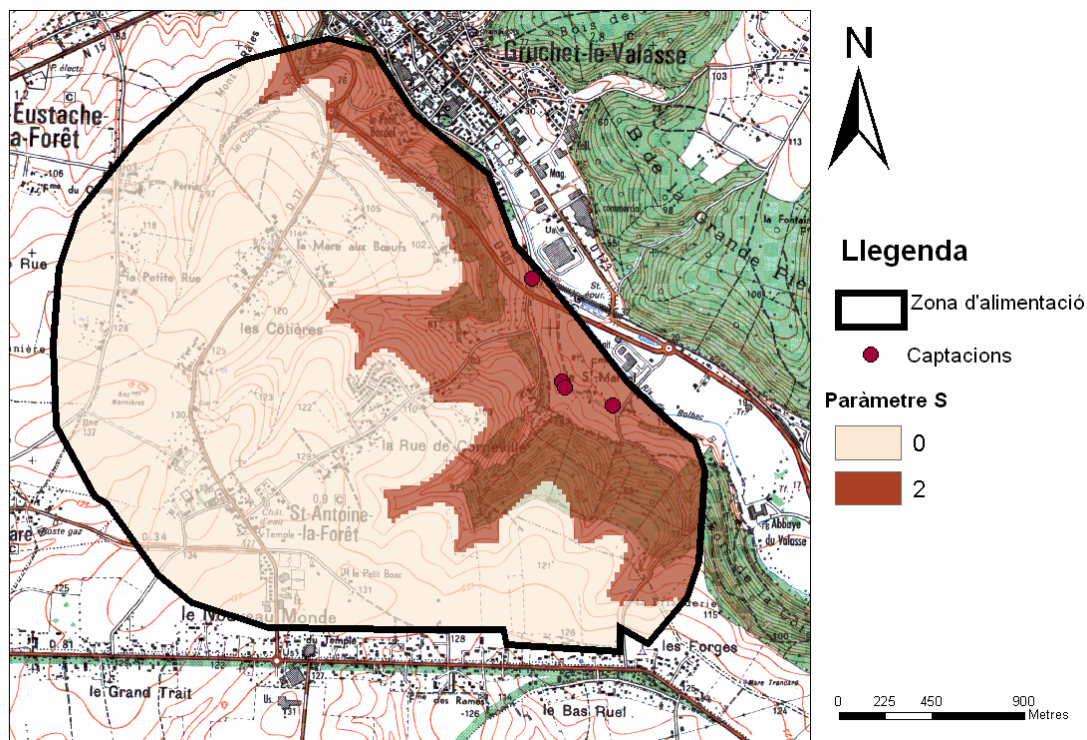


Figura 33: mapa de distribució del paràmetre S per al cas 3.

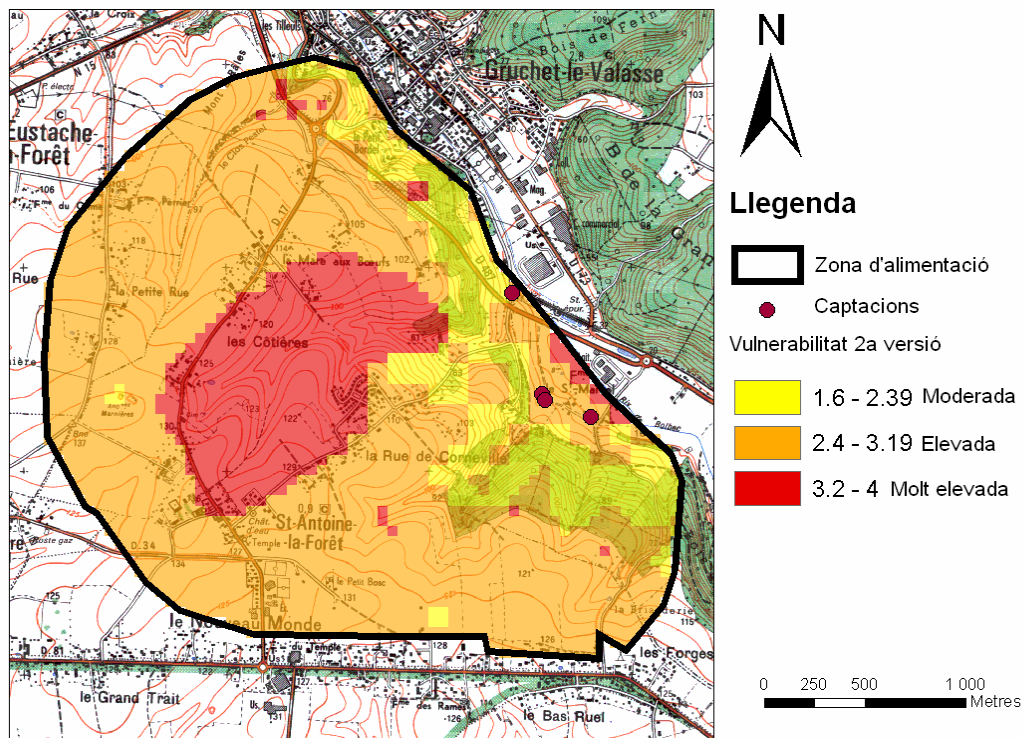


Figura 34: mapa amb el resultat de l'avaluació de la vulnerabilitat de la zona d'alimentació dels pous de St Antoine i la Ferme St Marcel, obtingut per un paràmetre R igual a 4.

- Cas 4: Saint Martin la Garenne.

De tots els casos provats aquest és en el qual s'ha pogut cartografiar un major nombre de criteris. Només el criteri pluja eficaç (P) del mètode de medi continu ha quedat homogeni sobre tota la zona. Es van distingir dos tipus de sòls, a partir d'identificacions sobre el terreny i les informacions d'un mapa pedològic de l'INRA (Fig. 36). La profunditat de la zona saturada es va aconseguir a partir d'una piezometria recent en alt nivell (abril 2003) (Fig. 37). Pel que fa a la permeabilitat (paràmetre K) (Fig. 38) es comptava amb la delimitació de zones de roca més fracturada, determinades a partir d'assajos geofísics on la permeabilitat era més elevada.

Fruit de tanta variabilitat dels paràmetres apareixen moltes zones en vulnerabilitat diferent (Fig. 40). La zona amb un valor molt elevat correspon a zones on l'aqüífer no és molt profund, on el sòl és molt permeable (sòls sorrencs dels al·luvions del Sena) i la formació geològica de la zona no saturada és també molt permeable (terrasses al·luvials). El paràmetre K no sembla ser determinant.

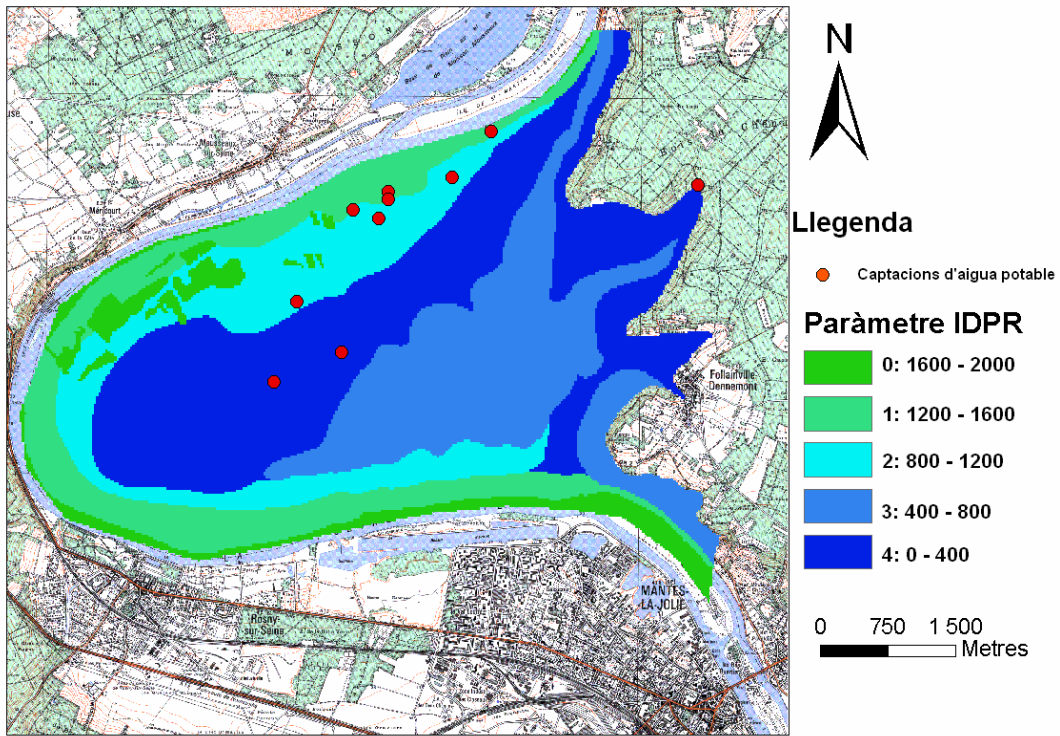


Figura 35: distribució del paràmetre IDPR al cas 4.

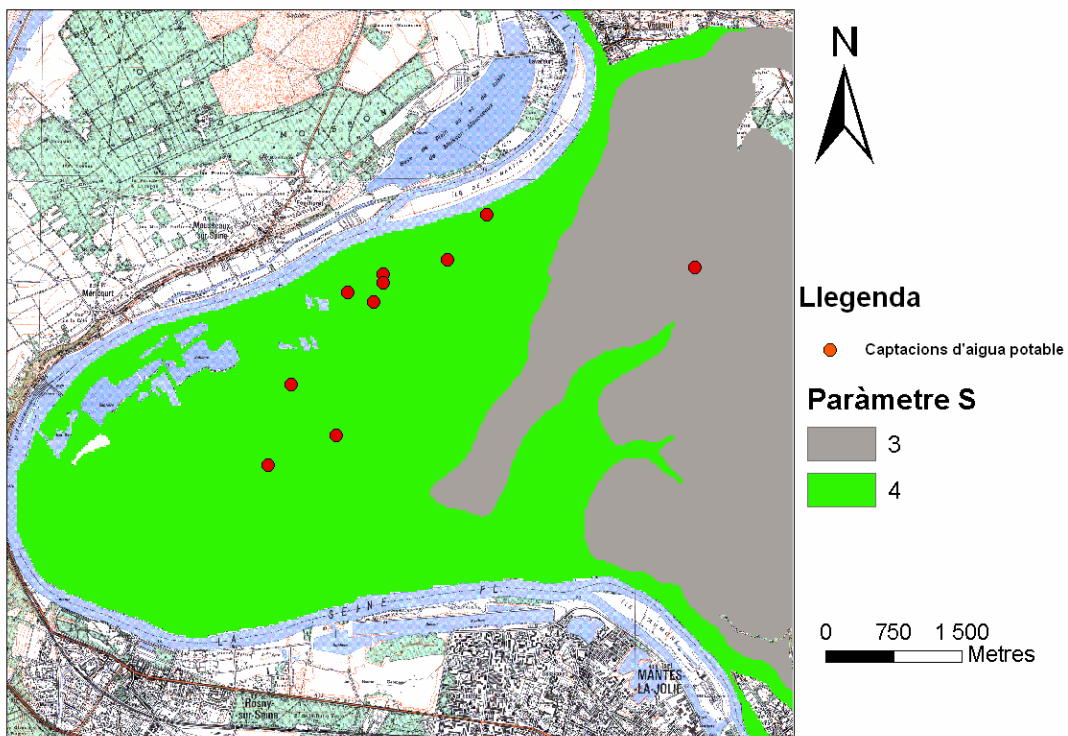


Figura 36: distribució del paràmetre sòl (S) al cas 4.

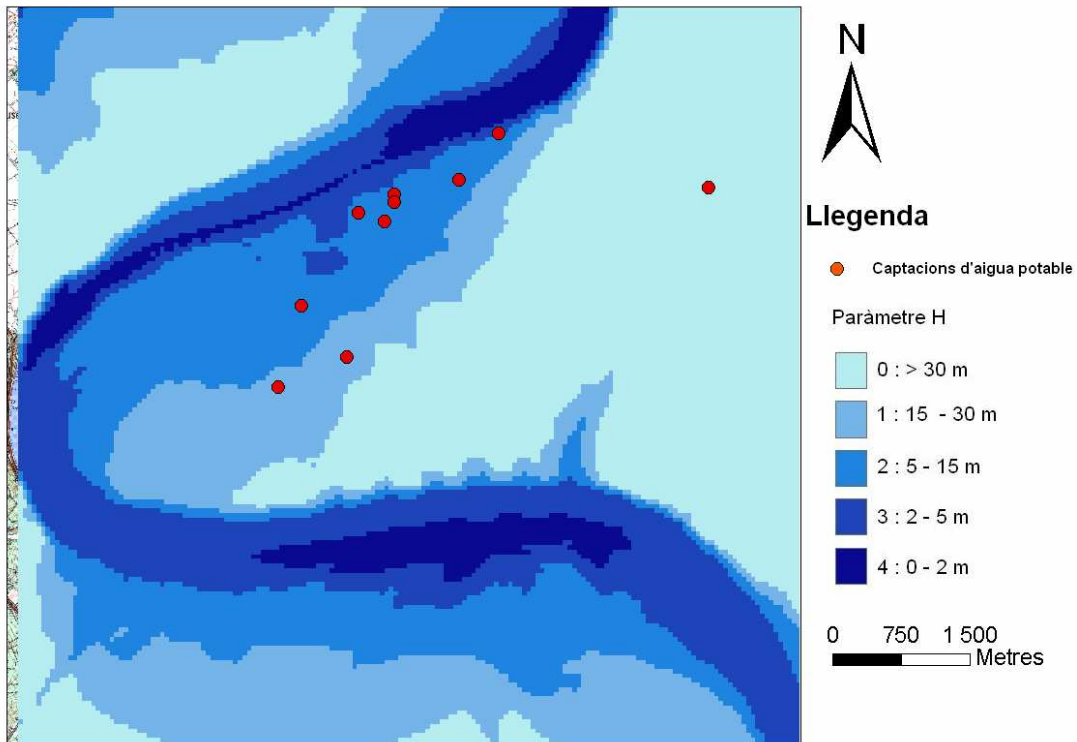


Figura 37: distribució del paràmetre H al cas 4.

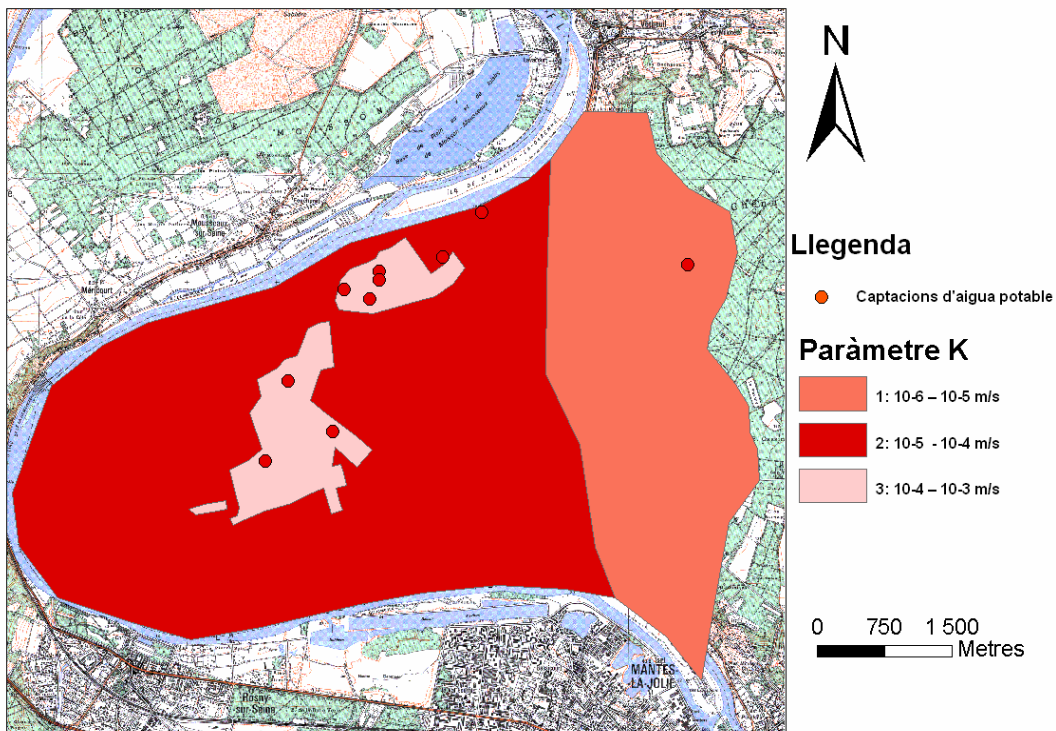


Figura 38: distribució del paràmetre permeabilitat (K) al cas 4.

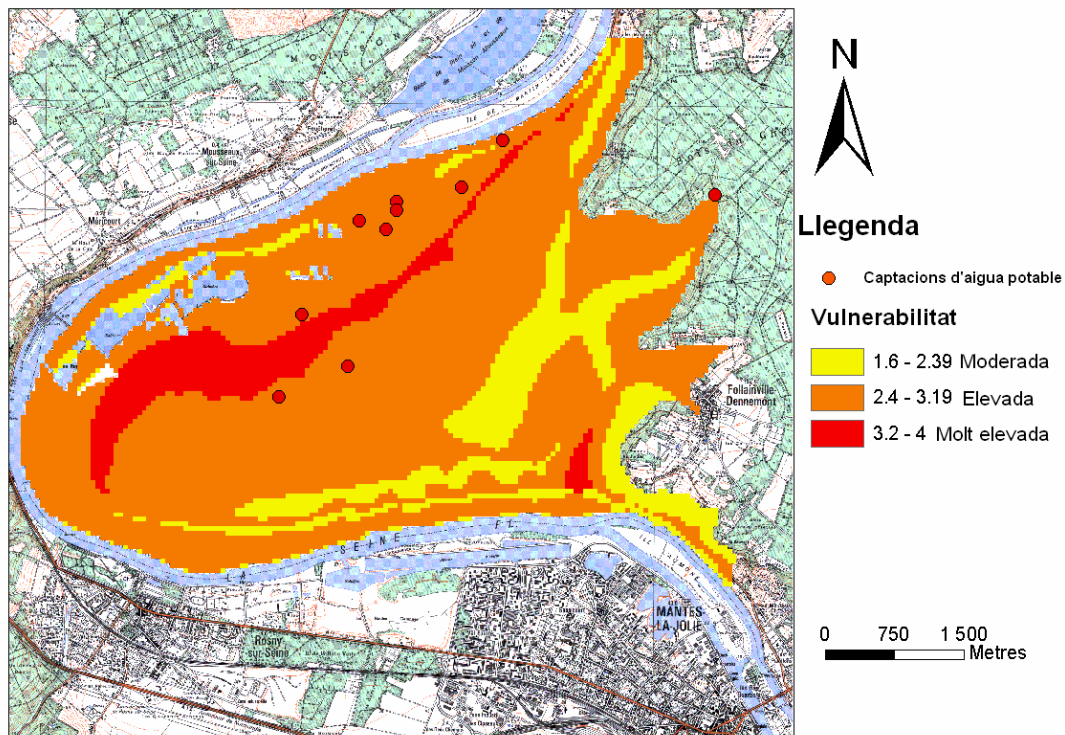


Figura 39 : mapa amb l'avaluació de la vulnerabilitat del aqüífer del meandre de Guernes.

- Cas 5: Nangis.

En aquest cas es va decidir aplicar un mètode híbrid entre el d'un medi continu i un medi càrstic. El primer s'aplicarà a totes les zones excepte a la conca hidrològica del rierol que s'infiltra totalment en un avenc on s'hi aplicarà el mètode càrstic.

Per al mètode en medi continu, novament són els paràmetres H i IDPR els que varien més sobre el sector. La piezometria utilitzada i l'única que era disponible a la zona no estava en una escala massa apropiada, fet que provoca que en la distribució del paràmetre es veguen formes completament quadrades (Fig. 40). Amb el criteri IDPR (Fig. 41) s'ha tingut ben en compte que sobre les formacions geològiques que estan per sobre de les calcàries de Brie ha de valer 0, ja que sobre aquests afloraments l'infiltració va a parar al aqüífer de Brie i no pas al de Champigny. La pluja eficaç, la permeabilitat i el sòl no s'ha pogut arribar a un nivell de detall suficient com per cartografiar-los. El resultat és una vulnerabilitat en general feble sobre els materials del aqüífer de Brie i entre moderat i molt elevat als fons de vall on les calcàries de Champigny són aflorants o subaflorants. La part més vulnerable està a la capçalera de la zona d'alimentació, on coincideix el nivell piezomètric somer amb afloraments de les calcàries de Champigny (zona no saturada permeable).

Sobre la conca del rierol que alimenta l'avenc (Fig. 42), un cop aplicada la metodologia de medi càrstic, la vulnerabilitat global és elevada. El paràmetre infiltració (I) val 4 sobre tot el conjunt, i tant el sòl (S), com carstificació i roca, no s'han pogut espacialitzar, de manera que la vulnerabilitat és la mateixa sobre tota la zona.

Al final ambdues vulnerabilitats es superposen en un mateix mapa, amb el mateix codi de colors (Fig. 43).

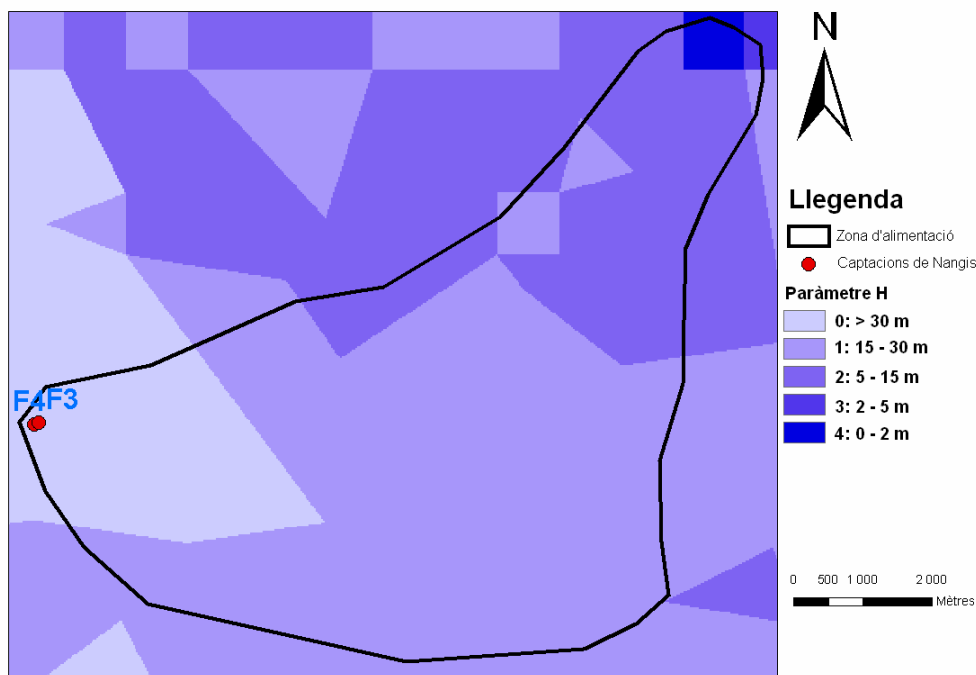


Figura 40: distribució del paràmetre H per al cas 5, a Nangis.

Metodologia de delimitació de la zona d'alimentació de captacions d'aigua potable i la seua vulnerabilitat enfront de contaminacions difuses

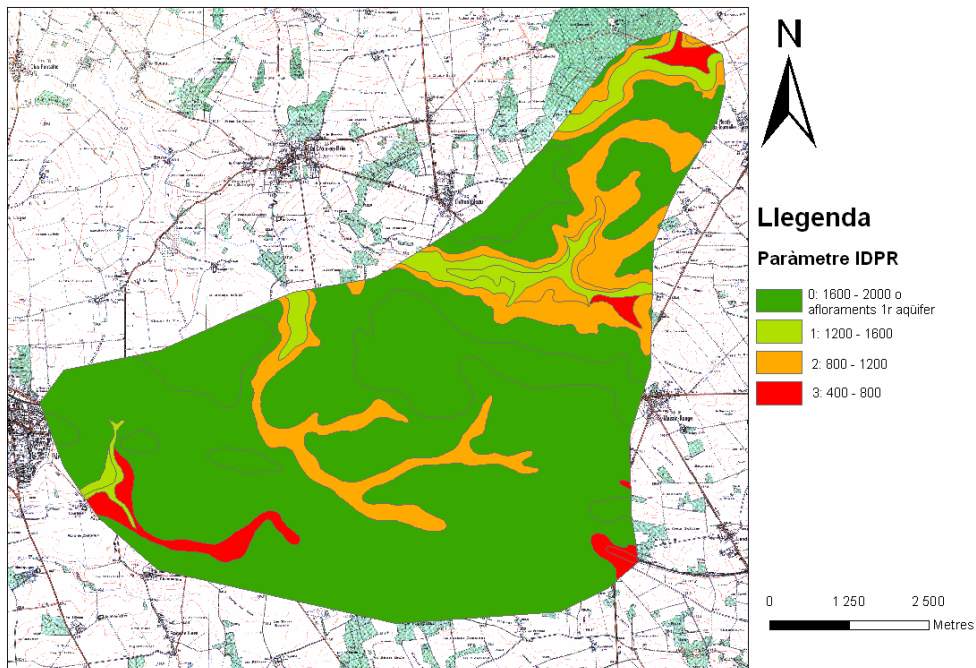


Figura 41: distribució del paràmetre IDPR per al cas 5, a Nangis.

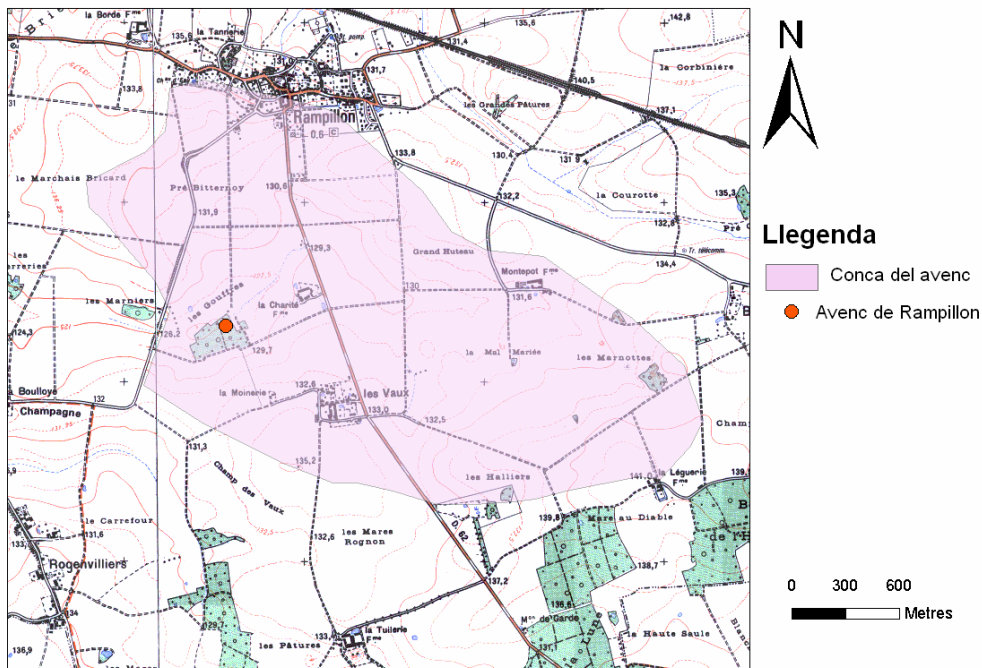


Figura 42: mapa de la conca del rierol que alimenta l'avenc de Rampillon. En aquesta conca s'aplica una metodologia corresponent a un medi càrstic.

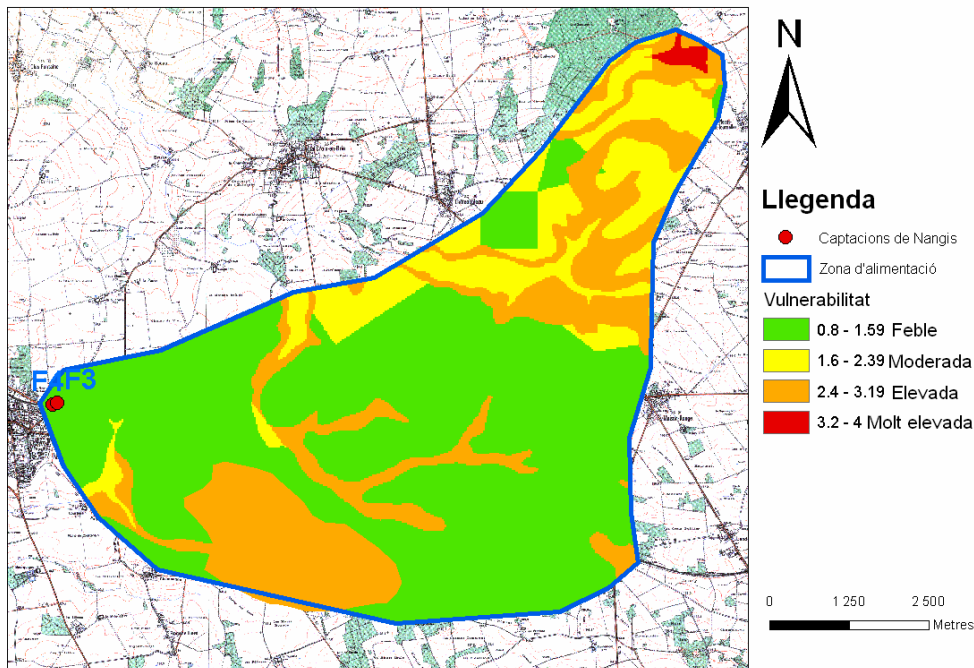


Figura 43 : mapa amb el resultat de l'avaluació de la vulnerabilitat del sector de Nangis.

- Cas 6: Rupt aux Nonains.

En el cas d'aquestes surgències s'ha aplicat un mètode d'avaluació en medi càrstic, amb dos paràmetres variables i dos de constants. Pel sòl (S) (Fig. 44) es comptava amb les informacions d'un mapa de sòls regional, que hi diferenciava tres tipus sobre el sector, ben correlacionats amb la litologia. A més a més en la visita de camp es van veure perfectament en sodejos pedològics aquests tres tipus de sòl. El criteri infiltració (I) (Fig. 45) es basa en el pendent i en les alimentacions localitzades. Apareix una gran superfície que estarà indexada amb un 4, que correspondrà a tota la conca del riu que s'infiltra parcialment en un punt i que apareix posteriorment a les surgències. Els paràmetres K i R són constants i s'han fet dos versions del resultat, una per a R=3 i per a R=4.

El resultat de la vulnerabilitat final dóna una gran zona amb vulnerabilitat molt elevada, la que correspon a tota la conca del rierol (Fig. 46). La superfície d'aquesta zona és de 260 km². Es tracta d'una superfície massa gran en la que no s'hi arriba a identificar cap zona més vulnerable que una altra. Totes les activitats agrícoles i ramaderes situades en aquesta conca són susceptibles d'afectar la qualitat per igual. La resta de zona d'alimentació té una vulnerabilitat entre moderada i elevada, segons el pendent i el sòl.

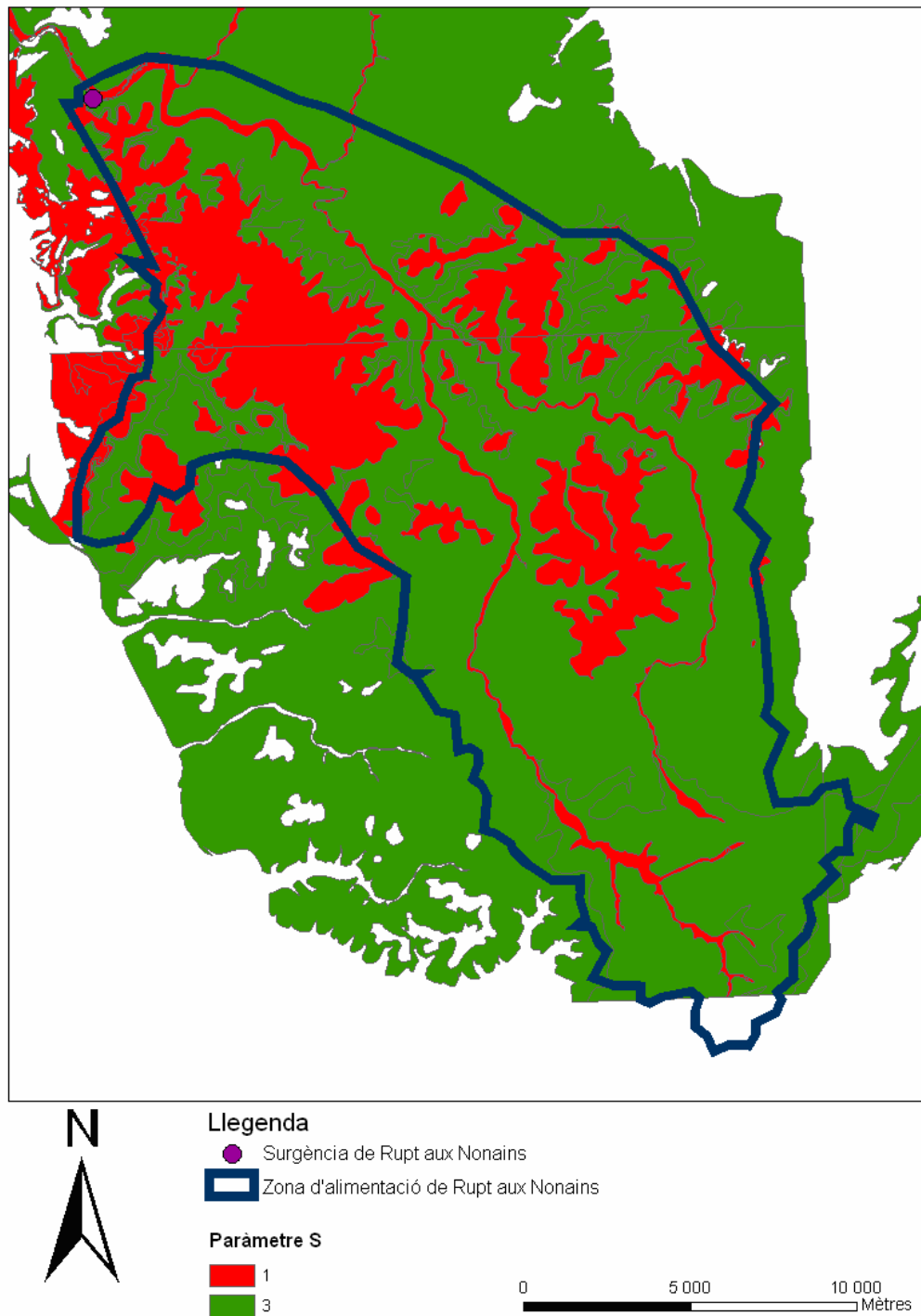


Figura 44: mapa de distribució del paràmetre sòl (S) per al cas 6 de Rupt aux Nonains.

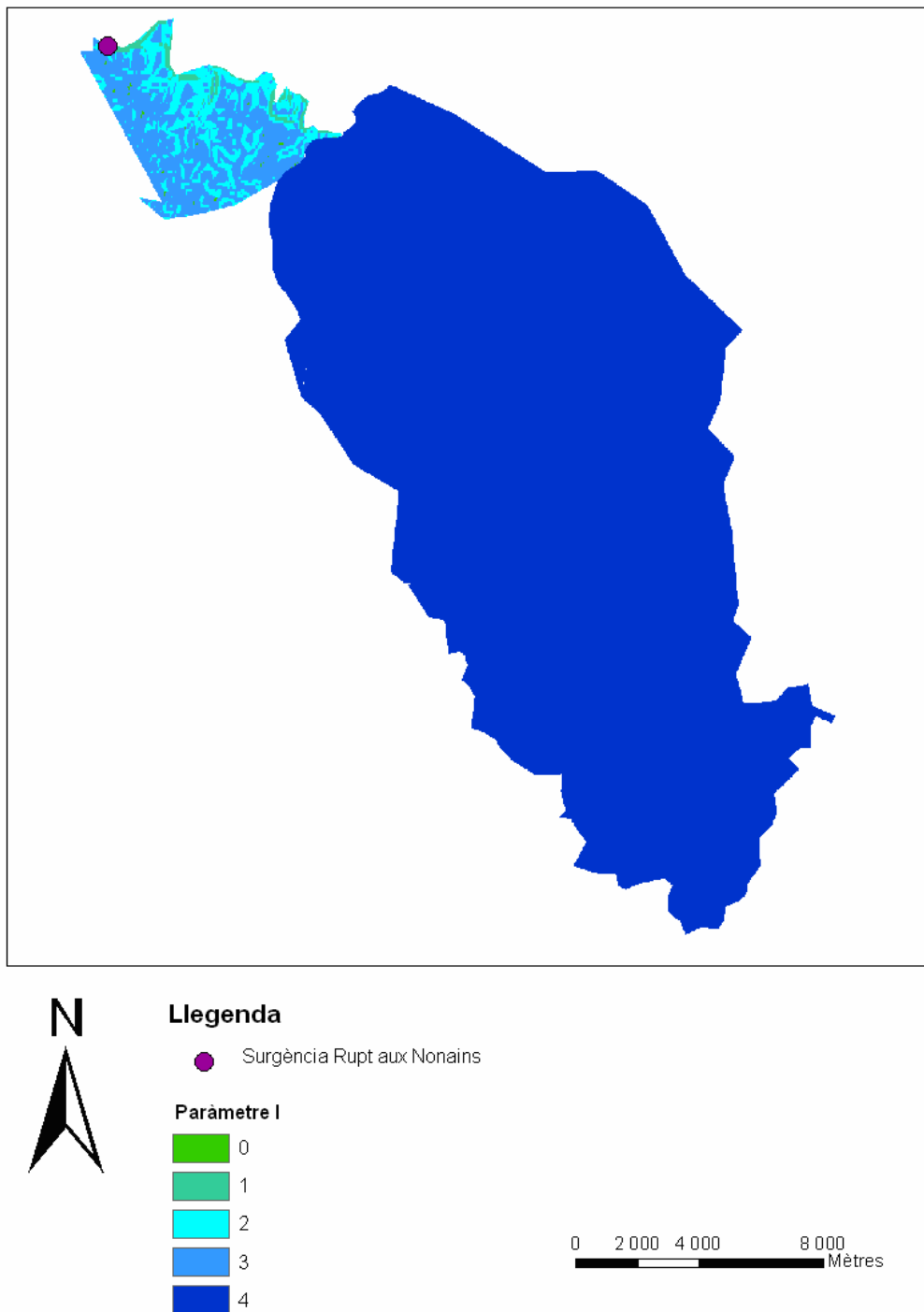


Figura 45: mapa de distribució del paràmetre I per al cas 6, de Rupt aux Nonains.

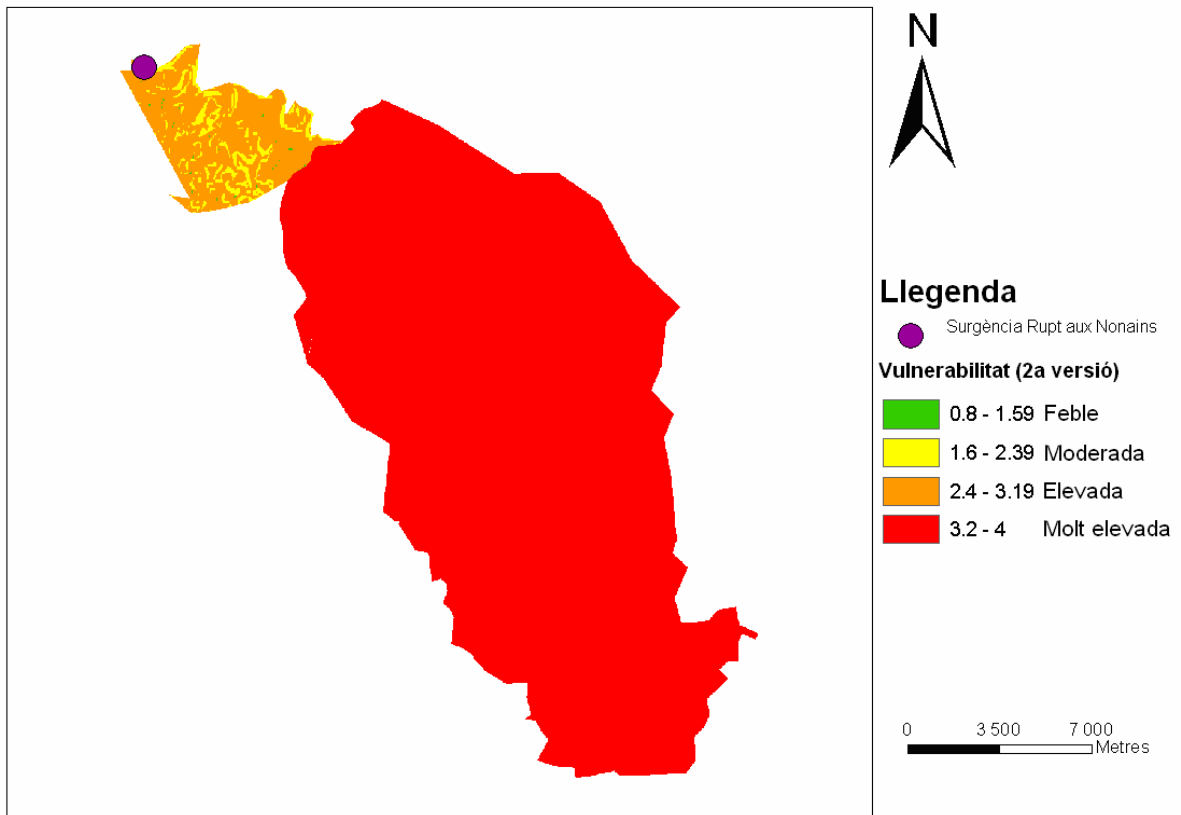


Figura 46 : mapa amb l'avaluació de la vulnerabilitat a Rupt aux Nonains. La segona versió del mapa pren un valor de R=4.

7. Balanç

7.1 Conclusions

En aquest treball s'ha proposat una metodologia de delimitació de les zones d'alimentació de les captacions d'aigua potable i de l'avaluació de la seua vulnerabilitat enfront a contaminants d'origen difús. Aquesta metodologia pren en compte els tres grans medis aquífers: continu, càrstic i fracturat. Per a cadascun d'aquests medis s'aconsellen diferents maneres de delimitar la zona en funció de la complexitat del sistema. L'avaluació de la vulnerabilitat en tots tres medis es fa mitjançant la suma ponderada de diferents paràmetres, tal com ja es fa en alguns dels mètodes més coneguts de cartografia de la vulnerabilitat de les aigües subterrànies, com DRASTIC, SINTACS o RISKE.

Els resultats en l'aplicació de la metodologia en casos reals mostren els següents comentaris.

El nombre i la qualitat de les dades de partida són la peça principal d'un bon estudi de vulnerabilitat. Per tant la campanya sobre el terreny és bàsica, fins i tot en casos on es disposa d'una bona base de referències. Aquesta metodologia no ha de prendre's com una espècie d'automatisme on s'introdueixen una sèrie de capes en format SIG i en surt una vulnerabilitat final. El raonament i la justificació de cada decisió en cadascun dels passos és fonamental, així com una mirada crítica en les referències i en els resultats.

L'elecció del medi no ha de ser un simple tràmit que es resol ràpidament. En el transcurs del treball algunes eleccions fetes a priori, basant-se únicament en la litologia i en algunes característiques generals, finalment han estat errònies.

La delimitació de la zona d'alimentació està subjecta a un gran nombre d'incerteses. És molt costós arribar a un nivell de detall que permeti conèixer en precisió tot els elements que hi intervenen.

La consideració dels efectes de la dispersió hidrodinàmica dins del aquífer és important de cara a veure des de quines zones i en quina magnitud es poden trobar partícules contaminants a les captacions explotades. Amb una delimitació purament convectiva ens podem restringir a una zona massa petita. El problema que posa la dispersió és que per tenir-la correctament en compte cal fer sempre modelitzacions numèriques. Per tant cal anar amb compte amb les delimitacions de la porció d'aquífer alimentant les captacions fetes amb solucions analítiques o gràfiques. Com no sempre seran possibles les modelitzacions numèriques (falta de recursos, de temps, etc.) seria aconsellable que en els mètodes no numèrics es tingués en compte d'alguna manera la dispersió. Per exemple amb l'aplicació Excel per calcular una solució analítica es proposa un coeficient d'ampliació de l'amplada de la porció. Aquest coeficient no ha estat suficientment contrastat i és només una possibilitat. La

determinació d'un camp de probabilitats de que les partícules de contaminant arribin a la captació no s'ha plantejat dur-la a la pràctica en aquest treball ja que n'augmenta molt la complexitat.

En els casos de medis càrstics i fracturats esdevé fonamental com a eina per la delimitació de la zona d'alimentació els assajos de traçadors. Ells determinen si existeix connectivitat entre els punts d'injecció i la captació i en quina mesura.

Com a tònica general dels sis casos, els resultats en l'avaluació de la vulnerabilitat seran més rics com més dades i variabilitat en els paràmetres d'entrada hi hagi. En els casos de medi continu són l'IDPR i la profunditat de l'aquífer els dos paràmetres que sempre varien. En certa forma es torna a l'avaluació de vulnerabilitat de les aigües subterrànies que ja es fa a partir d'aquests dos paràmetres pel BRGM i que ha estat explicada en l'apartat 3.2.4. En el mètode de medi càrstic és el paràmetre infiltració el que sempre varia i que acaba sent cabdal en el resultat.

S'han tractat de la mateixa manera les zones d'alimentació petites i les grans, intentant adaptar la mida del pixel a la de la zona. En el cas de Kernilis, amb una zona molt petita de vora 40 ha, ha estat difícil fer una espacialització dels paràmetres sent el resultat final una vulnerabilitat quasi igual en tot el conjunt. Possiblement en les captacions alimentades per una zona molt petita en un medi homogeni es donarà sovint el cas de trobar febles diferències en la vulnerabilitat.

El cas de Saint Martin la Garenne ha posat de manifest un problema, havent-hi una recàrrega del sistema per un curs fluvial no té massa sentit prendre la seua conca hidrològica dins de la zona d'alimentació. S'ha d'acceptar que l'aigua que s'infiltra dins del aquífer provenint del riu - en aquest cas el Sena - té una qualitat determinada i des del punt de vista de les mesures agroambientals a prendre es tracta d'una altra problemàtica, corresponent a la contaminació de les aigües de superfície. Un cas diferent pot ser el d'aigües d'escolament superficial que després d'un curt recorregut s'infiltra en l'aquífer. Aquestes zones sí que podrien formar part de la zona d'alimentació, donant-se'ls-hi la vulnerabilitat corresponent a la zona on van a infiltrar-se.

La metodologia de medi càrstic i fracturat sí que contempla una avaluació de la vulnerabilitat per a les conques dels cursos d'aigua que alimenten els sistemes subterrànies. El que s'ha observat en els tres casos de medi càrstic és que és ben difícil trobar-hi grans diferències de vulnerabilitat dins de les conques versants dels punts d'infiltració localitzada. Per tant es torna al que es comentava anteriorment, cal considerar aquestes zones com sensibles en el seu conjunt. En el cas de petites conques (casos 2 i 4 per exemple) encara poden aplicar-se mesures front a la contaminació difusa. En canvi, quan la superfície de la conca esdevé més gran, el problema torna a ser de contaminació d'aigües superficials, on s'ha d'actuar d'una altra manera.

El mètode d'avaluació de la vulnerabilitat en medi fracturat no ha estat provat. El pou que teòricament havia de ser d'aquest medi, el de Kernilis, finalment s'adequava millor a un medi continu. La metodologia per als medis fracturats, tot i estar basada en el mètode DISCO i semblar lògica, ha de prendre's en cautela fins que hagi estat provada en un cas real.

Sempre s'ha treballat en mètodes d'avaluació de la vulnerabilitat intrínseca, que són independents de la natura dels contaminants. Per al cas dels productes fitosanitaris usats en l'agricultura, la composició del producte així com certes propietats del sòl no tingudes en compte en aquest treball juguen un paper molt important. Si aquest treball no ha entrat a fons en aquest aspecte referent als fitosanitaris ha estat perquè properament ja es presentarà un projecte comunitari relacionat, el FOOTPRINT, que donarà una eina d'avaluació del risc de contaminació de pesticides. La metodologia ací proposada podrà afegir i adaptar els criteris FOOTPRINT.

De manera global la metodologia ací descrita ha de permetre jerarquitzar sobre la zona d'alimentació les accions agroambientals a emprendre per tal de protegir l'aigua explotada de contaminants no desitjats.

En els informes previs facilitats per l'AESN ja s'observa com alguns criteris aquí considerats ja eren sovint emprats en l'avaluació de la vulnerabilitat. El problema és que poc tenien a veure la manera d'avaluar-lo en un cas i en un altre, sense haver-hi un patró clar. La metodologia aquí proposada ha représ precisament aquests paràmetres ja utilitzats i ha intentat ordenar-los d'una manera que a partir d'ara puguin ésser aplicats de manera igual.

7.2 Perspectives

A continuació es comenten alguns dels aspectes en els quals caldrà anar una mica més enllà de cara a polir aquesta metodologia. Si no s'ha fet en aquest treball ha estat bé per manca de temps, bé per escapar als propis objectius del treball o a les competències del BRGM. Nogensmenys cal fer-ne esment.

El mètode proposat per a un medi fracturat no ha pogut ésser aplicat en cap cas. Lògicament això fa que el que es proposa per a aquest tipus de medi hagi d'estar subjecte a una visió cautelosa. Convindria en un futur aplicar-la a un cas concret.

La delimitació de la porció d'aquífer que alimenta la captació que prengui en compte els efectes de la dispersió bàsicament obliga a modelitzacions numèriques. Un aspecte en el que es podria aprofundir és el coeficient d'amplificació que s'ha aplicat en la solució analítica. La correlació entre aquest coeficient i la dispersivitat no ha estat provada.

Un pas més enllà en el mètode seria aplicar-lo de manera sencera com si fos un vertader estudi de vulnerabilitat, és a dir, fer a més a més un anàlisi de la

vulnerabilitat del sistema enfront als pesticides amb l'eina Footprint i després afegir com a criteris l'ocupació del sòl i un mapa del catastre. D'aquesta manera s'obtidrien al final les parcel·les més vulnerables de la zona, que és el que en definitiva importa de cara a emprendre mesures agroambientals.

El factor temps no ha estat considerat en la metodologia, és a dir, si un contaminant entra al sistema tant és el temps que li costa en arribar a les captacions, el problema és que hi ha entrat. Això no evita que per exemple, a l'hora d'aplicar-hi mesures, es prioritzi en les zones més properes a les captacions.

Finalment resta en mans de l'AESN i del ministeri de Medi Ambient francès l'establir com serà utilitzada aquesta metodologia.

Bibliografia

- Agence de l'Eau Rhône – Méditerranée et Corse, AERMC. *Guide technique n°3: Connaissance et gestion des ressources en eau souterraine dans les régions karstiques, collection des notes et guides techniques du SDAGE Rhône-Méditerranée-Corse*. 1999.
- AQUI'Brie. *Extrait provisoire de la délimitation du BAC de Châtelet en Brie et leur vulnérabilité*. Juny 2007.
- Bear, J.; Jacob, M. *On the movement of water bodies injected into aquifers*. Journal of Hydrology 1965, vol. 3, p. 37-57.
- Bussard, T. *Méthodologie de dimensionnement des zones de protection des captages d'eaux souterraines contre les polluants chimiques persistants*. Tesi doctoral, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- Castany, J; Margat, J. *Dictionnaire français d'hydrogéologie*. BRGM, 1977.
- Carrera, J. *Repaso de conceptos básicos de matemáticas necesarios para establecer balances*. Apunts de l'assignatura d'Enginyeria geoambiental de l'ETSECCPB del curs 2005/2006. Disponible a: <http://www.h2ogeo.upc.es/Docencia/Mec%E0nica%20de%20Acu%EDferos%202008/Tema1-RepasoMates.ppt>
- Carrera, J.; Neuman S.P. El Problema Inverso de la Hidrología Subterránea: Estado del Arte y Método de Solución. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 2(1), pp. 3-25, 1986.
- Chiang, W.; Kinzelbach, W.; Rausch, R. *ASMWIN help*. ETH Zurich 1998.
- Comité de pilotage du projet, BRGM – AESN – Ministère de l'environnement. Reunió juny 2007.
- Corbier, P.; Mardhel, V. *Carte de vulnérabilité simplifiée des bassins versants de la région Pays de la Loire. Rapport final*. BRGM 2003. BRGM/RP-53106-FR.
- Desprats, J.F. et al. *Voirie départementale et la protection de la ressource en eau*. En curs de publicació, BRGM 1998.
- Dörfliger, N. *Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer test analysis and multiattribute vulnerability mapping*. Tesi doctoral, Universitat de Neuchatel, 1996.

- Dörfliger, N. *Proposition d'une methodology d'évaluation de la vulnérabilité en milieu fissuré et karstique*. Document de treball, 2007.
- Dörfliger, N.; Jauffert, D.; Petit, V.; Loubier, S. *Cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques en Franche-Comté. Rapport final*. BRGM, 2004. BRGM/RP-53576-FR.
- Dubus, I. *The EU-funded FOOTPRINT project. Developing functional tools for pesticide risk assessment & management*. BRGM 2007 [consulta 5 de novembre 2007], disponible a: www.eu-footprint.org.
- Equilbey, E. *Pilote de l'inventaire historique régional Haute-Normandie des bétouilles, itinéraires sous terrains des eaux (traçages) et exutoires. Rapport final*. BRGM, juny 2003. BRGM/RP-52423-FR.
- Infoterre. *Base de données du sous-sol*. [Consultes juny – agost 2007] disponible a: <http://www.infoterre.brgm.fr>
- ITGE. *Guía metodológica para el establecimiento de perímetros de protección a captaciones de abastecimiento urbano*. 1990.
- GISSOL. *Système d'information des sols de France*. INRA. [Consultes juliol 2007] disponible a: <http://www.gissol.fr/>.
- Kraemer, R.; Haitjema, H.; Kelson, V. *Working with WhAEM2000 Capture Zone Delineation for a City Wellfield in a Valley Fill Glacial Outwash Aquifer Supporting Wellhead Protection*. US EPA 2005.
- Lallemand-Barres, A; Roux, J.C. *Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. Manuels et méthodes, no 19*; BRGM 1989.
- Mardhel, V; Gravier, A. *Carte de vulnérabilité simplifiée des eaux souterraines du Bassin Seine-Normandie. Rapport final*. BRGM, 2005. BRGM/RP-54148-FR.
- Petelet-Giraud, E.; Dörfliger, N.; Crochet, P. *RISKE: méthode d'évaluation multicritère de la cartographie de la vulnérabilité des aquifères karstiques. Applications aux systèmes des Fontanilles et Cent-fonts (Hérault)*. Hydrogéologie, 2000, vol. 4, p. 71-88.
- Pochon, A; Zwahlen, F. *Délimitation des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré – Guide pratique. L'environnement pratique*. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage. Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne, 2003.

- Seguin, J.J. *Principes de résolution et solutions analytiques de quelques problèmes simples d'écoulements et de transport de masse en milieux poreux saturés et non saturés*. BRGM 2001 [Document intern].
- Suais, M.F. et al. *Vulnérabilité des aquifères, recherche des critères cartographiques pertinentes. Essai de cartographie automatique sur la plaine alluviale entre le Rhone et Ain (01)*. BRGM 1990.
- TERMCAT. *Diccionari de ciències de la terra*. [Consulta 19 de novembre 2007] disponible a: <http://www.termcat.cat> .
- Uffink, G. Application of Kolmogorov's backward equations in random walk simulations of groundwater contaminant transport. KOBUS d, Kinzelbach W, editors. *Contaminant transport in groundwater*. Brookfield, VT: Balkema, A.A. 1989, p. 283-289.
- Vernoux, J.F. *Avaluació del criteri IDPR*. Testimoni oral setembre 2007.
- Vernoux, J.F. ; Wuilleumier, A ; Dörfliger, N ; Seguin, J.J. *Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie*. BRGM, maig 2007. BRGM/RP-55332-FR.
- Vernoux, J.F. ; Wuilleumier, A ; Dörfliger, N. *Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique*. BRGM/RP-55874-FR, setembre 2007.
- Vernoux, J.F.; Wuilleumier, A. *Selecció de paràmetres i pesos per a un medi continu i classificació de la pluja eficaç a França*. Testimoni oral, reunió setembre 2007.
- Viquipèdia. *Karst*. [Consulta 15 d'octubre 2007] disponible a <http://ca.wikipedia.org/wiki/Karst>.

Glossari

AESN: fr. *Agence de l'Eau Seine-Normandie*; cat. Agència de l'Aigua de la conca Sena-Normandia.

Assaig de traçadors: mètode per posar en evidència una xarxa de drenatge subterrània per injecció d'aigua mesclada amb un traçador. Les tècniques usen colorants fluorescents (uranina, fluoresceïna, rodamina, leucofore, piranina, etc.), a espores de lycopodium o compostos químics com el clorur de sodi.

Avenc: cavitat oberta en un terreny calcari per dissolució i eixamplament d'una fissura, generalment en forma de pou vertical o subvertical.

Balanç hidrològic : diferència entre l'aigua rebuda en forma de precipitació i l'aigua perduda per evaporació, evapotranspiració, escorriment i emmagatzematge en una regió determinada.

BRGM : fr. *Bureau de Recherche Géologique et Minier*; cat. Gabinet de Recerca Geològica i Minera.

BSS : fr. *Banque des donnés du sous-sol*, cat. Base de dades del subsòl. Es coneix com codi BSS el codi identificatori de cada pou, sondeig, etc.

Carst : regió de roques calcàries o dolomítiques que té una topografia subterrània particular deguda a la dissolució de certes parts del subsòl i al pas de les aigües per les galeries naturals que s'han format d'aquesta manera.

Carstificació : procés particular d'erosió patit per les roques carbonatades (calcàries i dolomies). L'aigua de pluja s'infiltra en el sòl on ella assoleix l'acidesa suficient per dissoldre la roca gràcies al carregar-se de CO₂.

Cobertura protectora: capes de sòl i subsòl situades sobre la capa aquífer. L'efecte protector d'aquesta capa depen del seu espessor, però sobretot de la seua composició, els materials més fins retenen més l'aigua que no pas els materials grollers o fracturats. La terra vegetal ofereix una bona protecció.

Conca hidrològica: conjunt de punts del terreny inclinats cap a un mateix curs d'aigua, abocant-hi les seues aigües d'escolament superficial.

Conca subterrània o conca hidrogeològica : part d'un aquífer, simple o complex, on les aigües subterrànies s'escolen cap a una mateixa sortida o grup de sortides. Està delimitat per una línia divisòria d'aigües.

Dolina: depressió circular o el·líptica, generalment menys profunda que llarga, situada a la superfície de roques solubles, com la calcària. És el resultat de la seua dissolució química.

EPA: ang. *Environnement Protection Agence* (EUA); cat. Agència de Protecció del Medi Ambient.

Epicarst : part superior d'un sistema càrstic que reuneix les aigües d'infiltració en un aqüífer penjat local i discontinu. Drena l'aigua cap avall bé sigui mitjançant les cavitats més grans de manera ràpida bé per les cavitats de petites dimensions de manera més lenta.

Escorriment o escolament superficial: part de l'escolament de l'aigua de precipitació atmosfèrica que no ha penetrat al sòl o al subsòl.

Evapotranspiració potencial (ETP): quantitat màxima d'aigua que podria evaporar-se per evapotranspiració en el cas d'un sòl cobert per una capa vegetal en ple desenvolupament i que, a més, disposés d'una reserva hídrica suficient.

Evapotranspiració real (ETR): quantitat d'aigua efectivament evaporada per evapotranspiració en condicions normals de desenvolupament de la capa vegetal i de disponibilitat hídrica.

Evapotranspiració: Procés consistent en l'absorció de vapor d'aigua per part de l'atmosfera resultant de la suma de l'aigua evaporada pel sòl i de la transpirada per les plantes. S'exprimeix normalment en alçada mitjana evaporada sobre una superfície donada en un període de temps determinat.

IGN: fr. *Institut Geographique National*; cat. Institut Geogràfic Nacional de França, organisme encarregat de la cartografia topogràfica a França.

Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) : mètode d'anàlisi multicriteri que permet avaluar la capacitat intrínseca del sub-sòl a deixar infiltrar o escolar-se en superfície les aigües de pluja. Es basa en la comparació d'una xarxa hidrogràfica teòrica i la xarxa hidrogràfica real condicionada per la geologia.

Infiltració : fenomen de pas de l'aigua (o d'un altre fluïd) a través de la superfície del sòl, penetrar-hi i moure's a través de la zona no saturada.

INRA: fr. Institut National de Recherche Agricole; cat. Institut Nacional de Recerca Agrícola.

MDT: Model Digital del Terreny.

MNT: fr. *Modèle Numérique du Terrain*; cat. MDT.

NGF: fr. *Nivellement général de la France*; cat. Anivellació general de França. Es refereix a la cota topogràfica 0 de França. A l'estat espanyol seria l'equivalent dels metres sobre el nivell del mar a Alacant. A l'estat francès es distingeixen dos xarxes, l'una coneguda com IGN69 és vàlida a França metropolitana i té el seu nivell zero al mareòmetre de Marsella i l'altra, IGN78, és vàlida per a l'illa de Còrsega i té el seu nivell zero al mareòmetre d'Ajaccio.

Pèrdues: lloc on un curs d'aigua, permanent o temporal, desapareix naturalment totalment o parcialment, dins del subsòl.

Pluja eficaç: quantitat d'aigua facilitada per la pluja que resta disponible a la superfície del sòl, després de la substracció de les pèrdues per l'evapotranspiració real.

Sòcol: conjunt de roques antigues i més aviat rígides que es consideren el substrat d'una cobertora en una àrea determinada.

Surgència : eixida a l'exterior de l'aigua infiltrada en qualsevol sistema hidrogeològic, o de l'aigua absorbida en un carst, per qualsevol conducte subterrani.

Traçador: organisme o substància, natural o artificial, que permet l'estudi dels processos físics, químics o biològics del medi on es troben.

Vulnerabilitat específica : vulnerabilitat d'un aqüífer a un contaminant en concret o un grup de contaminants. Pren en compte les propietats dels contaminants i les seues relacions amb els diversos elements de la vulnerabilitat intrínseca.

Vulnerabilitat intrínseca : terme utilitzat per representar les característiques geològiques i hidrogeològiques naturals que determinen la sensibilitat de les aigües subterrànies a la contaminació d'activitats antròpiques. És una propietat general, sense unitats i no mesurable.

Zona no saturada o zona vadosa (ZNS) : representa la zona que hi ha entre la superfície del terreny i el nivell piezomètric. Els intersticis i les cavitats no estan completament plens d'aigua.

Zona saturada o zona mullada: representa la zona situada per sota del nivell piezomètric, on tots els porus estan plens d'aigua.