

LA MODELISATION EN HYDROGEOLOGIE

En cette fin de XXe siècle, la modélisation prend de plus en plus d'importance dans le monde de la géologie, avec des applications de plus en plus étendues. Cela mérite que l'on s'y arrête. Cependant, du fait de l'élargissement croissant de la gamme des modèles, il n'est pas possible de traiter de chacun d'eux. Aussi les pages qui vont suivre étayeront les développements récents de la modélisation en hydrogéologie.

1. Introduction

Un modèle est un outil construit pour représenter une version simplifiée de la réalité. Par exemple, une carte routière représentant un réseau complexe de routes en deux dimensions et suivant une symbolique choisie constitue un modèle de la réalité. Il y a simplification, mais ce modèle permet (normalement) de résoudre le problème posé qui consiste à trouver son chemin.

Des modèles mathématiques représentant l'écoulement des eaux souterraines existent depuis le début du siècle. Tout ensemble d'équations décrivant mathématiquement le processus physique de l'écoulement en milieu souterrain est déjà un modèle mathématique.

Les situations réelles sont cependant tellement complexes que des hypothèses simplificatrices doivent être choisies en vue de construire le modèle : on élabore ce que l'on appelle le modèle conceptuel de la situation réelle que l'on veut simuler.

Les hypothèses nécessaires pour arriver à des équations qui puissent être résolues analytiquement, sont malheureusement très restrictives et amènent à se limiter dans la plupart des cas à des milieux supposés homogènes et isotropes, soumis à des sollicitations et des conditions aux frontières fort simples, avec des paramètres constants. Donc, pour pouvoir représenter des situations plus complexes, on résout le système d'équation du modèle mathématique en approximant ce dernier par un modèle numérique. Depuis les années 60, les moyens informatiques ont évolué de façon énorme permettant l'utilisation de plus en plus courante de modèles numériques devenant de plus en plus puissants (c'est

à dire qu'ils intègrent dans leurs équations de plus en plus de processus complexes, et dans des conditions de plus en plus compliquées).

2. Principales étapes de la modélisation / méthodologie

La méthodologie de la construction d'un modèle peut être résumée par les différentes étapes décrites ci-dessous (cfr figure 1).

(1) Les objectifs et contraintes de l'étude doivent être connus.

(2) La "conceptualisation" ou la construction d'un modèle conceptuel du problème à étudier consiste à choisir les hypothèses fondamentales qui vont sous-tendre toute la modélisation. Il est très important de s'en souvenir lors de l'interprétation des résultats donnés par le modèle. Si des hypothèses inadéquates sont choisies, on tronque la réalité. C'est malheureusement dès le stade de la conceptualisation que sont commises la plupart des erreurs de modélisation. Cette conceptualisation doit être réalisée, si possible, par un hydrogéologue ayant une bonne connaissance des processus physico-chimiques en cours lors de l'écoulement et du transport en milieu souterrain.

(3) La troisième étape consiste à transcrire le modèle conceptuel en un modèle mathématique, ... en équations mathématiques. Le modèle mathématique existera à partir de la définition de la géométrie, des équations exprimant les bilans des quantités extensives considérées (exemple : masse des fluides, des composés, ...), des équations de flux (flux exprimés en fonction des variables d'état), des équations constitutives décrivant les propriétés des différents fluides (exemple : dépendance de la densité et de la viscosité en fonction de la température, de la pression, de la concentration ...), des termes de sources et disparitions, des conditions initiales et des conditions aux frontières décrivant les interactions du

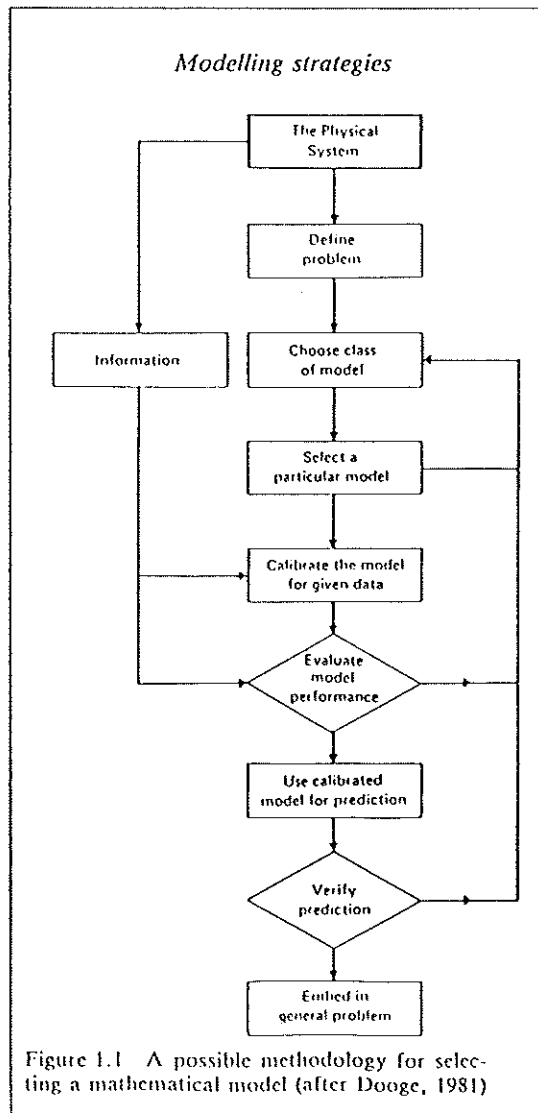


Figure 1.1 A possible methodology for selecting a mathematical model (after Dooge, 1981)

DE MODELISATIE IN DE HYDROGEOLOGIE

Op dit einde van de 20^{ste} eeuw wint de modelisatie meer en meer aan belang in de wereld van de geologie, met steeds meer uitgebreidere toepassingen. Dat verdient enige aandacht. Echter, omwille van de toenemende verruiming van het gamma aan modellen, is het niet mogelijk elk van deze op zich te behandelen. De bladzijden die gaan volgen, zullen eveneens de recente ontwikkelingen aangeven van de modelisatie in de hydrogeologie.

1. Inleiding

Een model is een middel om de realiteit in vereenvoudigde vorm te simuleren, zoals een wegenkaart en complex netwerk van wegen in 2 dimensies volgens een voorgestelde symboliek weergeeft. Hoewel dit een vereenvoudigde voorstelling van de werkelijkheid, is het mogelijk het vooropgestelde probleem op te lossen met dit model.

Sinds het begin van deze eeuw bestaan er mathematische modellen die grondwaterstroming simuleren. Het wiskundig beschrijven van het fysisch gedrag van een grondwaterstroming in de verzadigde zone kan reeds als een mathematisch model worden beschouwd.

De inwerkelijkheid, optredende situaties zijn echter zodanig ingewikkeld dat vereenvoudigende hypothesen moeten worden aangenomen bij het opstellen van een grondwaterstromingsmodel. De reële situatie wordt dus gesimuleerd door een conceptueel model.

De benodigde vooropgestelde hypothesen voor vergelijkingen, die analytisch opgelost kunnen worden, zijn zeer vereenvoudigd. Hierdoor worden in de meeste simulatie homogene en isotrope aquifers verondersteld met sterk vereenvoudigde randvoorwaarden en constante hydraulische parameters. Dus om ingewikkelde hydrogeologische situaties te simuleren, wordt het systeem van vergelijkingen van het mathematisch model benaderd door een numeriek model. Sinds de jaren '60 zijn "soft en hardware" mogelijkheden zodanig geëvolueerd dat het gebruik van numerieke modellen is toegenomen en de numerieke modellen complexer zijn geworden. Dit betekent dat het systeem van vergelijkingen steeds complexere processen en steeds ingewikkelde randvoorwaarden integreert.

2. Belangrijkste stappen in modelopbouw/plan van aanpak

Het plan van aanpak voor het opstellen van een model kan worden samengevat in de hieronder beschreven fasen (figuur 1):

(1) De doelstelling en de leemtes in kennis van een studie dienen te zijn uitgewerkt.

(2) De fundamentele uitgangspunten, die het modelleren onderbouwen, dienen te zijn aangegeven: 'conceptualisatie'. Er dient rekening te worden gehouden met de 'conceptualisatie' tijdens de interpretatie van de berekende resultaten door het model. Indien de vooropgestelde uitgangspunten niet in overeenstemming zijn met de werkelijkheid, wordt de werkelijke situatie verminkt. Er dient te worden benadrukt dat juist tijdens de 'conceptualisatie' het merendeel van de fouten in het modelleren wordt gemaakt. Hierdoor wordt aangeraden de 'conceptualisatie' te laten uitvoeren door een hydrogeoloog, die een goede kennis heeft van de fysico-chemische processen, die optreden bij grondwaterstroming en stoftransport.

(3) De 3^{de} fase bestaat uit het concept om te zetten in een wiskundig model... in vergelijkingen. Het wiskundig model wordt opgebouwd aan de hand van de geometrie van het studiegebied, de vergelijkingen voor balansen (o.a. massabalansen), de stromingsvergelijkingen (fluxen uitgedrukt in functie van hoedanigheden van de fluida), de vergelijkingen die de eigenschappen van verschillende fluida beschrijven (o.a. de dichtheid, de viscositeit in functie van de temperatuur, de druk enz.), de elementen, zoals bronnen, verdwijngaten, drains, enz., begin- en randvoorwaarden, die de interactie vastleggen tussen het studiegebied en de directe omgeving.

(4) In de praktijk blijkt dat eenvoudige analytische oplossingen niet toepasbaar zijn, aangezien de randvoorwaarden onregelmatig zijn, het milieu heterogeen van opbouw is, in de tijd wijzigende bronbemalingen aanwezig zijn, die verspreid in het studiegebied gelegen zijn. Daarentegen kunnen de belangrijkste eigenschappen van numerieke modellen, die de grondwaterstroming en het stoftransport in poreuze verzadigde en niet-verzadigde zones kunnen oplossen, als volgt worden samengevat:

- het probleem wordt in gediscretiseerde vorm opgelost, zowel in ruimte als in tijd;
- de vergelijkingen van de partiële afgeleiden worden benaderd door algebraïsche vergelijkingen.

(5) Numerieke modellen introduceren fouten ten gevolge van de discretisatie van de oplossing. Deze fouten kunnen worden verkleind door een doeltreffende discretisatie. De discretisatie wordt doeltreffend geacht indien de veroorzaakte fouten verwaarloosbaar zijn in relatie tot de fouten veroorzaakt door andere onnauwkeurigheden. De doeltreffendheid van een discretisatie kan worden beoordeeld door de kwaliteit van oplossingen van verschillende 'klassieke' geohydrologische problemen berekend door numerieke modellen te vergelijken met de oplossingen berekend door bijvoorbeeld analytische technieken. Het gecontroleerde numerieke model dient op positieve wijze deze controles te ondergaan. Hierdoor is de kwaliteit van de 'software' geverifieerd.

domaine étudié avec son environnement.

(4) Dans la pratique, les solutions analytiques ne sont pas possibles car les limites sont irrégulières, le milieu est hétérogène (répartition spatiale des propriétés relatives à l'écoulement et au transport), il existe des termes de source variables dans le temps et répartis dans l'espace, etc... Les principales caractéristiques des modèles numériques permettant la résolution de problèmes d'écoulement et de transport en milieu poreux saturé et non-saturé sont habituellement les suivantes : (a) la solution est trouvée en des points discrets du domaine spatio-temporel, (b) les équations aux dérivées partielles sont remplacées in fine par un système d'équations algébriques, écrites en fonction des variables d'état comme inconnues.

(5) Les méthodes de résolution induisent toujours des erreurs numériques qui peuvent être réduites de façon significative par une discrétisation adéquate, de manière à ce qu'elles soient négligeables par rapport aux autres approximations. Il faut contrôler la qualité des réponses fournies par le modèle numérique sur différents problèmes classiques, résolus par d'autres méthodes (analytiques ou numériques). Le modèle numérique doit en quelque sorte passer de façon positive tous les tests d'une procédure assurant sa qualité : c'est la vérification ou validation du logiciel (code).

(6) Dans le meilleur des cas, les valeurs des paramètres ne sont connues que dans certaines zones locales et l'hydrogéologue doit fournir des estimations pour les autres zones. De plus, bien souvent viennent s'ajouter des "effets d'échelle" lorsqu'un paramètre est mesuré à une certaine échelle et qu'il doit être utilisé dans le modèle à un niveau d'échelle supérieur. Ces constatations démontrent l'obligation de vérifier si les résultats d'un modèle sont réalistes ou non par rapport à la réalité. Cette procédure est appelée "calibration" : elle consiste à minimiser la différence entre mesures et résultats par l'ajustement des données d'entrée jusqu'à ce que le modèle reproduise les conditions du champ mesuré avec un niveau de précision acceptable. Le plus souvent, les données modifiées sont essentiellement les valeurs et répartitions des paramètres, car les autres données résultent de mesures plus fiables.

Cette approche est subjective et requiert de la part de l'hydrogéologue une bonne expérience en la matière et un bon jugement afin d'obtenir finalement une calibration fiable. Il est important de rappeler que les coefficients obtenus à l'issue d'une calibration sont ceux correspondant au modèle utilisé pour le site étudié. Ils dépendent des choix réalisés aux étapes précédentes de la construction du modèle et notamment des hypothèses prises au niveau du modèle conceptuel.

(7) Si différentes valeurs d'un coefficient sont essayées afin de déterminer l'influence de ce

paramètre particulier sur la réponse du modèle, c'est une analyse de sensibilité du modèle qui est réalisée. Ce type d'analyse est réalisé en principe au voisinage immédiat des valeurs optimum des paramètres pour lesquels la calibration a été jugée satisfaisante.

(8) Après la calibration, le modèle est prêt à l'emploi pour des prévisions. C'est l'exploitation du modèle.

3. Exploitation du modèle - Simulations

Le modèle a la capacité de calculer des extrapolations dont les résultats constituent une aide précieuse lorsque des décisions concernant des modifications de sollicitation de l'aquifère sont à prendre. De nouvelles conditions peuvent être essayées dans le modèle par ajustement des données, et les réponses permettent d'estimer les effets engendrés et fournissent donc une base solide de décision. Parmi les applications possibles des modèles d'écoulement et de transport, on peut citer :

- détermination des tendances régionales des écoulements et du transport de contaminant dans le réservoir et les interactions avec les eaux de surface, les autres réservoirs, les puits, etc...
- prédiction des effets du pompage sur la piézométrie et sur la suppression de certains flux;
- prédiction du mouvement de l'interface entre eau douce et eau salée;
- prédiction de l'effet de l'épandage d'eau pompée lors de l'irrigation.
- prédiction des effets dus à l'urbanisation;
- prédiction des changements résultants de l'irrigation ou de l'infiltration en provenance d'un nouveau canal;
- analyse à long terme des influences des tendances climatiques sur les niveaux piézométriques et la distinction des effets dus aux facteurs anthropiques.
- précision de la distribution régionale des paramètres hydrogéologiques (problème inverse).
- rationalisation dans la collecte ultérieure de données par la détermination des mesures les plus nécessaires.
- planning idéal d'exploitation des ressources;
- stockage souterrain saisonnier d'eaux de surface.
- détermination des conditions existantes et futures de contamination;
- détermination des concentrations;
- identification des actions réparatrices à mener et prédictions concernant l'amélioration de la qualité de l'eau;
- identification des mesures "in situ" à réaliser incluant la localisation et le monitoring;
- sélection des sites possibles pour une éventuelle décharge.
- détermination de la concentration dans les eaux de recharge;

Deze controle wordt 'validatie' of 'verificatie' van de software genoemd.

(6) Zelfs in goed bestudeerde gebieden zijn de waarden van geohydrologische parameters slechts in een beperkt aantal deelgebieden bekend en is de hydrogeoloog in staat de waarden van deze geohydrologische parameters te benaderen voor de overige deelgebieden. Tevens treedt het 'schaaleffect' op als moeilijkheid voor een goede inschatting van de geohydrologische parameters. Er bestaat immers geen eenduidige relatie tussen de waarde van een parameter gemeten op een zekere schaal en de toepasbare parameterwaarde in een grondwaterstromingsmodel, gekenmerkt door een andere schaal. Deze vaststelling geeft aanleiding om de berekende resultaten van een model te verifiëren met de gemeten waarden. Deze procedure noemt men ijking. Tijdens de ijking wordt het verschil geminimaliseerd tussen de waargenomen en de berekende waarden (b.v. grondwaterstijghoogten) door de ingevoerde hydraulische parameters te wijzigen. Met grote zekerheid zijn de aangepaste geohydrologische parameters de correcte waarden en geven deze parameters de correcte geografische spreiding. Immers, deze aanpassingen simuleren met een zekere nauwkeurigheid de werkelijkheid. Deze aanpak is subjectief en eist van de hydrogeoloog een gedegen ervaring in het onderwerp en een goede beoordeling. Er wordt opgemerkt dat bij aanvang van de ijking die geohydrologische waarden zijn gekozen, die bepaald zijn tijdens de voorafgaande stappen, voornamelijk tijdens de 'conceptualisatie'.

(7) Fase 7 bestaat uit een gevoeligheidsanalyse. Verschillende waarden van een geohydrologische parameter worden gekozen om de effecten van deze parameter op het grondwatersysteem te bepalen. Deze gevoeligheidsanalyse wordt uitgevoerd om een spreiding in waarden van geohydrologische parameters nader te bepalen.

(8) Na de ijking en de gevoeligheidsanalyse van een geohydrologisch model is het model klaar voor nieuwe situaties te simuleren. In deze fase wordt het grondwaterstromingsmodel gebruikt om toekomstige of historische situaties te simuleren.

3. Gebruik van het model - simulaties

Een model heeft de mogelijkheid nieuwe situaties te berekenen, die aangepaste grondwateronttrekkingshoeveelheden insluiten. Nieuwe situaties kunnen door middel van het grondwaterstromingsmodel worden uitgetest door aanpassing van bepaalde invoergegevens (b.v. onttrekkingshoeveelheden). De resultaten van het aangepaste grondwaterstromingsmodel laten toe de veroorzaakte effecten op de huidige hydrologische situatie in te schatten. Hierdoor kan een grondwaterstromingsmodel als een belangrijk middel voor grondwaterbeheer worden beschouwd. Mogelijke toepassingen van grondwaterstromings- en stoftransportmodellen zijn hieronder aangegeven:

- bepalen van regionale trends van grondwaterstroming en transport van verontreinigingen in een specifiek watervoerend pakket en de interactie met het oppervlaktewater, een ander watervoerend pakket, onttrekkingsmiddelen, enz.;
- voorspellen van de effecten van een grondwateronttrekking op de grondwaterstanden en de grondwaterstroming;
- voorspellen van de beweging en ligging van het zoet-zout grensvlak;
- voorspellen van het effect van irrigatiewerken op het grondwatersysteem;
- voorspellen van het effect van verstedelijking op het grondwatersysteem;
- voorspellen van effecten op grondwaterstromingen en -stijghoogten door de aanleg van een nieuwe kanaal;
- analyseren van de meerjarige klimatologische invloeden op de grondwaterstijghoogten en een onderscheid maken tussen de klimatologische effecten en de effecten veroorzaakt door menselijk ingrijpen.
- geografisch bepalen van hydrogeologische parameters (inverse probleemstelling);
- optimaliseren van een grondwatermeetnet door de meest gevoelige meetpunten te bepalen;
- vastleggen van een goede planning van grondwateronttrekkingen (grondwaterbeheer);
- bepalen van de effecten van tijdelijk opslag van oppervlaktewater in de ondergrond;
- bepalen van de huidige en toekomstige situatie van bodemverontreinigingen.
- bepalen van het huidige en toekomstige concentratieverloop van grondwaterverontreinigingen;
- bepalen van saneringsvarianten om de grondwaterkwaliteit te verbeteren;
- identificeren van 'in-situ' maatregelen, hierbij wordt een monitoringsysteem ingesloten;
- uitkiezen van locaties, die als stortplaats kunnen worden ingericht;
- bepalen van de concentraties aan stoffen in kwelwater;
- identificeren van opties voor grondwaterbeheer;
- bepalen van beschermingszones voor grondwateronttrekkingen.

De te nemen grondwaterbeschermingsmaatregelen worden voorafgegaan door een goed inzicht van het grondwatersysteem. Grondwatermodellen zijn een goed middel om alle beschikbare gegevens van een bepaald grondwatersysteem te integreren en vormen (a) een onmisbaar middel voor een geohydrologische interpretatie en (b) een beslissingsmodel in grondwaterstudies.

4. Beschrijving van grondwaterstromingsmodellen voor poreuze aquifers

Voor de berekening van grondwaterstroming in poreuze aquifers zijn verschillende modellen ontwikkeld, zoals het eindige differentie model en het analytische elementen model. Het berekenen van een grondwaterstromingsprobleem betekent het oplossen van partiële differentiaalvergelijkingen

- identification des options de gestion de l'aquifère;
- détermination de périmètres de protection.

Toute mesure de sauvetage ou de prévention doit être précédée d'une excellente compréhension des conditions existantes. Les modèles mathématiques fournissent un moyen d'intégrer les paramètres d'un tel problème. Ils constituent un outil indispensable pour guider l'interprétation et la ligne de conduite à appliquer dans les cas d'étude.

4. Description des modèles de circulation d'eau pour les aquifères poreux

Pour le calcul de l'écoulement souterrain dans les aquifères poreux, différents modèles ont été développés, tels que les modèles à différences finies, à éléments finis et à éléments analytiques. Le calcul d'un problème d'écoulement d'eau souterraine implique la résolution d'équations différentielles partielles avec des conditions initiales et aux limites pour lesquelles une solution est basée sur deux principes de base, à savoir:

- la loi de Darcy;
- l'équation de continuité (conservation de masse).

Ci-dessous sont comparées les caractéristiques principales des deux méthodes avec leurs avantages et désavantages.

Le principe de base de la méthode des éléments analytiques est une superposition de solutions analytiques standards de différents problèmes hydrogéologiques (Strack 1989). Les problèmes hydrogéologiques peuvent consister en points de captage, points d'infiltration, captages sur une ligne, hétérogénéité de la transmissivité de l'aquifère, etc. Compte tenu que cette méthode résout analytiquement des problèmes hydrogéologiques complexes, la solution est exacte sur l'ensemble de la surface considérée. Ainsi est obtenue une solution exacte du niveau d'eau souterrain comme de son écoulement autour d'objectifs définis tels que des puits, drains, rivières, etc. En se basant sur la propriété d'une solution exacte à chaque échelle, cette méthode analytique peut se distinguer des méthodes numériques, telles les méthodes des différences finies et des éléments finis. Ces méthodes numériques discrétisent le niveau d'eau souterrain et l'écoulement. Le modèle informatique MLAEM, développé par Strack, est basé sur ce modèle à éléments analytiques.

A côté de cela, des modèles numériques ont été développés pour la simulation de l'écoulement souterrain en milieu poreux, tels la méthode des différences finies (MDF) et la méthode des éléments finis (MEF). Les deux techniques abordent les équations différentielles partielles de façon discrète, valable pour un maillage supposé spécifique. Le principe de la méthode des différences finies peut être résumé comme une approximation de la solution des équations différentielles par la résolution d'un problème aux différences finies. Sur

base de la deuxième méthode numérique (MEF), les dérivées partielles sont approchées par une fonction de différence sur un intervalle petit et fini. A l'aide de ces techniques numériques, l'écoulement souterrain peut être simulé "de manière simple" pour des couches homogènes, non-homogènes, perméables et semi-perméables, en 2D ou en 3D, en régime permanent ou transitoire.

5. Modèles appliqués pour les milieux fissurés et karstifiés

L'approche classique utilisée consiste à considérer l'aquifère comme un milieu poreux continu à l'échelle macroscopique en utilisant le concept d'Elément de Volume Représentatif (EVR). Dans un milieu fissuré et à fortiori dans un milieu karstifié, la principale difficulté se situe au niveau du choix d'EVR respectant au mieux la réalité très hétérogène de l'aquifère. Les paramètres décrivant les caractéristiques de l'aquifère (perméabilité, coefficient d'emmagasinement, dispersivités,...) choisis en valeurs "équivalentes" ou moyennes sur l'EVR ne décrivent pas avec précision la réalité. Le manque de précision dans la représentation de la réalité dépend étroitement de l'échelle à laquelle le problème est traité. Il est évident que ces valeurs moyennes des paramètres censées représenter un volume parfois important de l'aquifère sont d'autant peu précises que le problème que l'on veut résoudre est local. Cependant, les échelles locale et régionale sont des définitions relatives. Malgré ces inconvénients, cette méthode est toujours la plus utilisée pour des simulations d'aquifères fissurés et faiblement karstifiés. Dans ces modèles, des valeurs très contrastées des paramètres doivent pouvoir être introduites dans des cellules ou éléments voisins. Dans certains cas des éléments finis particuliers sont développés comme par exemple des éléments conduits (1D) et des éléments "plans de failles" (2D plan).

L'hypothèse de continuité peut dans certains cas être très difficile à accepter, des modèles où les conduits et fissures sont représentés explicitement sont alors choisis. Il s'agit de l'approche "discrète" qui nécessite évidemment de disposer de nombreuses données (géométries, ouvertures, rugosités, remplissages,...) pour chaque fissure ou conduit pris individuellement, et toutes ces données doivent être localisées dans l'espace à 3 dimensions. En pratique, ces modèles sont rares et uniquement relatifs à des situations très locales. Une combinaison d'un modèle "discrète" et d'un modèle classique (EVR) pourrait permettre de représenter explicitement les fissures et les conduits tout en considérant la matrice de la roche comme un milieu poreux.

Une autre approche consiste à générer statistiquement un nombre important de milieux poreux équiprobables et statistiquement équivalents au milieu fissuré ou karstifié étudié. Sur base de toutes les données disponibles, des simulations conditionnelles tentent de reconstituer différents milieux ayant en commun

met begin- en randvoorwaarden, waarbij de oplossing gebaseerd is op twee basisprincipes, namelijk:

- de wet van Darcy;
- de continuïteitsvergelijking (behoud van massa).

Hieronder worden de belangrijkste kenmerken van de twee methoden vergeleken met de desbetreffende voor- en nadelen.

Een superpositie van standaard analytische oplossingen van verschillende geohydrologische problemen is het basisprincipe van de analytische elementen methode (Strack 1989). De geohydrologische problemen kunnen bestaan uit punt- en lijnonttrekkingen, inhomogentiteiten in het doorlaatvermogen van de aquifer, enz. Aangezien deze methode complexe hydrogeologische problemen analytisch oplost, is de oplossing over het gehele studiegebied exact. Zo wordt een exacte oplossing van de grondwaterstijghoogte en -stroming verkregen rondom singulariteiten, zoals putten, drains, rivieren, enz. Uitgaande van de eigenschap dat de oplossing op elke schaal exact is, kan deze analytische methode zich onderscheiden van de numerieke methoden, zoals de eindige elementen en eindige differentie methode. Deze numerieke methoden discretiseren de grondwaterstijghoogte en -stroming. Het computermodel MLAEM, ontwikkeld door Strack, is gebaseerd op dit analytische elementen model.

Daarnaast zijn numerieke modellen ontwikkeld voor het simuleren van grondwaterstroming in poreuze media, zoals de eindige differentie methode (EDM) en de eindige elementen methode (EEM). Beide technieken benaderen de partiële differentiaal vergelijkingen op discrete wijze, geldig voor een specifiek vooropgesteld raster. Het principe van de eindige differentie methode kan worden samengevat als een benadering van de oplossing van partiële differentiaal vergelijkingen aan de hand partiële differenties. Hierbij worden de partiële afgeleiden benaderd door ze uit te drukken als een Taylor-serie in enige dicht bij elkaar gelegen punten. Op basis van de tweede numerieke methode (EEM) worden de partiële afgeleiden benaderd door een verschilfunctie over een klein en eindig interval, bepaald aan de hand van een vaste discretisatie. Met behulp van deze numerieke technieken kan op 'eenvoudige wijze' grondwaterstroming worden gesimuleerd in homogene en niet-homogene watervoerende en scheidende lagen. Tevens kan een niet-stationaire grondwaterstroming worden berekend.

5. Toepasbare modellen voor hard-rock en karstgesteente

Een belangrijk uitgangspunt bij een klassieke benadering van grondwaterproblemen is een op macroschaal continue aquifer. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het concept 'Elementen met representatieve volumes (ERV)'. Voor hard-rock en voornamelijk voor karst-gesteente bestaat de belangrijkste moeilijkheid uit de keuze van deze

ERV-elementen. Deze ERV-elementen dienen zoveel mogelijk de werkelijke heterogeniteit van het watervoerend pakket na te bootsen. De geohydrologische parameters (o.a. permeabiliteit, dispersiviteit, bergingscoëfficiënt) zijn gekozen als gemiddelde waarden of 'equivalenten' voor de ERV-elementen en benaderen slechts globaal de werkelijkheid. Het gebrek aan nauwkeurigheid in het benaderen van de werkelijkheid is sterk afhankelijk van de schaal, waarin het grondwaterprobleem is gesteld. Het is vanzelfsprekend dat gemiddelde waarden voor hydrogeologische parameters, die soms een belangrijk volume van het watervoerend pakket vormen, weinig nauwkeurig zijn. Hierdoor kan een lokaal grondwaterprobleem enkel met een grote onzekerheid worden opgelost. Evenwel zijn lokale en regionale schalen relatieve begrippen. Ondanks deze ongemakken blijft deze methode het meest gebruikt voor simulatie van grondwaterstromingen in hard-rock en karstgesteenten. In deze modellen dienen sterk afwijkende waarden voor hydrogeologische parameters te worden aangegeven in naburige elementen of cellen. Er zijn specifieke eindige elementen ontwikkeld voor deze specifieke problematiek, zoals 'stroom'-elementen (1D) en 'breukvlak'-elementen (2D).

In bepaalde situaties is het continuïteitsprincipe moeilijk toepasbaar, waardoor die modellen worden gekozen, waar breuken en barsten expliciet zijn ingesloten. De gediscretiseerde opbouw van een grondwaterstromingsmodel verplicht de gebruiker alle gegevens van een breuk of barst te ordenen, zoals de geometrie, ruwheid, verzadingsgraad, textuur van een breuk/barst. Deze gegevens dienen in de 3 dimensies te worden geplaatst. In principe zijn deze modellen beperkt toepasbaar op lokale situaties. Een combinatie van een gediscretiseerd model en een klassiek model (ERV) laat het weergeven van barsten en breuken toe waarbij de matrix van de hard-rock als een poreus medium wordt beschouwd.

Een andere benadering bestaat uit het geostatistisch genereren van een aantal poreuze media die statistisch equivalent zijn aan een hard-rock- of karstgebied. Op basis van alle beschikbare gegevens reconstrueren voorwaardelijke simulaties verschillende geohydrologische situaties. Hierbij is het gesimuleerde gedrag conform het geobserveerde. De verschillende poreuze media en de onzekerheid en de spreiding in waarde van elke modelparameter zijn in principe bekend op voorwaarde dat de fouten van de verschillende parameters log-normaal verdeeld zijn (Wet van Gauss). Na het uitvoeren van veelvoudige simulaties, die beantwoorden aan alle milieus, kan de onnauwkeurigheid van de oplossing worden berekend.

Toch blijft het soms moeilijk een toepasbaar model aan te passen in karstgebieden. De belangrijkste reden is steeds het gebrek aan topografische en geometrische gegevens over de belangrijkste karstkloven. In situaties waar te weinig gegevens beschikbaar zijn wordt het

un comportement similaire par rapport à ces données mesurées. Les milieux étant équiprobables, l'incertitude et les intervalles de confiance de chaque paramètre du modèle sont en principe connus moyennant l'hypothèse (souvent admise) que les erreurs commises sur ces paramètres obéissent à une loi log-normale (loi de Gauss). Après la réalisation des multiples simulations déterministes correspondant à tous les milieux générés, l'incertitude de la solution peut en principe être calculée.

Néanmoins, il est parfois difficile d'adopter un modèle physiquement significatif dans les milieux fortement karstifiés. La raison fondamentale en est toujours le manque de données topologiques et géométriques concernant les principaux conduits karstiques. Dans ce cas, des simulations du système karstique considéré comme un tout sont souvent réalisées à l'aide de modèles "boîtes noires" qui sont calibrés sur les observations mesurées. Des fonctions de Kernel, des traitements de convolution, etc... peuvent être utilisés.

6. EXEMPLES

Exemple 1: Captage d'eau 't Klooster (Pays-Bas)

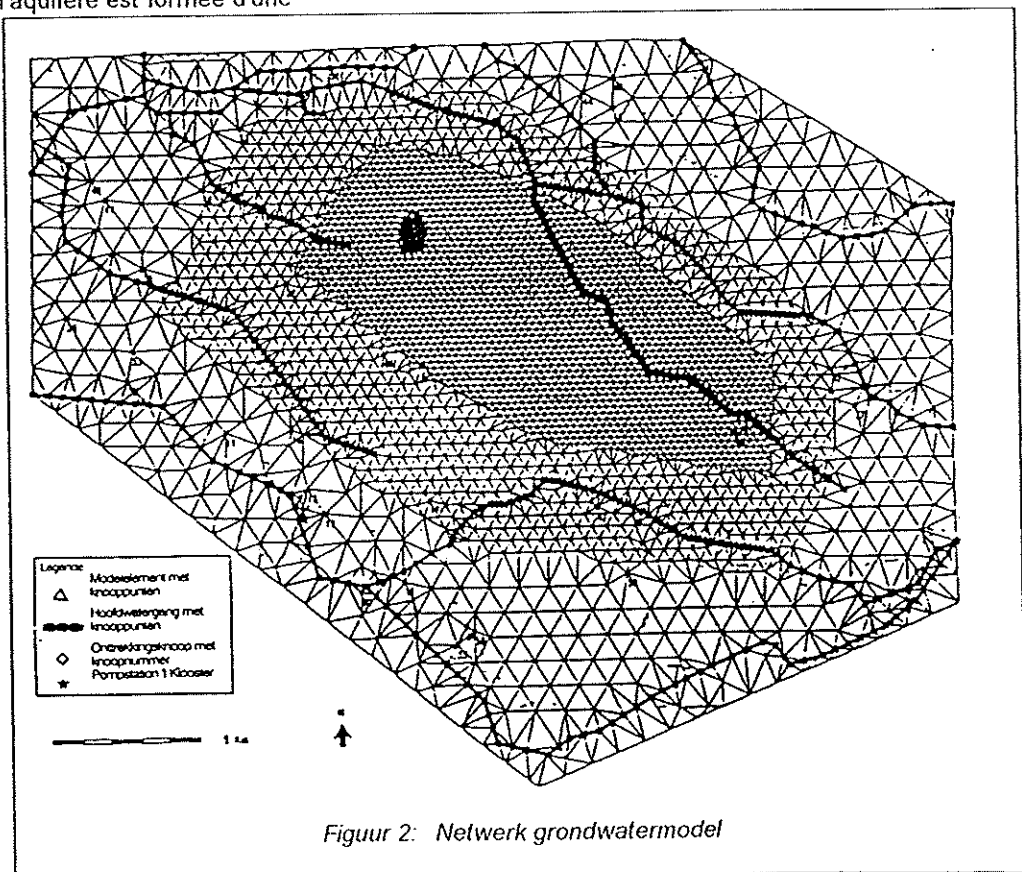
Le captage 't Klooster est un captage peu profond situé dans la province de "Gelderland" (Pays-Bas). Au moyen de 9 puits, on pompe $3,8 \cdot 10^6$ m³/an du premier aquifère. Cet aquifère, compris dans la formation de Drenthe, se compose de sable grossier graveleux. L'aquifère est recouvert d'une couche de sable fin d'environ 2 mètres d'épaisseur. La base de l'aquifère est formée d'une couche d'argile à sable argileux d'âge tertiaire. Au moyen du programme TRIWACO, basé sur la méthode des éléments finis, l'écoulement a été calculé quasi tridimensionnellement pour un régime d'équilibre, et la zone de protection/prévention a été calculée pour un débit annuel de $5 \cdot 10^6$ m³/an (zone dans laquelle s'infiltré l'eau pompée).

Un modèle d'écoulement a été réalisé dont le maillage est montré à la figure 2. Pour un calcul précis des lignes de courant (chemin parcouru par une

goutte d'eau depuis le niveau d'eau jusqu'au point de pompage), le réseau a été fortement densifié à proximité du point de pompage (< 50 m). Les cours d'eau importants ont été repris tels des segments linéaires le long desquels sont repris les niveaux d'eau de surface et les résistances hydrauliques d'infiltration et de drainage. Les plus petits cours d'eau, comme les fossés et rigoles, sont repris dans le "top system". Le "top system" reprend l'interaction entre l'eau utile, le système de drainage et l'eau souterraine. Pour la détermination de l'eau utile, le programme FLUZO (Flow in the Unsaturated Zone) est combiné au programme d'écoulement souterrain TRIWACO. Par ce moyen, l'écoulement dans la zone non-saturée est calculé en tenant compte de l'utilisation du sol, de la nature du sol, de la capillarité et de l'évapotranspiration. Enfin, les captages industriels et privés importants sont également intégrés dans le modèle.

Comme paramètres hydrologiques du premier aquifère, ont été introduites les valeurs de la perméabilité (k) et la profondeur de la base de la couche. La transmissivité (kD) est alors déterminée comme le produit de la valeur k et de l'épaisseur saturée (différence entre l'altitude de la surface de l'eau et de la base de la couche aquifère). Une nappe phréatique a ainsi été simulée.

Après la réalisation de la première version du modèle, ce dernier est calibré par modifications des données introduites jusqu'à obtention d'un accord avec la réalité. Comme critères de calibration sont ici utilisées les hauteurs d'eau



Figuur 2: Netwerk grondwatermodel

karststelsysteem gesimuleerd met behulp van 'black box' modellen. De resultaten van deze 'black box' modellen worden gelijk aan de hand van veldwaarnemingen. Kernfuncties, deconvoluties, enz. kunnen hiervoor worden gebruikt.

6. VOORBEELDEN

Voorbeeld 1: Waterwinning 't Klooster (Nederland)

De waterwinning 't Klooster is een ondiepe grondwaterwinning gelegen in de provincie Gelderland (Nederland). Door middel van negen pompputten wordt circa $3,8 \cdot 10^6$ m³/jaar onttrokken uit het eerste watervoerende pakket. Dit pakket, behorende tot de formatie van Drenthe, bestaat uit grove grindhoudende zanden. Het pakket is afgedekt door fijne zanden met een dikte van ongeveer 2 meter. De basis van het watervoerende pakket wordt gevormd door kleien en kleifige

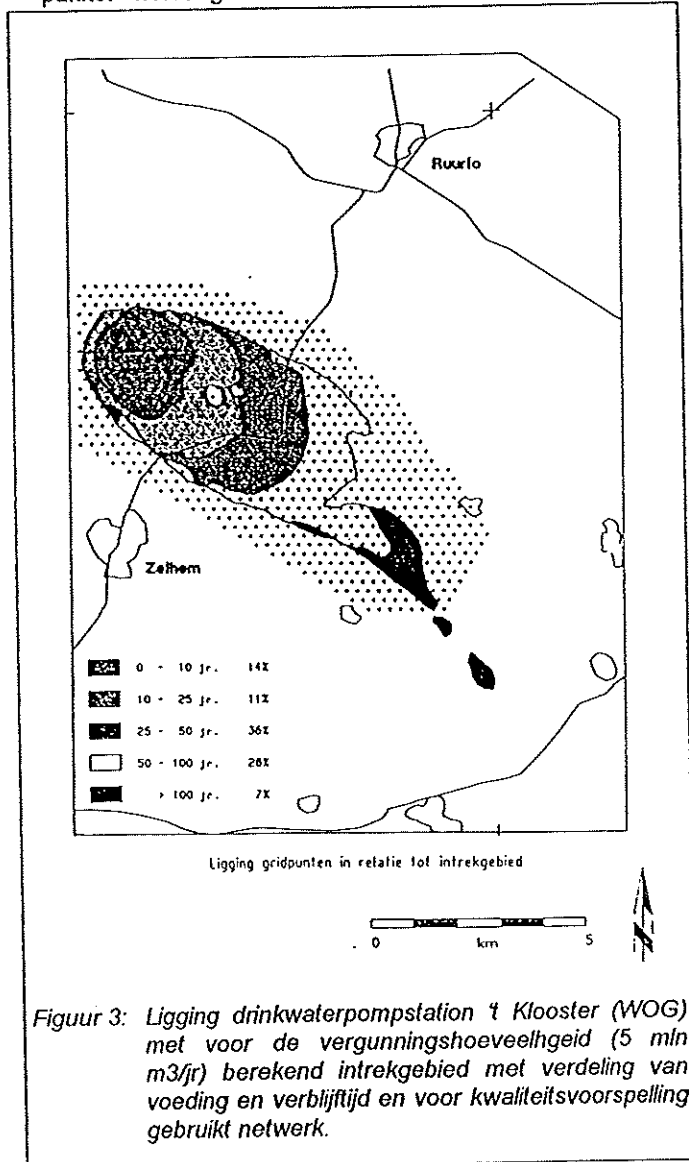
eindige elementen methode, is de grondwaterstroming quasi driedimensionaal berekend voor een stationaire situatie en is het intrekgebied (het gebied waarbinnen het onttrokken grondwater in de bodem infiltreert) voor een onttrekkingshoeveelheid van $5 \cdot 10^6$ m³/jaar berekend.

Een grondwaterstromingsmodel is opgesteld waarvan het netwerk is gegeven in figuur 2. Voor nauwkeurige stroombaanberekeningen (de weg die een waterdeeltje volgt van de waterspiegel tot aan de onttrekkingsput) in de nabije omgeving van de pompputten is het netwerk sterk verdicht (<50 meter). De belangrijkste waterlopen zijn opgenomen als lijnsegmenten waarlangs het waterpeil en de in- en uitredeweerstand zijn opgenomen. De kleinere waterlopen, zoals sloten en greppels, zijn opgenomen in het topsysteem. In het topsysteem is de interactie vastgelegd tussen het neerslagoverschot (nuttige neerslag), het drainagesysteem en het grondwater. Voor de bepaling van de nuttige neerslag is het programma FLUZO (Flow in the Unsaturated Zone) gekoppeld aan het grondwaterstromingsprogramma TRIWACO. Hiermee wordt de stroming in de onverzadigde zone berekend rekening houdend met bodemgebruik, grondsoort, capillaire opstijging en evapotranspiratie. Tenslotte zijn de belangrijkste industriële en private winningen als afzonderlijke onttrekkingen ingegeven. Als hydrologische parameters voor het eerste watervoerende pakket zijn de permeabiliteit (k) en de basis van deze laag ingegeven. Het doorlaat-vermogen (kD-factor) wordt dan bepaald als het product van de k-waarde met de verzadigde dikte (berekende stijghoogte min de basis van het watervoerende pakket). Hierdoor wordt een freatische benadering gehanteerd.

Na het opstellen van een eerste versie van het model wordt dit geijkt door de invoergegevens te wijzigen tot overeenstemming met de werkelijkheid bekomen wordt. Als ijkingcriteria zijn hier gemeten stijghoogte en afvoergegevens van het oppervlakte-watersysteem gebruikt. De ijkingen zijn uitgevoerd voor een gemiddelde jaarlijkse situatie en voor een wintersituatie.

Voor het afbakenen van het intrekgebied is een rechthoekig knooppuntennetwerk gegeneerd. Vanuit elk van deze knooppunten zijn stroombanen berekend. Alle knooppunten waarvan de stroombanen in de pompput eindigen, behoren tot het in-trekgebied. Vervolgens is de verblijftijd langs elke stroombaan berekend. In fig. 3 is het totale intrekgebied voor een productie van $5 \cdot 10^6$ m³/jaar en de verdeling van voeding en verblijftijden voorgesteld.

De onregelmatige vorm van de staart van het intrekgebied wordt veroorzaakt door enkele particuliere winningen en door de aanwezigheid van een beek die in dit gebied gedraineerd wordt. Aan de hand van het berekend intrekgebied, is het mogelijk te beslissen waar bemonsteringspunten



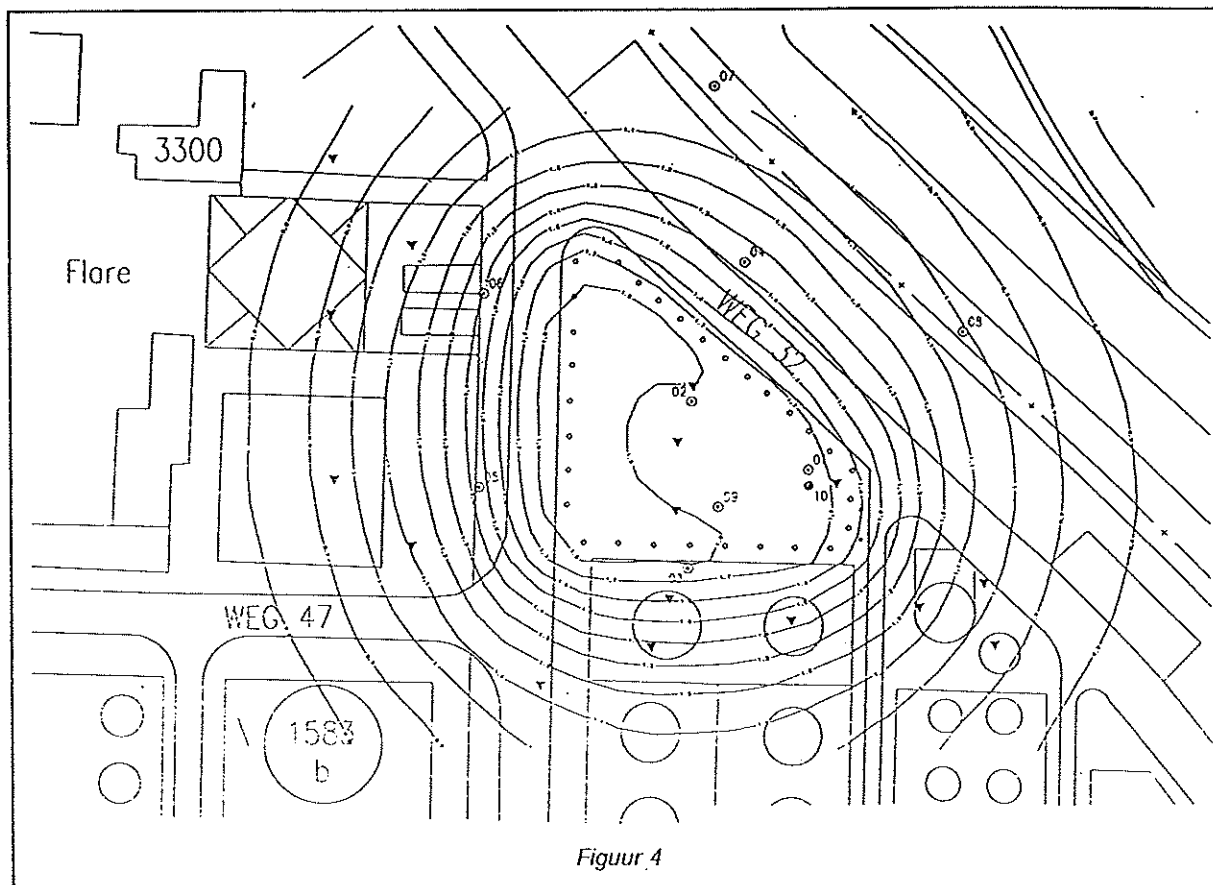
Figuur 3: Ligging drinkwaterpompstation 't Klooster (WOG) met voor de vergunningshoeveelheid (5 mln m³/jr) berekend intrekgebied met verdeling van voeding en verblijftijd en voor kwaliteitsvoorspelling gebruikt netwerk.

zanden van tertiaire ouderdom. Gebruik makend van het programma TRIWACO, gebaseerd op de

mesurées et les données d'écoulement du système d'eau de surface. La calibration est réalisée pour une situation annuelle moyenne et pour une époque hivernale.

Pour la délimitation de la zone de protection/

de confinement hydrogéologique. L'aquifère phréatique est composé de dépôts de dragage silto-sableux d'une épaisseur d'environ 3,5 m. La base de l'aquifère est composée de tourbe argileuse d'une épaisseur d'environ 4 m. Cette dernière couche appartient à la formation du Dunkerque IIIb.



Figuur 4

prévention, un maillage est construit. A partir de chaque noeud, les lignes de courant ont été calculées. Tous les noeuds pour lesquels des lignes de courant atteignent le puits appartiennent à la zone de protection. Les temps de séjour le long de chacune des lignes de courant sont ensuite calculés. A la figure 3 sont représentés les temps de séjours et la répartition de l'alimentation pour la totalité de la zone avec une production de 5.10^6 m³/an.

La forme irrégulière de la queue de la zone de protection est causée par quelques captages de particuliers et par la présence d'un ruisseau drainé dans cette zone. Sur base de la zone calculée, il est possible de décider de l'emplacement des points d'échantillonnages pour la surveillance de la qualité de l'eau souterraine.

Exemple 2: Assainissement d'un terrain industriel à Rotterdam

Une pollution de l'eau souterraine a été observée à la limite d'un terrain industriel à Rotterdam. Pour limiter les risques de dispersion de la pollution observée via l'eau souterraine, il a été décidé de réaliser un dimensionnement d'un système

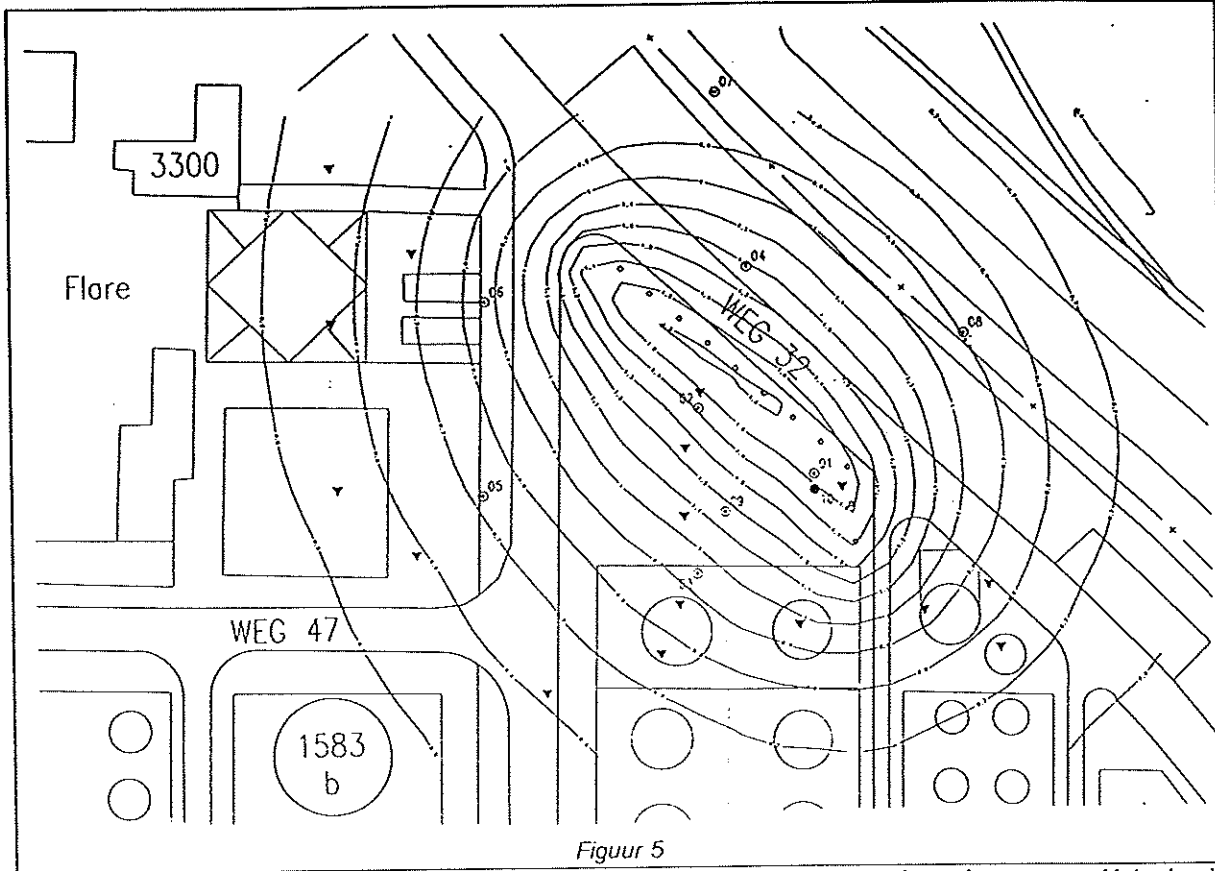
En-dessous se situe une couche de sable, appartenant également au Dunkerque IIIb, représentant l'aquifère. L'épaisseur de cette couche est comprise entre 3,5 m au Nord et 1,0 m au Sud du terrain industriel en question. La base hydrogéologique est formée par une couche argilo-tourbeuse d'une épaisseur de 10 à 13 m, et appartenant aux dépôts du Calaisien I.

Pour déterminer les effets hydrogéologiques de différentes mesures telles que points de captage, systèmes de drainage, etc., des calculs d'écoulement souterrain ont été réalisés à l'aide du programme MLAEM. En utilisant ce programme, basé sur la méthode des éléments analytiques, un calcul quasi tridimensionnel a pu être calculé pour une situation stationnaire. Les paramètres introduits pour les 2 couches aquifères sont la perméabilité (k) et les bases de ces couches. La transmissivité est déterminée comme à l'exemple 1. De même la résistivité hydraulique de la couche séparant les deux aquifères est introduite dans le modèle.

Avant de dimensionner les différents systèmes de confinement hydrologique, le modèle est calibré par les paramètres hydrauliques introduits, à modifier jusqu'à satisfaction aux critères de

moeten geplaatst worden voor het bewaken van de grondwaterkwaliteit.

Als hydrologische parameters voor de 2 watervoerende lagen zijn de permeabiliteit (k) en de



Figuur 5

Voorbeeld 2: Grondwatersanering op industrieterrein te Rotterdam

Een grondwaterverontreiniging is waargenomen in het freatisch pakket aan de rand van een industrieterrein te Rotterdam. Om de verspreidingsrisico's van de waargenomen verontreinigingen via het grondwater te beperken, is overgegaan tot de dimensionering van een geohydrologisch beheerssysteem. Het freatisch pakket bestaat uit opgespoten siltig zand met een dikte van circa 3,5 meter. De basis van dit pakket wordt gevormd door kleiig veen met een dikte van circa 4 meter. Deze scheidende laag behoort tot de afzettingen van Duinkerke IIIb. Een zandige tussenlaag, eveneens behorende tot de afzettingen van Duinkerke IIIb, vormt een watervoerende laag. De dikte van deze zandlaag bedraagt 3,5 meter ten noorden en 1,0 meter ten zuiden van het onderzoeksterrein. De geohydrologische basis wordt gevormd door kleiig veen met een dikte van 10 à 13 meter en behoort tot de afzettingen van Calais I.

Om de hydrogeologische effecten van verschillende maatregelen, zoals onttrekkings-putten, drainagesystemen enz., te bepalen, zijn grondwaterstromingsberekeningen uitgevoerd met behulp van het programma MLAEM. Gebruik makende van dit programma, gebaseerd op de analytische elementen methode, is de grondwaterstroming quasi-driedimensionaal berekend voor een stationaire situatie.

basis van deze laag ingegeven. Het doorlaatvermogen (kD) wordt bepaald, zoals aangegeven in voorbeeld 1. Tevens is de hydraulische weerstand van de scheidende laag in het model ingegeven.

Voorafgaand aan de uitwerking van verschillende hydrologische beheerssystemen, is het model geijkt door de invoergegevens te wijzigen tot de ijkingcriteria voldaan zijn. Als ijkingcriteria zijn hier de gemeten stijghoogten in de huidige situatie gebruikt. Door gebrek aan gegevens is een gemiddelde situatie in het onderzoeksgebied onbekend.

Twee geohydrologische beheersvarianten zijn in beschouwing genomen:

- een volledige beheersing van de grondwaterverontreiniging, waarbij de huidige infiltratiesituatie vanuit het freatisch naar het onderliggend zandig pakket wordt omgezet in een lichte kwelsituatie (figuur 4);
- een gedeeltelijke beheersing van de grondwaterverontreiniging, waarbij de beperkte infiltratie vanuit het freatisch naar het onderliggend zandig pakket niet volledig wordt opgeheven. Daarnaast wordt de horizontale verspreiding van verontreinigingen in het freatisch pakket opgeheven (figuur 5).

Op basis van de waargenomen concentraties aan verontreinigende stoffen in het grondwater, kan, steunend op de verblijftijd langs

calibration. Comme critères de calibration sont ici repris les hauteurs d'eau de la situation actuelle. Par manque de données, la situation moyenne annuelle est inconnue dans l'aire de l'étude.

Deux variantes de confinement hydrogéologique sont prises en compte :

- un contrôle complet de la pollution de l'eau souterraine, où la situation d'infiltration actuelle de la nappe phréatique vers la couche sableuse sous-jacente est convertie en une légère situation de source (figure 4);
- un contrôle partiel de la pollution de l'eau souterraine, où une infiltration limitée de la nappe phréatique vers la couche sableuse sous-jacente n'a pas été totalement éliminée, tandis que la dispersion horizontale de la pollution dans la nappe phréatique a été éliminée (figure 5).

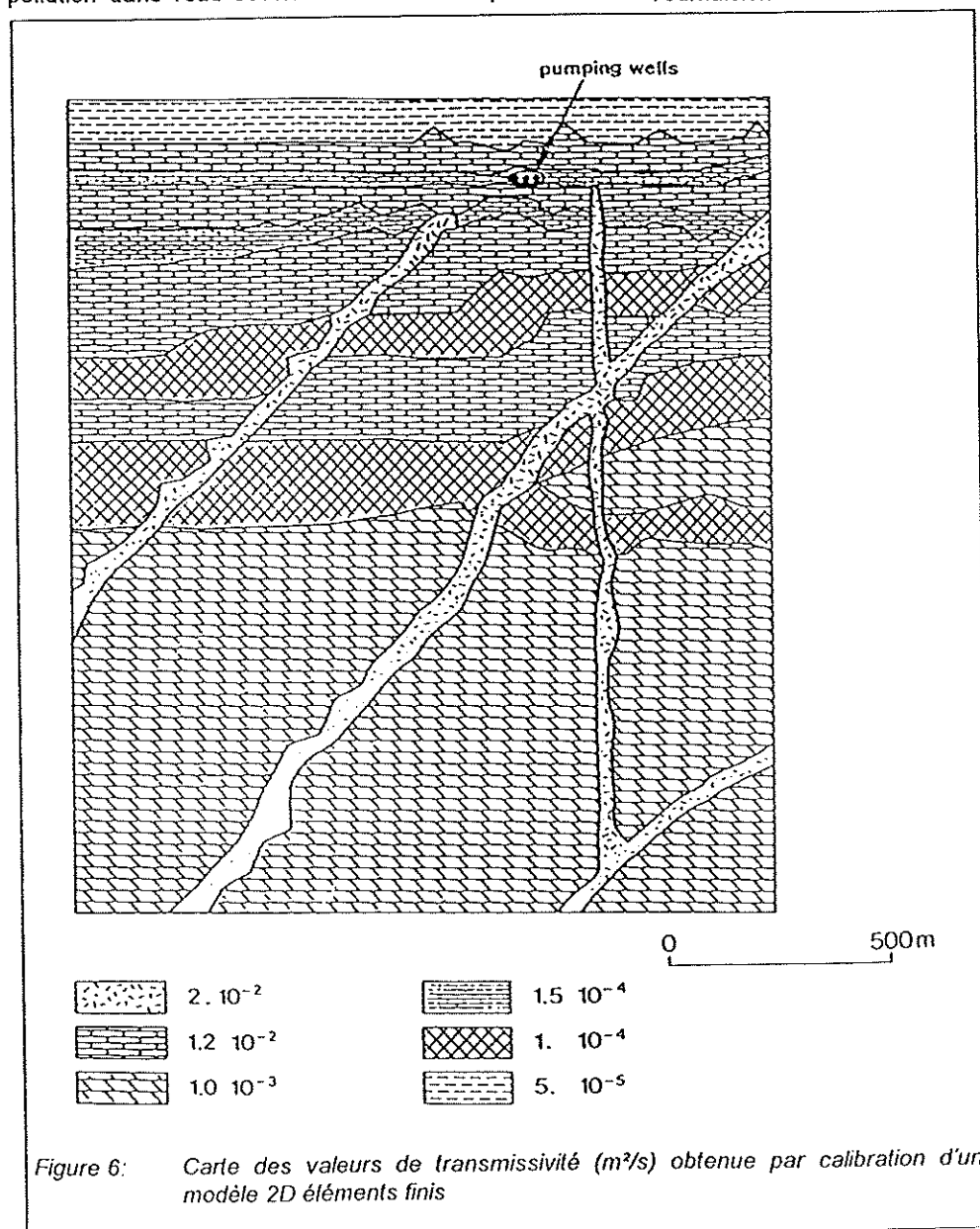
Sur base des concentrations observées de la pollution dans l'eau souterraine et des temps de

séjour le long des lignes de courant, une estimation peut être avancée quant à la qualité de l'eau souterraine pompée, la durée de l'assainissement et le régime de pompage des différentes variantes d'assainissement. Pour la détermination de l'évolution des concentrations de la pollution à la limite du terrain industriel considéré et dans les ouvrages d'extraction, le programme de transport de polluant SORWACO a été utilisé, couplé au modèle d'écoulement souterrain. Ce programme décrit aussi bien les processus d'équilibre comme de non-équilibre le long des lignes de courant spécifiques choisies.

Exemple 3 : Calcul des zones de protection/prévention autour d'un captage en milieu calcaire fissuré et faiblement karstifié

Ce cas d'étude est localisé dans des formations du Carbonifère composées de calcaires du Tournaisien et du Viséen. Un captage produisant environ 150 m³/h est localisé dans une vallée topographique correspondant au flanc nord d'un synclinal dont l'axe est Est-Ouest. Dans cette zone, la karstification relativement faible des bancs calcaires a pu être observée dans une carrière située à proximité. La partie nord de la zone étudiée est composée de couches moins perméables appartenant au Famennien. Environ 25 piézomètres ont été forés et des cartes piézométriques ont pu être dessinées sur base de toutes ces données ajoutées aux interprétations géologiques et morphostructurales.

Un modèle local 2D utilisant la méthode des éléments finis et le programme AQUA a dans un premier lieu été calibré sur les conditions d'écoulement naturelles et avec pompage. L'hétérogénéité



de stroombanen, een voorspelling worden gemaakt van de kwaliteit van het onttrokken grondwater, van de saneringsduur en van het pompregime van de verschillende saneringsvarianten. Voor het bepalen van het concentratieverloop van de verontreinigin-

grondwaterwinning met een onttrekkingshoeveelheid van 150 m³/uur bevindt zich in een vallei, gelegen aan de noordelijke flank van een syncline met een oost-west georiënteerde as. In een groeve, gelegen in de omgeving van het studiegebied,

worden karstverschijnselen in witte kalksteenbanken waargenomen. Het noordelijk deel van het studiegebied wordt gekenmerkt door minder doorlatende lagen van Famenaan ouderdom. Een piëzometrische kaart is samengesteld aan de hand van stijghoogtegegevens ter plaatse van de 25 geboorde peilbuizen, gecombineerd met een geologische en geomorfologische interpretatie.

Een lokaal 2 dimensioneel model is opgebouwd door middel van het programma AQUA, gebaseerd op de eindige elementen methode. Het grondwaterstromingsmodel is geijkt op de huidige situatie (huidige grondwaterstroming en grondwateronttrekkingen). Er is rekening gehouden met de belangrijkste heterogeniteit van de ondergrond. Deze heterogeniteit is van belang voor de grondwaterstroming. Hierbij is getracht de verschillende lithologische eenheden en de waargenomen breukzones zoveel mogelijk te respecteren (figuur 6).

De gerealiseerde calibratie op basis van situaties met of zonder wateronttrekking, houdt rekening met verschillende lithogiën (verkregen uit geologische, geomorfologische en voorafgaande geofysische studies).

Na de ijking van het grondwaterstromingsmodel is het stoftransportmodel geijkt aan de hand van de resultaten van 'tracer'-proeven. De parameters, die het stoftransport beïnvloeden zijn afhankelijk van de heterogeniteit. Daardoor blijkt bijvoorbeeld dat sterk verschillende waarden voor de effectieve porositeit en de dispersiviteit gekozen zijn voor de sterk gebroken zones en de zones met karstkloten.

Het geijkte model is gebruikt voor het bepalen van de verblijftijden van het opgepompte grondwater vanuit een netwerk van knooppunten. De berekende verblijftijden, weergegeven in figuur 7, zijn toepasbaar tijdens de exploitatie van de grondwaterwinning.

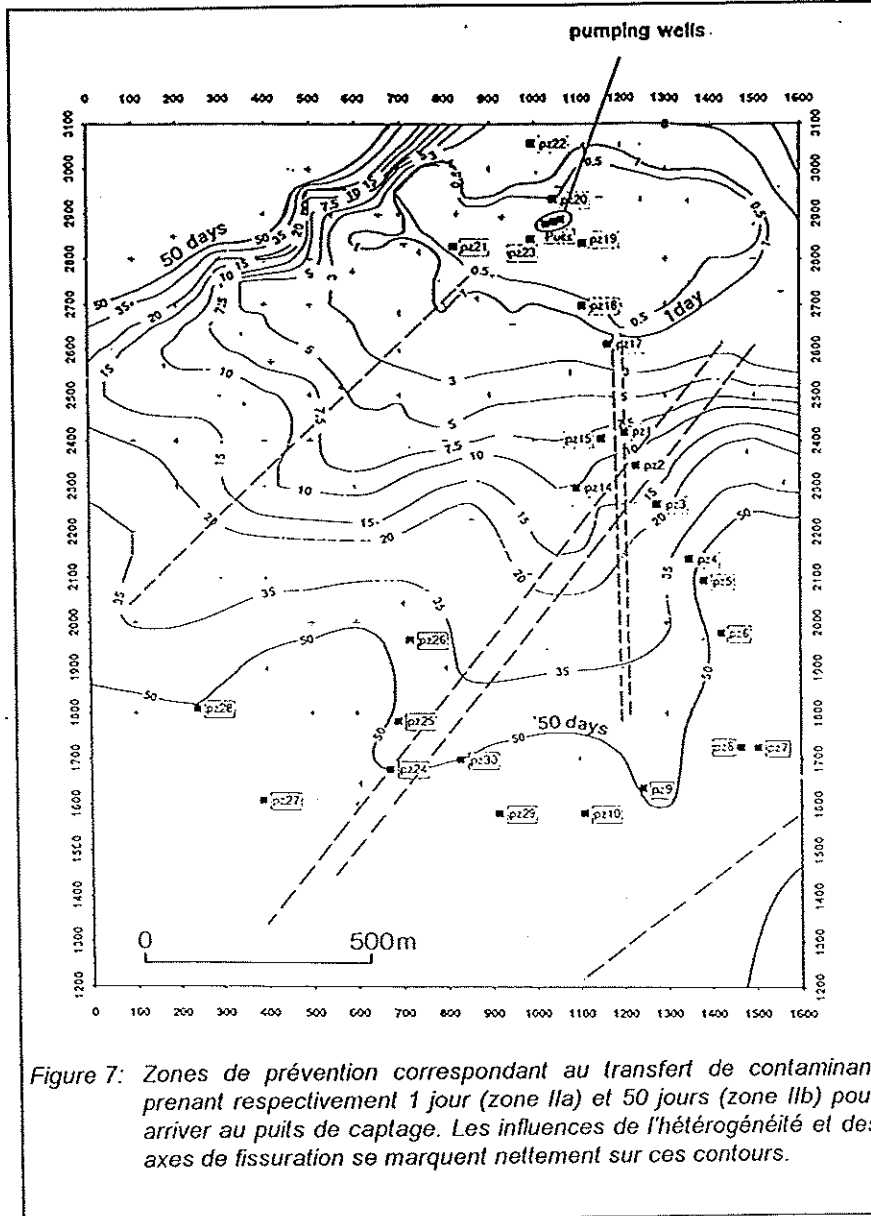


Figure 7: Zones de prévention correspondant au transfert de contaminant prenant respectivement 1 jour (zone IIa) et 50 jours (zone IIb) pour arriver au puits de captage. Les influences de l'hétérogénéité et des axes de fissuration se marquent nettement sur ces contours.

gen aan de grenzen van het bedrijfsterrein en in de onttrekkingsmiddelen is het stoftransport SORWACO gekoppeld aan het grondwaterstromingsmodel. Dit programma beschrijft zowel de evenwicht als de niet-evenwicht processen langs specifiek gekozen stroombanen.

Voorbeeld 3 : Berekenen van intrekgebieden en beschermingszones rondom een grondwaterwinning in gebroken kalksteen met karstverschijnselen

In het studiegebied wordt kalksteen van het Tournaisiaan en het Viseaan aangetroffen. Een

L'hétérogénéité importante du milieu souterrain pour les paramètres de l'écoulement est prise en compte en respectant au mieux les différences lithologiques et les zones plus ou moins fracturées qui sont observées (figure 6).

La calibration réalisée par rapport aux conditions avec et sans pompage tient compte des zones plus fracturées et des différentes lithologies (résultant des études géologiques, morphostructurales et géophysiques préalables).

Ensuite, la calibration du modèle de transport a été réalisée sur base des résultats d'essais de traçage. Les paramètres régissant les processus de transport sont évidemment affectés par l'hétérogénéité. C'est ainsi, par exemple, que des valeurs très différentes des porosités efficaces et des dispersivités sont choisies pour les zones très fracturées (et légèrement karstifiées).

Le modèle étant calibré, il est utilisé pour déterminer les temps d'arrivée au captage pour des injections fictives réalisées en différents points du domaine. Le tracé de courbes isochrones reprenant les points d'égal temps d'arrivée en condition d'exploitation, peut alors être réalisé (figure 7).

Remerciements

La modélisation a été réalisée par les LGIH de l'Université de Liège pour compte de la SWDE. Nous remercions la SWDE de nous avoir autorisé à reproduire ces résultats.

7. Tendance actuelle de la modélisation en Belgique

En Belgique, les premières applications hydrogéologiques de modèles numériques datent de la fin des années 70 et même plutôt des années 80. En effet, la complexité du sous-sol et son degré d'hétérogénéité ont eu pour conséquence que les géologues belges n'ont pas cru dès le début au potentiel de ces techniques quantitatives et se contentaient dans la plupart des cas d'études hydrogéologiques très descriptives. Les collègues américains et néerlandais n'avaient pas attendu si longtemps pour y croire. Ces derniers, aidés par l'hypothèse très discutable d'une relative homogénéité de leur sous-sol, ont été indiscutablement les pionniers européens des techniques de simulation numérique appliquées au calcul quantitatif des écoulements en milieu poreux.

Comme pour toutes les nouvelles techniques mises sur le marché, les premières années constituent l'époque de tous les dangers : charlatanisme, résultats faussés, programmes peu fiables, manque d'expérience et de déontologie des "pratiquants", manque de transparence sur les hypothèses réellement prises en compte, manque de convivialité pour les utilisateurs, etc... Grâce à leur

prudence et leur scepticisme, les hydrogéologues belges ont peut-être évité bien des "piâtres".

Actuellement, un grand nombre de modèles hydrogéologiques numériques sont disponibles. Les modèles simulent l'écoulement souterrain et/ou la migration :

- dans la zone saturée et non-saturée;
- en 1, 2 ou 3 dimension(s);
- en régime stationnaire ou transitoire.

Dans notre pays, les modèles hydrogéologiques trouvent leur application principale dans les études environnementales ou purement hydrogéologiques tels que montrés dans les exemples ci-dessus.

Dans le domaine environnemental, on observe une évolution dans les types de modèles qu'utilisent les intéressés. En effet, outre les modèles « classiques » d'écoulement souterrain, des modèles calculant la migration des polluants sont de plus en plus recherchés car ils permettent de mieux apprécier les risques causés par une pollution déterminée. Il faut ajouter que, compte tenu de l'évolution de l'informatique, il existe aujourd'hui des modèles pouvant simuler des phénomènes extrêmement divers. Ainsi, récemment, outre le domaine de l'hydrogéologie, ont été développés des modèles calculant la circulation de l'air souterrain, de la circulation de l'eau dans la zone non-saturée, des risques environnementaux, etc. La liste pourrait être longue, mais attention, le discernement doit toujours être de rigueur quant à la portée des modèles mis en oeuvre...

En Belgique, les modèles appliqués à l'environnement deviennent non seulement de plus en plus courants parce que admis et demandés par les autorités, mais aussi de plus en plus diversifiés (cfr § précédent). Dans le Nord du pays il deviennent de plus en plus systématiques.

Dans le domaine des exploitations d'eaux souterraines, il faut d'abord dire que les modèles couvrent bien souvent de plus vastes étendues, et sont donc plus importants. Ils deviennent indispensables pour calculer avec un peu de réalisme les zones de protection des captages. Tant au Nord qu'au Sud du pays, ils deviennent de plus en plus systématiques, parce que reconnus. Il faut préciser toutefois qu'ils sont exigés par les autorités du Nord du pays pour l'élaboration du dossier technique afin d'obtenir le permis d'exploitation.

Mais n'oublions pas que les modèles incluant les calculs de transport de polluant doivent être calibrés sur des mesures avant de les utiliser à des fins prévisionnelles. Ces mesures sont constituées par des essais de traçage réalisés dans le domaine étudié. Ces essais sont tout aussi indispensables pour déterminer les paramètres du transport que les essais de pompage le sont pour estimer les paramètres de l'écoulement.

Deze grondwaterstudie is mogelijk gemaakt door het SWDE en is uitgevoerd onder leiding van de LGIH van de universiteit van Luik. We danken het SWDE voor de toestemming voor het publiceren van de resultaten.

7. Huidige tendens van het modeleren in België

In België dateren de eerste hydrogeologische numerieke modellen vanaf het einde van de jaren '70, begin jaren '80. Ten gevolge van de complexiteit en de heterogeniteit van de ondergrond zijn in de beginfase van de ontwikkelingen van numerieke grondwaterstromingsmodellen de Belgische geologen terughoudend geweest om deze kwantitatieve technieken toe te passen. Hierdoor bleven de meeste geohydrologische studies beschrijvend. Daarentegen hebben de Amerikaanse en Nederlandse collega's minder lang gewacht om in deze numerieke technieken te geloven. Hierdoor zijn deze laatste onbetwistbaar de Europese pioniers van de numerieke modellen, die op kwantitatieve wijze de grondwaterstroming in poreuze media simuleren.

Zoals bij elke nieuwe techniek werden de beginjaren geteisterd door allerlei moeilijkheden, zoals foute resultaten, weinig betrouwbare modellen, gebrek aan ervaring en aan een deontologie van de gebruikers, onderzichtigheid over de vooropgestelde uitgangspunten en randvoorwaarden, enz. Misschien hebben de Belgische geologen deze moeilijkheden vermeden dankzij hun terughoudendheid en hun scepticisme.

Op dit ogenblik is een groot aantal numerieke geohydrologische modellen beschikbaar. Deze modellen simuleren de grondwaterstroming en/of het stoftransport:

- in de verzadigde en onverzadigde zone;
- in 1, 2 of 3 dimensies;
- in stationaire en niet-stationaire situaties, enz.

Zoals de hier aangehaalde studies aantonen, worden in ons land hydrogeologische modellen toegepast voor milieukundige of zuiver hydrogeologische studies.

Op milieukundig gebied merkt men een evolutie in de gebruikte modellen. Meer en meer wordt van de klassieke modellen voor de grondwaterstroming overgestapt naar modellen die de migratie van polluenten berekenen. Met deze modellen kan een betere inschatting worden gemaakt van de risico's van een verontreiniging. Bovendien, rekening houdend met de evolutie van de informatica, bestaan er vandaag modellen die echt verschillende fenomenen kunnen simuleren. Zo werden onlangs, buiten het domein van de hydrogeologie, werden modellen ontwikkeld die de grondluchtstroming, de grondwaterstroming in de onverzadigde zone, de milieu risico's etc... berekenen. Hoewel veel modellen beschikbaar zijn, dient met zekere voorkennis deze modellen te

worden gebruikt en de resultaten te worden geïnterpreteerd.

In België wordt de toepassing van modellen, in de milieu-wereld, steeds meer gangbaar dankzij de aanvaarding en de vraag van de overheden. Bovendien worden ze steeds meer gediversifieerd (cfr hoger). In het noorden van het land worden ze meer en meer systematisch.

In het domein van de grondwaterwinningen dient eerst gezegd te worden dat de modellen zeer dikwijls grotere oppervlakte beslaan en dus zwaarder zijn. Ze worden onontbeerlijk bij iets of wat realistische berekeningen van beschermingsgebieden voor waterwinning. Zowel in het noorden als in het zuiden van het land worden ze dankzij hun erkenning meer en meer systematisch. Er dient evenwel aangegeven te worden dat ze door de noordelijke overheden geëist worden voor de opmaak van een technisch dossier om een exploitatievergunning te bekomen.

Maar vergeet niet dat modellen voor het berekenen van transport van polluenten moeten geïkt worden door metingen vooraleer ze te gebruiken bij voorspellingen. Deze metingen komen van de "tracer" proeven uitgevoerd in het bestudeerde gebied. Deze proeven zijn even belangrijk om de transportparameters te bepalen, als de pompproeven om de stromingsparameters in te schatten.

8. Wetenschappelijke en technische evolutie

Op de markt zijn meer en meer logische en numerische modellen beschikbaar betreffende de stromingen en het transport van polluenten. Niettemin wordt nog grote vooruitgang verwacht gedurende de komende jaren in verschillende richtingen teneinde de nauwkeurigheid, de kracht, de toegankelijkheid en de algemeenheid van de beschikbare modellen te verbeteren. Onder de thema's waar momenteel intensief onderzoek wordt verricht, kan men aanhalen:

- transport van contaminanten in een heterogeen milieu, twee dimensionaal en drie dimensionaal (de actuele logische modellen zijn onnauwkeurig en duidelijk ontoereikend bij een belangrijke graad van heterogeniteit);
- stromingen en transport in de niet-verzadigde zone;
- voortbrenging van poreuze milieus, statistisch equivalent aan conditionele simulaties, inclusief "hard data" (gemeten gegevens) en "soft data" (geologische interpretaties);
- middelen die de "upscaling" van parameters toelaten;
- multi-fase stromingen, enz ...

Al deze ontwikkelingen zouden in de komende jaren uiteindelijk moeten leiden tot het ter beschikking stellen van krachtigere werkmiddelen

8. Evolution scientifique et technique

De plus en plus de logiciels de modélisation numérique des écoulements et du transport de polluants sont disponibles sur le marché. Néanmoins de grands progrès sont attendus dans les prochaines années dans différentes directions afin d'améliorer la précision, la puissance, la convivialité et la généralité des modèles disponibles. Parmi les thèmes où d'intenses recherches sont menées, on peut citer :

- transport de contaminants en milieu hétérogène 2D et 3D (les logiciels actuels sont imprécis et nettement insuffisants si le degré d'hétérogénéité est important);
- écoulements et transports en zone non saturée;
- génération de milieux poreux statistiquement équivalents par des simulations conditionnelles

incluant des "hard data" (données mesurées) et des "soft data" (interprétations géologiques);

- moyens permettant l' "upscaling" des paramètres;
- écoulements multiphasiques;
- etc...

Tous ces développements devraient déboucher dans les années futures à la mise à disposition d'outils plus puissants permettant de prendre en compte de façon plus précise les processus physico-chimiques des écoulements et transports en milieu souterrain hétérogène.

Pr. Dr. Ir. Alain DASSARGUES, ULg - KUL
Ir. Bart VANDER VELPEN et J. VERCRUYSE,
ENVICO, Bureau d'Etudes en Eau et
Environnement

DINANT ou LA GEOLOGIE DE L'URGENCE

Lundi 16 Octobre 1995. 16h30.

La police communale de Dinant m'enjoint de me rendre immédiatement au commissariat. Une pierre est tombée dans la rue « Sous les Roches », près de la Collégiale. Ordre m'est donné de prendre part à la réunion de crise, en présence des autorités communales, provinciales et régionales. Je dois donner mon avis quant à la situation et les solutions d'urgence à prendre.

17h00.

J'arrive au commissariat. Un agent me mène sur les lieux de l'accident. La pierre est là, barrant la route de sa masse imposante. A l'oeil, la masse ne doit pas être loin des 500 tonnes. Le toit d'un magasin a été défoncé. Deux voitures sont écrasées sous le rocher. Heureusement, la protection civile et les pompiers ne signalent aucune victime. Une catastrophe a été évitée de justesse.

18h00.

Réunion de crise. On pourrait croire une veillée d'armes. On se félicite de l'absence de victimes. Mais que peut-il encore se passer ? Une masse aussi importante reste en surplomb, comme suspendue à la paroi. Les autorités attendent l'avis des experts. Passés la stupeur et les premières explications, nous décidons de descendre sur le rocher dès le lendemain. Nous estimerons les

risques, et essayerons de comprendre les causes de la chute.

Existe-t-il meilleur exemple pour comprendre la différence entre l'échelle des temps géologiques, et celle du temps humain ? Voici bien le lien entre la Géologie Générale et la Géologie Appliquée. Qui d'entre nous aurait jamais imaginé exercer son métier de géologue dans un contexte de crise et d'urgence ?

La falaise qui domine la rue Sous les Roches est haute de 50 à 90m, suivant les endroits. Elle est orientée Nord-Nord-Ouest - Sud-Sud-Est. Côté Nord, elle se présente sous forme d'une aiguille rocheuse. Au Sud, elle forme le soubassement de la Citadelle de Dinant. Les roches qui la constituent sont des calcaires d'âge viséen, V2a voire v2b d'après la carte géologique.

La direction des couches est subparallèle à l'orientation de la falaise. Leur pendage est globalement subvertical, mais de nombreuses ondulations à petite échelle affectent les bancs (longueur d'onde de 3 à 4m). Ces ondulations ont des axes horizontaux dans le plan de la paroi. Ce sont principalement des phénomènes de « slumping ». L'épaisseur des bancs est assez variable, de 0.1 à 1.0m. Des passées calcschisteuses, voire franchement schisteuses sont présentes çà et là.

die toelaten om de fysico-chemische processen van stromingen en transport in een heterogene ondergrond op een meer nauwkeurige manier in rekening te brengen.

Pr. Dr. Ir Alain DASSARGUES, ULg - KUL
Ir Bart VANDER VELPEN et J. VERCRUYSE,
ENVICO, Studiebureau voor Water en Milieu

DINANT of DRINGENDE GEOLOGIE

Maandag 16-10-95 - 16u30

De gemeentelijke politie van Dinant vraagt me om dadelijk naar het commissariaat te begeven. Een rotsblok is gevallen in de straat "Sous les Roches", dichtbij de collégiale. Er wordt me bevolen deel te nemen aan het crisis beraad in aanwezigheid van de gemeentelijke, provinciale en regionale overheden. Ik moet mijn advies geven betreffende de situatie en de te nemen maatregelen.

17u00

Ik kom aan op het commissariaat. Een agent neemt mij mee tot de plaats van het ongeval. De rots is daar, de weg helemaal geblokkeerd door zijn omvang. Op het eerste gezicht, is het gewicht ongeveer 500 ton. Het dak van een winkel is verbrijzeld. Twee wagens zijn bedolven onder de rotsblok. Gelukkig signaleert de civiele bescherming en de brandweer geen enkel slachtoffer. Een ramp is op het nippertje vermeden.

18u00

Crisisberaad. De spanning is te snijden. Iedereen is tevreden dat geen slachtoffers zijn gevallen. Maar wat kan er nog gebeuren? Een even grote rotsmassa helt over. De overheden wachten op de mening van de experts. Eerste schrik overwonnen en na de eerste uitleg, besluiten we de rots de volgende morgen af te dalen. Wij zullen de risico's inschatten en proberen de oorzaak van de val te begrijpen.

Bestaat er een betere voorbeeld om het verschil te begrijpen tussen de geologische tijdschaal en het menselijke tijdsbesef? Hier ziet men goed het verband tussen de algemene geologie en de toegepaste geologie. Wie van ons heeft ooit gedacht zijn beroep van geoloog uit te oefenen in een sfeer van crisis en dringendeheid?

De rotswand, die de straat "Sous les Roches" domineert, bedraagt een hoogte van 50 à 90 m afhankelijk van de plaats. Ze is noord-noordwest - zuid-zuidoost georiënteerd. Aan de noordkant, heeft ze de vorm van een rotspiek. Aan de zuid kant vormt zij de ondersteuning van de citadelle van Dinant. Volgens de geologische kaart bestaat deze rotsen uit kalksteen V2a à V2b.

De richting van de laag is sub-parallel aan de oriëntatie van de rotswand. Hun helling is in algemeen subvertikaal, met de waarnemingen van veel golvingen op kleine schaal (golflengte van 3 à 4 m). Deze golven hebben horizontale assen, parallel aan de wand zelf. Ze zijn voornamelijk fenomeen van "slumping". De dikte van de banken is verschillend van 0,1 tot 1,0 m. Men treft hier en daar tussenin kalkschist tot schistlagen.

Door het feit van de oriëntatie van de klif en van de stratificatie, zijn er op verschillende plaatsen schubben zichtbaar. Hun volume gaat van enkelen m³ tot meer dan honderden m³. Ze geven de indruk gewoon vast te zitten op de rotswand.

De blok die neergestort is hing enkel aan de rotswand door de rechter bovenkant. Aan de achterkant bestaat de blok uit een leeg voeg, soms gevuld met aarde en klei. Drie contacten met de rotswand zijn zichtbaar.

De oorzaak van de neerstorting is niet een van de drie volgende klassieke oorzaken:

- afwisseling van vorst en dooi;
- uitspoelen van de voeg en de vermindering van de vrijingshoeken;
- vegetatieactie.

Tijdens de val, was het weer droog sinds enkele maanden. De temperatuur was positief en geen enkele vegetatie groeide in de holte van de rotswand. Op de oppervlakte was enkel een klein breuk zichtbaar op de noordkant van de neergestorte zone.

Het onderzoek van de rotswand door een middel van een georadar van subsurface heeft aangetoond dat de joint doorgaat onder de linkerkant van de nog hangende overhellende massa met een soms belangrijke dikte (meer dan 0,6 m). Aan de andere kant mag men stellen dat de neergestorte massa het evenwicht heeft hersteld door de verwijdering van 500 ton.

Uitgaande van deze vaststelling, scheen het realistischer de rotsblok te verstevigen en de stabiliteit te verbeteren eerder dan de resterende maase neer te halen. Deze tweede oplossing zou met zich meegebracht hebben het neerhalen van 400 m³ of meer dan 1000 ton, en dit van een hoogte van 55 m maximum.