

# El agua como recurso natural: *identificación, funcionamiento, movilización*

## Principales equipos

### UPR EAU/NRE

**Agua: Nuevos Recursos y Economía**  
(BRGM)  
14 científicos

**Director: Jean-Christophe Maréchal**  
[jc.marechal@brgm.fr](mailto:jc.marechal@brgm.fr)  
► Presentación página 16

### UMR EMMAH

**Medio Ambiente Mediterráneo  
y Modelos de Sistemas Agronómicos  
e Hídricos**  
(INRA, UAPV)  
40 científicos

**Director: Liliana Di Pietro**  
[liliana.dipietro@paca.inra.fr](mailto:liliana.dipietro@paca.inra.fr)  
[www.umr-emmah.fr](http://www.umr-emmah.fr)  
► Presentación página 14

### UMR GM

**Geociencias de Montpellier**  
(CNRS, UM2)  
89 científicos

**Director: Jean-Louis Bodinier**  
[bodinier@gm.univ-montp2.fr](mailto:bodinier@gm.univ-montp2.fr)  
[dirgm@gm.univ-montp2.fr](mailto:dirgm@gm.univ-montp2.fr)  
[www.gm.univ-montp2.fr](http://www.gm.univ-montp2.fr)  
► Presentación página 10

### UMR HSM

**Ciencias Hídricas de Montpellier**  
(CNRS, IRD, UM1, UM2)  
57 científicos

**Director: Éric Servat**  
[eric.servat@msem.univ-montp2.fr](mailto:eric.servat@msem.univ-montp2.fr)  
[www.hydrosociences.org](http://www.hydrosociences.org)  
► Presentación página 8

### UPR LGEI

**Laboratorio de Ingeniería  
Medioambiental Industrial**  
(EMA)  
45 científicos

**Director: Miguel Lopez-Ferber**  
[miguel.lopez-ferber@mines-ales.fr](mailto:miguel.lopez-ferber@mines-ales.fr)  
[www.mines-ales.fr/LGEI](http://www.mines-ales.fr/LGEI)  
► Presentación página 12

### UMR LISAH

**Laboratorio de Estudio de Interacciones  
de Suelo, Sistemas Agrícolas  
y Sistemas Hidrológicos**  
(INRA, IRD, Montpellier SupAgro)  
34 científicos

**Director: Jérôme Molénat**  
[jerome.molenat@supagro.inra.fr](mailto:jerome.molenat@supagro.inra.fr)  
[www.umr-lisah.fr](http://www.umr-lisah.fr)  
► Presentación página 15

### UMS OREME

**Observatorio de Investigación  
Mediterráneo de Medio Ambiente**  
(CNRS, IRD, UM2)

3 científicos sensu stricto + 6 unidades vinculadas  
**Director: Nicolas Arnaud**  
[nicolas.arnaud@gm.univ-montp2.fr](mailto:nicolas.arnaud@gm.univ-montp2.fr)  
[www.oreme.univ-montp2.fr](http://www.oreme.univ-montp2.fr)  
► Presentación página 3

... continuación página 10

## Biogeoquímica, *eventos extremos, aguas subterráneas y ciclo hidrológico en regiones mediterráneas y tropicales*

El *Laboratorio de las ciencias hídricas de Montpellier* (Unidad Mixta de Investigación Científica, UMR HSM, CNRS, IRD, UM1, UM2) participa plenamente en la investigación científica hidrológica, abarcando una problemática muy amplia que va de la biogeoquímica a los eventos extremos, pasando por las aguas subterráneas y el estudio del ciclo hidrológico.

La UMR HSM desarrolla la mayor parte de su actividad científica en regiones mediterráneas y tropicales, y se ha organizado en torno de cuatro ejes científicos:

- 1 Biogeoquímica, contaminantes, salud;
- 2 Carsts y medios heterogéneos: hidrogeología, hidráulica y transferencias;
- 3 Clima, cambios medioambientales y modelización de su impacto en el agua como recurso natural;
- 4 Mecanismos del ciclo hidrológico, transferencias e interacciones entre la superficie y la atmósfera.

Cuatro talleres transversales sobre aspectos metodológicos completan la organización del laboratorio:

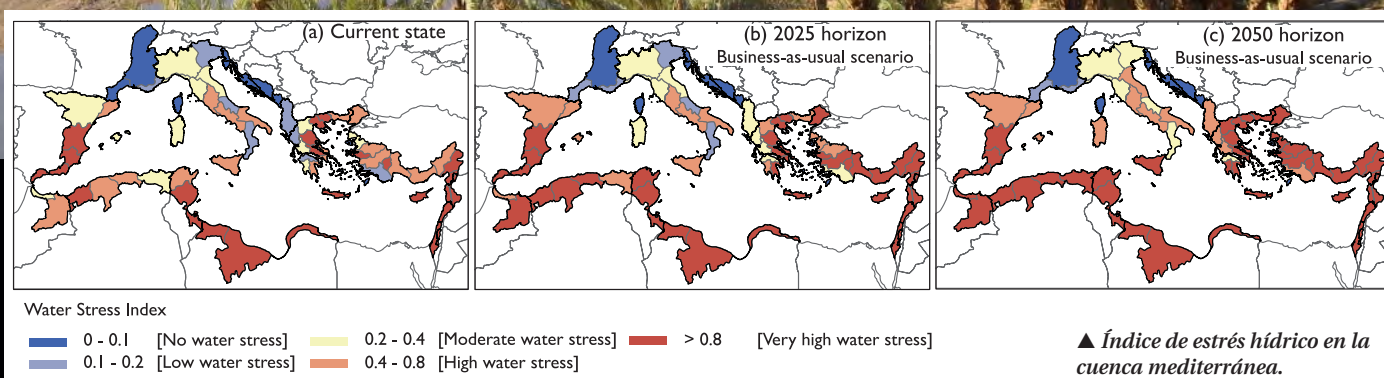
- (a) Establecimiento de modelos hidrodinámicos e interacciones;
- (b) Trazadores en la hidrosfera;
- (c) Métodos de elaboración de modelos: asimilación, representación espacial y sensibilidad;
- (d) Sistemas de información.

HSM participa muy activamente en la enseñanza y la formación a través de la investigación científica. Las formaciones que realiza el laboratorio son muy interesantes para los estudiantes que vienen de todo el territorio francés y del extranjero (especialmente de los países del sur): máster «Agua», máster «Ingeniería de sanidad», Polytech Montpellier – Ciencia y Tecnología del Agua. Además de estas formaciones, todo el personal de la UMR participa en la docencia, desde la licenciatura hasta el doctorado.

El laboratorio, para quien la observación es un componente fundamental de su investigación, es miembro del Observatorio de Ciencias del Universo (OSU) OREME (*cf. p. 13*). También participa en diferentes dispositivos de observación y observatorios de investigación medioambiental (MEDYCISS, OHMCV, AMMA-CATCH, OMERE), al tiempo que es líder en la organización del sistema de observación «Karst». Además de su propio material para estudiar la química y la microbiología del agua, funda su trabajo de investigación en dispositivos técnicos importantes: la gran plataforma técnica regional de «Análisis de rastros en el medio ambiente» y el laboratorio compartido que analiza los isótopos estables del agua.

Uno de los puntos destacados de la UMR HSM es su influencia, que se puede evaluar a través de su participación en numerosos proyectos nacionales e internacionales, a través del reconocimiento de diversas temáticas al mejor nivel internacional, y a través de una importante red de colaboración con los laboratorios e instituciones de investigación de muchas regiones del mundo, tanto del Norte como del Sur.

La UMR HSM también trabaja con organismos públicos (Dirección Regional de Medio Ambiente, Agencia Francesa de Seguridad Sanitaria del Medio Ambiente y del Trabajo), administraciones locales y regionales (mancomunidades o aglomeraciones urbanas, sindicatos mixtos de cuencas), oficinas de proyectos y numerosas empresas privadas (SDEI, BioUV S.A., SOMEZ, etc.). Para participar en el ámbito de la valorización, HSM ha registrado patentes, especialmente en el ámbito de la metrología, y ha desarrollado un software «profesional» (bases de datos). Uno de los ámbitos de excelencia de HSM es los contaminantes orgánicos, que han sido objeto de una cátedra de formación e investigación con Veolia: «Análisis de riesgos vinculados a los contaminantes emergentes en medio acuático». Además, la UMR participa en el Polo de Competitividad «Agua», a escala mundial, y en el de «Gestión de riesgos y vulnerabilidad territorial». ...



© UMR HSM & Plan Bleu

> CAMBIOS GLOBALES Y RECURSOS HÍDRICOS

## Enfrentar los cambios globales en el Mediterráneo: ¿qué recursos hídricos para el futuro?

La cuenca mediterránea se caracteriza por tener recursos hídricos limitados y repartidos de forma desigual, al igual que por un desarrollo considerable de las actividades antropogénicas. Las proyecciones hidro-climáticas sugieren una disminución progresiva de los cursos anuales medios en esta región, incluyendo períodos más frecuentes e intensos de sequía. Por otra parte, la demanda de agua se ha duplicado desde los años 50 y debería ampliarse con la extensión de la superficie irrigada y de las zonas urbanas. En el laboratorio HSM, el equipo RESCUE-Med lleva a cabo investigaciones científicas sobre la evaluación prospectiva de recursos hídricos, imponiendo escenarios climáticos y utilidades del agua a diferentes escalas en el Mediterráneo. En el marco de una tesis en curso, en cooperación con el *Plan Bleu*, se ha propuesto una cadena de modelización regional para analizar la disponibilidad futura de los recursos hídricos, en función de las evoluciones posibles del clima y de la utilización agrícola o doméstica del agua. A través de un indicador de estrés hídrico se han destacado las disparidades regionales en cuanto a la capacidad

de satisfacer las necesidades de agua en diferentes períodos, tanto en el pasado como en el futuro. También se están probando otros escenarios alternativos, como el de una mayor eficiencia de las redes de aprovisionamiento, para evaluar la eficacia de las estrategias de adaptación. Asimismo, el equipo procura evaluar el impacto de estos cambios en el recurso hídrico a escala más local. Con este objetivo se han efectuado modelos hidrológicos que incluyen la utilización local de agua en diversas cuencas como la del Ebro (España) o la del Hérault (Francia). Estas investigaciones se basan en la constitución de escenarios de cambio climático y en la evolución de la demanda de agua adaptados a estas escalas de trabajo. De este modo, se busca estimar el volumen y la dinámica de flujo, considerando las presiones antropogénicas (almacenamiento, extracción, consumo, transferencia, etc.) para suministrar los elementos que ayuden a los administradores del recurso hídrico a tomar las decisiones adecuadas.

Contacto: Denis Ruelland, [denis.ruelland@univ-montp2.fr](mailto:denis.ruelland@univ-montp2.fr)

## SICMED: evolución de los sistemas antropogénicos y ecológicos mediterráneos



▼ Paisaje cultivado en Túnez.

© R. Calvez

La región mediterránea es uno de los puntos focales del cambio global, y evoluciona rápidamente por efecto de las fuertes presiones climáticas y antropogénicas, mientras que los recursos producidos ya no bastan para satisfacer las necesidades de la población. La intensa explotación actual de los recursos incrementa la vulnerabilidad social y medioambiental, e induce fuertes tensiones en los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos.

Las situaciones críticas y los conflictos en torno de la utilización de los recursos se multiplican. La busca de nuevos modos de desarrollo sostenible pasa por un conocimiento más profundo de los factores de degradación, resistencia, flexibilidad y rehabilitación de los ecosistemas naturales y antropogénicos.

En este contexto, el programa SICMED «Superficies e Interfaces Continentales MEDiterráneas» lleva a cabo tareas de investigación científica, de formación y transferencia de conocimientos dedicadas a la comprensión de la evolución de los ecosistemas naturales y antrópicos mediterráneos rurales y periurbanos, como resultado de la presión del cambio global.

Es uno de los siete componentes de los estudios mediterráneos Mistrals (*Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales*) y, durante una década, desarrolla una investigación pluridisciplinaria de los mecanismos biofísicos, técnicos y sociales, con una triple misión:

- 1 identificar y analizar los bloqueos científicos sobre la previsión de los procesos bio-hidro-geo-químicos bajo las condiciones antropogénicas y climáticas actuales y futuras;
- 2 determinar y superar los bloqueos científicos y técnicos para lograr una administración razonada de los sistemas estudiados;
- 3 transmitir los conocimientos adquiridos a los responsables de la toma de decisiones y a los administradores privados y públicos.

Con el apoyo financiero actual del IRSTEA, el CNRS-INSU, el INRA y el IRD, el programa SICMED se funda en una amplia cooperación multilateral en la que participan instituciones científicas y actores representativos de países del contorno mediterráneo pero también de otros países que participan en la investigación y desarrollo del espacio mediterráneo.

**Contactos: Christian Leduc, [christian.leduc@ird.fr](mailto:christian.leduc@ird.fr)  
Jean-Claude Menaut, [jean-claude.menaut@cesbio.cnes.fr](mailto:jean-claude.menaut@cesbio.cnes.fr)  
Marc Voltz, [marc.voltz@supagro.inra.fr](mailto:marc.voltz@supagro.inra.fr)  
& Maxime Thibon, [maxime.thibon@ird.fr](mailto:maxime.thibon@ird.fr)**

Para más información sobre SICMED: [www.sicmed.net](http://www.sicmed.net)

Para más información sobre Mistrals: [www.mistrals-home.org](http://www.mistrals-home.org)

### Otros equipos que trabajan en este tema

#### UMR ESPACE-DEV

Espacio para el desarrollo  
(IRD, UM2, UAG, UR)  
60 científicos

Director: Frédéric Huynh  
[frederic.huynh@ird.fr](mailto:frederic.huynh@ird.fr)  
[www.espace-dev.fr](http://www.espace-dev.fr)  
► Presentación página 47

#### UMR G-EAU

Gestión del Agua, Actores, Usos  
(AgroParisTech, IRSTEA, CIHEAM-IAMM,  
CIRAD, IRD, Montpellier SupAgro)  
75 científicos

Director: Patrice Garin  
[patrice.garin@irstea.fr](mailto:patrice.garin@irstea.fr)  
[www.g-eau.net](http://www.g-eau.net)  
► Presentación página 40

#### UMR ITAP

Información – Tecnología – Análisis  
Medioambiental – Procedimientos Agrícolas  
(IRSTEA, Montpellier SupAgro)  
40 científicos

Director: Tewfik Sari  
[tewfik.sari@irstea.fr](mailto:tewfik.sari@irstea.fr)  
[www.irtsea.fr/itap](http://www.irtsea.fr/itap)  
► Presentación página 28

#### UMR TETIS

Territorios, Medio Ambiente,  
Teledetección e Información Espacial  
(AgroParisTech, CIRAD, IRSTEA)  
70 científicos

Director: Jean-Philippe Tonneau  
[jean-philippe.tonneau@cirad.fr](mailto:jean-philippe.tonneau@cirad.fr)  
<http://tetis.teledetection.fr>  
► Presentación página 46

### Transferencias de masa y de energía en los acuíferos porosos, fracturados o cársticos

*Geociencias de Montpellier* (UMR GM, CNRS, UM2) desarrolla un enfoque global de la dinámica terrestre y de sus manifestaciones de superficie, teniendo en cuenta las interacciones entre los diferentes sistemas, entre los cuales se cuenta la hidrosfera. El objetivo es mejorar la comprensión de los procesos dinámicos (*sensu lato*) en diferentes escalas, en su interacción con las expectativas de la sociedad tales como:

- aprovisionamiento de recursos no energéticos (minerales e hídricos);
- energías del futuro, ya sea prolongando las reservas basadas en carbono o desarrollando nuevos sectores energéticos (hidrógeno natural, geotermia, etc.);
- almacenamiento y confinamiento de desechos (aguas abajo del ciclo nuclear, CO<sub>2</sub>, desechos mineros, etc.);
- riesgos naturales (terremotos, tsunamis, riesgos por gravedad, inundaciones, etc.);

- cambios medioambientales y climáticos con fuerte impacto antrópico (evolución de la línea costera e intrusión de agua salada en el litoral).

La UMR GM cuenta con cinco equipos pluridisciplinarios, organizados en torno de tres ejes científicos:

- Geodinámica (equipos «Dinámica de la litósfera» y «Manto e Interacciones»)
- Reservorios (equipos «Cuencas» y «Transferencias en medios porosos»)
- Riesgos (equipo «Riesgos»)

Los temas de investigación sobre el agua están a cargo de los equipos «Transferencias en medios porosos» y «Riesgos». Se ocupan de la caracterización y la modelización de las transferencias de masas y de energías en los acuíferos porosos, fracturados y cársticos. Los principales retos científicos están vinculados a la medida de esas transferencias *in situ* y al estudio de las heterogeneidades que las controlan en todas las escalas. Incluyen cuatro ejes de investigación sobre el desarrollo (1) de sitios instrumentados (Mayorca, Maguelone, Roussillon, Larzac, Lodève) dedicados

tanto a la observación como a la experimentación, (2) de instrumentos que permiten efectuar experiencias dinámicas controladas, (3) de sistemas de medida y vigilancia hidrogeofísica tanto en superficie como en pozos, y (4) de instrumentos digitales originales que permiten integrar los datos obtenidos en diferentes escalas. Estas obras se realizan en el marco de varios proyectos de la Agencia Nacional de Investigación (MOHINI, GRAIN D'SEL, LINE, COLINER, HYDROKARST-G2) y SOERE H+ (Sistemas de Observación y de Experimentación a largo plazo para investigaciones medioambientales en el sector de hidrogeología). GM está a cargo de varios centros experimentales de SOERE H+ en el contorno mediterráneo.

GM es miembro del Observatorio de Investigación Mediterránea de Medio Ambiente (*Observatoire de Recherche Méditerranéen de l'Environnement* - OREME) y está a cargo de varias tareas de observación (SO-LTC, GPST2, GEK, Hidrogeofísica de Perforación). GM forma parte del gran conjunto técnico regional «Análisis de rastros de elementos en el medio ambiente» y da cabida al material de las plataformas nacionales «Gravimetría» y «Experimentación» (Gravímetro absoluto y MEB-EBSD) del Instituto Nacional de Ciencias del Universo.

GM está en el centro de una amplia red de cooperación nacional e internacional, tanto europea (redes Marie-Curie, FP7), como

mediterránea (África del Norte, Oriente Medio) y abierta a la mayor parte de los continentes (Taiwán, Japón, India, Australia, Nueva Zelanda, Irán, Brasil, México, Estados Unidos). GM también colabora con el mundo socioeconómico, en particular a través de la creación de empresas por parte de los doctorandos y la financiación de los contratos de investigación y de tesis. Citemos el Cluster de Geociencias, creado en 2011, que reúne a las principales empresas de la región (Geoter, Cenote, imaGeau, Schlumberger, Fugro, Antea, Areva, Lafarge) y los organismos de investigación y formación (GM, BRGM, EMA, CEFREM, HSM). Muchos de estos actores trabajan en el ámbito del agua. ●●●

> CAMBIOS GLOBALES Y RECURSOS HÍDRICOS

## OMERE: Observatorio Mediterráneo de Medio Ambiente Rural y Agua



© M. Soulié

▲ Instrumentos del centro de Roujan (Hérault, Francia) que forma parte del observatorio OMERE.

El observatorio OMERE estudia los cambios globales que afectan los sistemas hidrológicos y los sistemas agrícolas mediterráneos. Se ha centrado en el contexto hidrológico que se halla entre los medios áridos y templados, sometidos a una extensa gama de procesos hidrológicos que van de los fenómenos de sequía intensa a las crecidas extremas, y en un contexto social y humano que atraviesa actualmente unas evoluciones considerables (intensificación de la producción agrícola en las zonas favorables, abandono de zonas donde la producción no se puede intensificar, aumento de la captación de agua, obras y modificaciones hidrológicas y agrícolas, o de conservación del medio), vinculadas a un rápido incremento de la densidad de población. Los diferentes escenarios sobre el cambio climático, elaborados por el Grupo de Expertos Intergubernamentales sobre la Evolución del Clima, prevén importantes modificaciones pluviométricas en estas latitudes: rarefacción de las precipitaciones de invierno, aumento de lluvias extremas, etc.

En este contexto mediterráneo singular, desde hace dos décadas el observatorio está adquiriendo los datos climáticos, hidrológicos, de sedimentación y de solutos, en dos cuencas hidrológicas diferentes desde el punto de vista de los suelos, de las obras y de las modificaciones hidrológicas y agrícolas, de técnicas de cultivo y su dinámica de evolución: Roujan (Francia, principalmente viticultura) y Kamech (Túnez, policultivo y producción pecuaria). El observatorio busca: i) comprender el impacto de las actividades agrícolas en los flujos de masa de las cuencas hidrológicas elementales mediterráneas (regímenes y balances hidrológicos, atribución del recurso hídrico, dinámicas de erosión, evolución de la calidad del agua); ii) evaluar intensidad y velocidad de evolución cuantitativa y cualitativa de los recursos hídricos y de los suelos en función de los cambios de utilización de las tierras; iii) sostener la modelización de los flujos en medios cultivados, vinculando estrechamente observaciones y modelos; iv) suministrar las bases científicas, referencias y herramientas de diagnóstico a la ingeniería agrícola y medioambiental, correspondientes a los paisajes cultivados. La UMR HSM, el Instituto Nacional de Agronomía de Túnez, y la UMR LISAH son los cuatro actores a cargo de la coordinación y la gestión de OMERE. El observatorio pertenece a la red francesa de cuencas hidrológicas\*.

**Contactos: Patrick Andrieux, [patrick.andrieux@supagro.inra.fr](mailto:patrick.andrieux@supagro.inra.fr)  
& Damien Raclot, [damien.raclot@ird.fr](mailto:damien.raclot@ird.fr)**

Para más información: [www.umr-lisah.fr/omere](http://www.umr-lisah.fr/omere)  
\* <http://rnbv.ipgp.fr>

## La plataforma OpenFLUID: modelización y simulación del funcionamiento espacial de paisajes cultivados

El funcionamiento espaciotemporal de paisajes cultivados resulta de interacciones complejas entre procesos biofísicos y actividades humanas. La elaboración de modelos sobre el funcionamiento de tales sistemas y la simulación de su evolución bajo el impacto de los cambios climáticos y de las presiones antropogénicas (contaminaciones, obras y modificaciones, cambios en la ocupación de los suelos, etc.) requieren que se tengan en cuenta explícitamente todas estas interacciones y, por lo tanto, las interacciones de numerosos procesos y/o fenómenos distribuidos en el espacio estudiado. Para llevar a cabo esta modelización y ejecutar las simulaciones basadas en la interacción de estos modelos, la UMR LISAH ha desarrollado un software avanzado y genérico.



▲ Simulaciones de nivel de agua en la red hidrográfica de Roujan (Hérault, Francia), utilizando el modelo MHYDAS de la plataforma de modelización OPENFLUID.

Así, la plataforma OpenFLUID ofrece un entorno de software para establecer modelos y simular el funcionamiento espacial de territorios cultivados, desde el desarrollo de modelos hasta su aplicación en las simulaciones. Estos modelos se desarrollan en forma de complementos de software para OpenFLUID. Después, se pueden crear modelos que interactúen entre sí, adaptados (i) al contexto de modelización, (ii) a los objetivos de simulación y (iii) a los datos disponibles. Las simulaciones se basan en representaciones digitales de los paisajes estudiados que tienen en cuenta de forma explícita la geometría y las propiedades de los elementos reales del paisaje. OpenFLUID ha sido utilizado en el marco de numerosos proyectos y tesis. Se lo ha aplicado al medio mediterráneo e incluso tropical, para establecer modelos de flujos de agua y agentes contaminantes, y de erosión, especialmente por el impacto de las técnicas agrícolas utilizadas. OpenFLUID también sirve para desarrollar y aplicar el modelo MHYDAS (Elaboración de Modelos Hidrológicos Distribuidos de Sistemas Agrícolas) con el cual, entre otras cosas, se puede efectuar una representación digital de las cuencas hidrológicas cultivadas y simular los flujos de agua y de sustancias contaminantes. OpenFLUID cuenta con una interfaz gráfica para el usuario y también se lo puede emplear con línea de comando (por ejemplo, en un cluster de cálculo). Se encuentra disponible bajo licencia libre y *open-source*, y se lo puede descargar en el sitio Internet de OpenFLUID\*.

**Contactos:** Jean-Christophe Fabre, [fabrej@supagro.inra.fr](mailto:fabrej@supagro.inra.fr) & Roger Moussa, [moussa@supagro.inra.fr](mailto:moussa@supagro.inra.fr)

\* [www.umn-lisah.fr/openfluid](http://www.umn-lisah.fr/openfluid)

### Análisis del ciclo hidrológico para la investigación, las actividades económicas e industriales

El **Laboratorio de Ingeniería de Medio Ambiente Industrial (LGEI)** es uno de los tres laboratorios de la *École des Mines d'Alès* (EMA – Escuela de Ingeniería), considerado como un organismo público de carácter administrativo, dependiente del Ministerio de Industria. Su investigación pluridisciplinaria cubre un amplio campo de aplicaciones, basándose en disciplinas complementarias tales como: ingeniería de procesos, química analítica y metrología, microbiología, biología molecular, hidrología, hidrogeología, geomática, métodos geoestadísticos, informática y modelización, herramientas de simulación y de ayuda a la toma de decisiones.

La problemática del agua se aborda a partir de diferentes perspectivas: el dominio de los impactos catastróficos en un territorio resistente; comprensión y especialización de los procesos hidrológicos de las

cuencas hidrográficas (modelización); diagnóstico de la calidad química y ecológica del agua y de los efluentes; desarrollo de procesos y combinación de interacciones en el tratamiento del agua y los efluentes; gestión integrada de los flujos contaminantes (medio industrial, recursos hídricos) según un enfoque de tipo «ecología territorial»; geomática e inteligencia colectiva para ayudar a la toma de decisiones. Estos diferentes niveles de análisis del ciclo del agua responden a los interrogantes planteados no sólo a nivel de la investigación científica, sino también de la actividad económica e industrial.

El LGEI forma parte del Instituto Carnot M.I.N.E.S., y ha sido homologado nuevamente, mostrando así el lugar privilegiado que cobran las relaciones entre el LGEI y el sector económico. El Laboratorio participa en los polos de competitividad Agua, Trimatec, Riesgos y vulnerabilidad territorial, y Eurobiomed. Mantiene una nutrida colaboración académica e industrial a nivel nacional e internacional, participando en varios proyectos europeos y asegurando la coordinación de dos de ellos\*.

Están presentes los equipos materiales propios a un laboratorio de química medioambiental (HPLC/MS/MS,

GC/MS/MS, ICP, extractores, etc.) al igual que una nave de pruebas en donde se pueden llevar a cabo experimentaciones piloto a escala semi industrial. Estas instalaciones están a disposición de los equipos académicos e industriales, en el marco de las plataformas tecnológicas regionales, entre las cuales se cuenta Ecotech LR (Ecotecnología para los procesos agrícolas y biológicos).

Por lo demás, el seguimiento hidrométrico de las cuencas hidrológicas experimentales representa una investigación básica para comprender los procesos que generan crecidas de cinética rápida. Este trabajo se lleva a cabo desde 2001, en colaboración con UMR ESPACE-DEV, HSM y TETIS. Actualmente se efectúa un seguimiento de varias cuencas hidrográficas en Cévennes, y gracias a la diversidad de los dispositivos experimentales se obtienen imágenes correspondientes al cálculo de velocidades y caudales de los cursos de agua; también se emplean dispositivos *low cost* para proseguir y afinar el análisis hidrométrico distribuido.

\* SWIFT: Screening Methods for Water Data Information in Support of the Implementation of the WFD. KNAPPE: Knowledge and Need Assessment on Pharmaceutical Products in Environmental waters



▲ Experimentos de coloración del agua para caracterizar transferencias y evaluación de vulnerabilidades del sistema hidrológico cárstico del río Lez (Francia).

© V. Leonardi

## Observar para comprender la dinámica de los recursos hídricos y facilitar su administración

El *Observatorio de Investigación Mediterránea del Medio Ambiente* (unidad mixta de servicios UMS OREME, CNRS, IRD, UM2) es un observatorio de ciencias del universo (OSU) dedicado al estudio de los avatares y de la vulnerabilidad de los medios mediterráneos. El Observatorio se focaliza en los riesgos naturales, los recursos y el impacto de los cambios globales y antrópicos en el espacio mediterráneo viviente e inerte, para hallar los mecanismos a través de los cuales estos sistemas responden a los factores de forzamiento naturales y antrópicos.

Su misión consiste en recoger, integrar y compartir los datos que se observan en períodos prolongados, para comprender la evolución de los recursos y de los medios naturales. Estos datos también son elementos indispensables para la constitución de modelos explicativos y predictivos.

El observatorio lleva a cabo acciones en sólida interacción con interlocutores públicos (laboratorios de ciencias del universo y de ecología, de ciencias de la información, administraciones regionales, agencias nacionales), y con interlocutores privados (especialmente IBM).

El observatorio desarrolla, junto a otros laboratorios, diversos sistemas de observación de los sistemas hídricos, desde la escala de una

cuenca hidrológica a la de los pozos perforados in situ:

- Observación geodésica, gravimétrica, geofísica/hidrogeofísica sistemática en perforación, a todas las escalas.
- Sistema de observación a escala múltiple de la dinámica de las crecidas y de la hidrodinámica subterránea de los sistemas fracturados y cársticos.
- Sistema de observación de la contaminación y de la adaptabilidad biológica, aguas abajo de las antiguas explotaciones mineras.
- Seguimiento del litoral de Languedoc, interfaz entre la cuenca hidrográfica y el espacio marino.

Estos sistemas de observación, la mayor parte de los cuales pertenecen a redes francesas e internacionales, dan información sobre la dinámica del recurso hídrico, especialmente en los acuíferos cársticos, y permiten efectuar un seguimiento de la cantidad y la calidad de los recursos que alimentan los acuíferos. Con los métodos geofísicos se puede hacer un seguimiento de los movimientos del agua del subsuelo, y se vincula la alimentación de los acuíferos con su descarga, para comprender el ciclo hidrológico y analizarlo en lo referente a la cantidad de agua disponible como de los riesgos hidrológicos, por ejemplo de descarga repentina.

La cantidad y calidad del recurso hídrico disponible en cada lugar que lo utilice es fruto de un sistema complejo que conjuga la modelización del almacenamiento, de la circulación y de las interacciones físico-bioquímicas que se producen en diferentes compartimientos... Estos factores de forzamiento

son otras tantas condiciones que sientan los límites del sistema antrópico, que requieren a su vez la realización de simulaciones complejas: modelización del recurso hídrico y modelización en tiempo real de su utilización y de sus efectos inmediatos. Actuando de lleno en este proceso de comprensión, los datos, ya sean recogidos, calculados o asociados a las diferentes utilizaciones, deben tratarse en el continuum «adquisición-refinamiento-tratamiento-decisión». Gracias a su red de cooperación y a su experiencia, el Observatorio interviene en diferentes momentos de ese continuum, en particular en la adquisición (gestión de redes de sensores), el almacenamiento, la forma de compartir los datos (gestión de normas y normas de interrogación, gestión de metadatos, servicios web, etc.) y la ayuda a la toma de decisiones (detección de cambios, fusión de información, razonamiento, interacciones con los usuarios, visualización, sistemas de ayuda a la toma de decisiones, recomendación, predicción, tiempo real).

La gestión del recurso hídrico debe evitar las crisis y, cuando se producen, debe administrarlas. Es menester que la modelización del recurso hídrico permita hacer una proyección casi en tiempo real, para que el análisis de riesgo y las decisiones que se tomen también sean en tiempo real. Recurrir a modelos operativos de ayuda a la decisión es un paso necesario. Para ello, las simulaciones «de base», fundadas en datos fiables, ya se deben haber realizado, cuando se trata de simulaciones muy pesadas, evitando así hacer modelizaciones completas que consumen mucho tiempo. ●●●



▲ “Fuente de Vaucluse” (Francia), en primavera, con mucha agua.

© UMR EMMAH

## Medio ambiente mediterráneo y modelización de los sistemas agrícolas e hídricos

La región mediterránea constituye un ámbito de estudio privilegiado para las investigaciones que lleva a cabo la **UMR Medio ambiente mediterráneo y modelización de sistemas agrícolas e hídricos** (EMMAH, INRA Avignon, UAPV), sobre el análisis del impacto de los cambios globales en los recursos hídricos, la producción agrícola y sus interacciones en el territorio (del paisaje a la cuenca de producción y al acuífero). Estas investigaciones se estructuran en cinco ejes pluridisciplinarios. El primero de ellos cuantifica el impacto de los cambios globales en las interacciones entre los procesos biofísicos de superficie (producción agrícola, ciclo del agua) y los recursos hídricos, en particular los recursos subterráneos. El segundo eje identifica la evolución de los paisajes y sus determinantes a partir de un análisis retrospectivo que abarca varias décadas. El tercer eje capta las modificaciones inducidas por los eventos climáticos extremos (sequía o canícula) en el funcionamiento de los sistemas agrícolas y ecológicos. El cuarto eje busca comprender y establecer modelos sobre el impacto de las lluvias intensas en el funcionamiento hidrológico e hidroquímico del sistema constituido por el suelo y las napas. Por último, con el quinto eje la UMR EMMAH

se interesa en los aspectos que destacan otras técnicas de irrigación alternativas como la utilización del agua que se obtiene en las estaciones de depuración, y cuantifica los riesgos vinculados a la presencia de agentes patógenos humanos en esas aguas servidas.

Sus reflexiones se basan en la utilización de datos de teledetección y de geofísica, la observación intensiva de las estaciones dotadas de instrumentos, de las medidas que se llevan a cabo en laboratorio y de los desarrollos metodológicos destinados a comprender mejor y desarrollar modelos sobre el funcionamiento de los ecosistemas mediterráneos. La UMR EMMAH lleva a cabo un seguimiento de las estaciones de observación que sean representativas de los diferentes contextos hidrogeológicos y agronómicos (región Crau-Camargue, acuífero cárstico de Fontaine de Vaucluse, zona periurbana de Avignon), al igual que dos talleres dedicados al estudio de los flujos hídricos hacia la atmósfera y hacia la napa. Asimismo, cuenta con laboratorios para efectuar medidas biológicas (biomasa, índice foliar, contenido de clorofila, etc.), análisis químico del agua y del suelo (química orgánica y mineral), al igual que análisis isotópicos del agua ( $H^3$ ,  $C^{14}$ , proporción de  $C^{13}/C^{12}$  del carbono disuelto) y medidas efectuadas sobre las propiedades hidrodinámicas de los suelos. EMMAH ha tenido un acceso privilegiado al Laboratorio Subterráneo de Bajo Ruido de Rustrel (Vaucluse), en el macizo cárstico de *Fontaine de Vaucluse*, al igual que

un acceso al laboratorio de biología molecular del INRA de Avignon. Además, cuenta con equipos que efectúan una prospección geofísica debajo de la superficie (tomografía eléctrica). Los investigadores desarrollan modelos mecanicistas de funcionamiento de los sistemas hidrológicos, integrando y representando espacialmente, por una parte, los modelos elementales correspondientes a los diferentes procesos y, por otra parte, desarrollando nuevos enfoques de modelización que tienen en cuenta las heterogeneidades del medio y de los procesos a diferentes escalas.

Las competencias disciplinarias y las técnicas utilizadas conciernen la hidrología, la hidrogeología, la geoquímica y la microbiología de suelos y aguas, la agronomía, la teledetección y la geofísica, las matemáticas aplicadas, la física de ondas en medios porosos, la simulación digital y el cálculo paralelo, al igual que el tratamiento de la señal.

Los interlocutores científicos de la UMR son oriundos del mundo académico francés (Instituto Nacional de Investigación Agronómica, Comisariado de Energía Atómica y de Energías Alternativas, universidades, Centro Nacional de Investigación Científica, etc.), o internacional (Túnez: Escuela Nacional de Ingenieros de Sfax, España: Instituto de Agricultura Sostenible, Universidad de Valencia, Países Bajos: *Dutch National Aerospace Laboratory, University of Twente*, Estados Unidos: universidades de Maryland y de Boston, etc.).

EMMAH también tiene acuerdos de cooperación con los organismos institucionales o administraciones francesas (Agencia del Agua de Ródano-Mediterráneo-Córcega, sindicatos de irrigadores y de agricultores, sindicatos mixtos de administración de recursos hídricos subterráneos) al igual que con empresas privadas (Véolia, Suez Environnement, oficinas de proyectos, etc.).

## Punto de encuentro entre ciencias del suelo, hidrología y agronomía: el funcionamiento de los paisajes cultivados

El tema central de la investigación científica del *Laboratorio de interacciones entre suelo, sistemas agrícolas y sistemas hidrológicos* (UMR LISAH, INRA, IRD, Montpellier SupAgro) es el funcionamiento de los paisajes cultivados, que resulta de las interacciones entre 1) el suelo, soporte del paisaje, 2) el sistema agrícola, fuente de forzamientos y modificaciones de la geometría del paisaje, y 3) el sistema hidrológico, generador de transferencias de

agua y elementos. Sus objetivos específicos son:

- desarrollar los conocimientos sobre la erosión, las transferencias de agua y materia, y el devenir de las sustancias contaminantes (pesticidas) en los suelos y en las cuencas hidrográficas rurales en relación con su organización en el espacio y su evolución en el tiempo;
- elaborar instrumentos que permitan diagnosticar y prevenir los riesgos inducidos por las actividades humanas (medios cultivados) en los regímenes hidrológicos y la evolución de los recursos hídricos y de suelos;
- contribuir a definir nuevos modos de gestión sostenible del espacio rural;
- enseñar a los estudiantes los conceptos e instrumentos de análisis y modelización de la organización espacial, y la hidrología de los medios cultivados.

El Laboratorio agrupa competencias en ciencias del suelo, hidrología, agronomía y representación espacial, y se estructura en torno de tres equipos de investigación:

- Agua y contaminantes en cuencas hidrológicas cultivadas;
- Erosión y transporte sólido en cuencas hidrológicas cultivadas;
- Estructura especial y dinámica de suelos y paisajes cultivados.

Las principales acciones del LISAH se concentran en el estudio del impacto de la agricultura en la viticultura de Languedoc y en las plantaciones de plátano de Las Antillas, en relación a la contaminación de suelos y aguas con productos fitosanitarios, el análisis del ciclo hidrológico del sistema «suelo-cultivos» a escala de las cuencas hidrológicas elementales (unos pocos km<sup>2</sup>) y las cuencas que constituyen recursos hídricos (varios centenares de km<sup>2</sup>) mediterráneos, el desarrollo de métodos de cartografía digital de suelos y de sistemas de información pedológicos, el análisis del determinismo y de los procesos de erosión de suelos y la transferencia de sedimentos en las cuencas hidrológicas, al igual que el estudio de la influencia de las obras hidráulicas (cunetas, canales, lagunas y estanques de retención) en el funcionamiento hidrológico de suelos y cuencas hidrológicas cultivadas.

La política científica del LISAH se funda tanto en los estudios y experimentaciones hidrológicas de terreno, como en las investigaciones metodológicas para adquirir y procesar los datos espacializados del suelo y del paisaje, y el desarrollo de modelizaciones hidrológicas distribuidas que permiten representar las heterogeneidades específicas de los paisajes rurales. ●●●

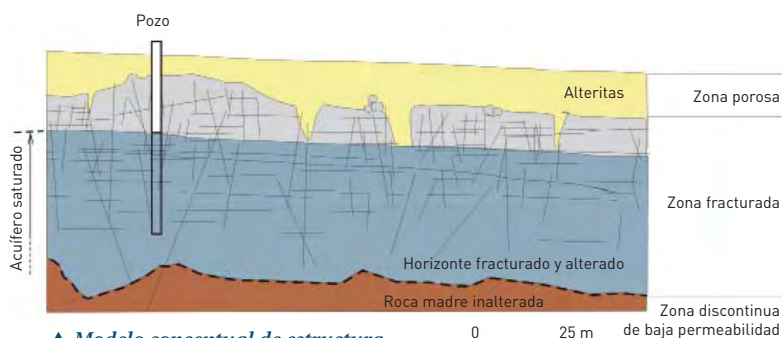
>FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS COMPLEJOS

## Acuíferos de la roca madre: un recurso hídrico que se debe administrar con cuidado

La roca madre (granitos, esquistos, gneis, etc.) ocupa una superficie importante, tanto a escala del globo como en Europa o en Francia. Sus recursos hídricos subterráneos participan significativamente en el desarrollo rural y económico de las regiones respectivas, especialmente en los países emergentes, en contexto árido o semiárido, cuando existen cantidades limitadas de agua en la superficie.

La unidad de investigación EAU/NRE del BRGM contribuye al desarrollo de los conocimientos sobre la génesis, la geometría, las propiedades hidráulicas y el funcionamiento de los acuíferos de la roca madre. Estos conocimientos han progresado muy significativamente y se ha podido demostrar que los procesos de alteración climática tienen un papel importante por sus propiedades acuíferas, con el desarrollo de perfiles de alteración que incluyen, de arriba hacia abajo: alteritas muebles (arenas en medio granítico) que se caracterizan por una permeabilidad relativamente escasa pero por una significativa capacidad de almacenar aguas subterráneas; un «horizonte fisurado», estratiforme, de 50 a 100 metros de grosor, fuertemente influido también por los procesos de alteración, a los cuales el acuífero de roca madre debe la mayor parte de su permeabilidad.

De estos conceptos geológicos e hidrogeológicos resultan numerosas aplicaciones prácticas. Se trata de la cartografía



▲ Modelo conceptual de estructura y propiedades hidrológicas de los acuíferos de la roca madre.

© J.C. Maréchal

regional del agua subterránea potencial y la regionalización de los parámetros hidrodinámicos para establecer modelos. Otras aplicaciones involucran herramientas para administrar el recurso hídrico en la cuenca hidrológica, lo que resulta indispensable en determinados contextos de irrigación intensiva. También se incluyen técnicas y métodos para efectuar pozos, mejorando el caudal operativo que se puede obtener.

Contactos: Jean-Christophe Maréchal, [jc.marechal@brgm.fr](mailto:jc.marechal@brgm.fr) & Benoît Dewandel, [b.dewandel@brgm.fr](mailto:b.dewandel@brgm.fr)

A estos efectos, el LISAH administra un observatorio de investigaciones medioambientales que se denomina OMERE (Observatorio Mediterráneo de Medio Ambiente Rural y Agua, *cf. p. 11*), cuyo objetivo es analizar el impacto de la acción antropogénica en la erosión física y química de los suelos mediterráneos y en la calidad del agua. Desde 2006, el LISAH también desarrolla una plataforma de simulación de flujos en los paisajes cultivados: la plataforma informática de modelización OpenFLUID (*Software Environment for Modelling Fluxes in Landscapes, cf. p. 12*). Esta plataforma suministra un apoyo informático para efectuar los modelos y simulaciones de flujo en el paisaje.

El laboratorio LISAH se encuentra en Francia en el campus agronómico de la Gaillarde (Montpellier) y en el contorno mediterráneo. El organismo colabora con instituciones de investigación y enseñanza superior tunecinas y marroquíes: Instituto Agronómico y Veterinario Hassan II de Rabat, Instituto Nacional de Investigación en ingeniería rural, aguas y bosques, y el Instituto Nacional Agronómico de Túnez, Escuela Nacional de Ingenieros de Túnez, Centro Nacional de Cartografía y Teledetección. Trabaja, asimismo, en cooperación con actores públicos y privados que administran recursos hídricos y suelos.

### Hidrogeólogos y economistas al servicio de la gestión de los recursos hídricos

La unidad propia de investigación «*Nuevos Recursos y Economía*» (UPR EAU/NRE) de Montpellier pertenece al servicio AGUA del BRGM, y cuenta con 14 personas, en su mayor parte permanentes.

El equipo está compuesto por ocho hidrogeólogos y seis economistas, cuyas investigaciones se centran en la administración del recurso hídrico. La actividad de NRE se desarrolla en dos ejes científicos principales:

- El primer eje desarrolla soluciones alternativas a los recursos hídricos convencionales, sobre los cuales pesan exigencias de crecimiento tales como el cambio climático, la presión antropogénica, la evolución socioeconómica, la urbanización, etc. Más específicamente, la UPR EAU/NRE busca (i) caracterizar la estructura y el funcionamiento de los acuíferos complejos (carst, zócalo fracturado, medio volcánico) para evaluar su potencialidad, (ii) desarrollar instrumentos de modelización y de ayuda a la decisión para administrar estos acuíferos y prever el impacto de los cambios globales, y (iii) desarrollar métodos activos para administrar los recursos (reciclado de aguas servidas, recarga artificial, almacenamiento entre dos temporadas y sobre-explotación razonada).


- El segundo eje consiste en desarrollar los enfoques económicos necesarios para evaluar los escenarios de gestión de los recursos hídricos a escala de las cuencas. Las investigaciones se orientan especialmente en la evaluación económica de los programas de medidas y en las políticas de gestión del recurso hídrico en función de los usos, la optimización económica de los planes de gestión de recursos a través de un análisis de coste-eficacia, la evaluación de los beneficios en el marco de los arbitrajes entre desarrollo económico y política medioambiental, la evaluación contingente a través de encuestas

y la elaboración de escenarios de evolución de los usos del agua a medio y largo plazo (análisis prospectivo).

Varios investigadores de la unidad EAU/NRE participan en formaciones profesionales continuas, al igual que en el máster «Agua» de Montpellier y en estudios de máster o de ingeniería hidrológica.

La unidad de investigación mantiene una sostenida cooperación internacional con el Centro Franco Indio de Investigación de Aguas Subterráneas. Este laboratorio mixto BRGM-NGRI (*National Geophysical Research Institute*) que se encuentra en Hyderabad, en el sur de India, ha desarrollado una actividad de investigación en los acuíferos de roca madre en región tropical, con un sistema de observación que lleva el sello SOERE (H+). Además, desarrolla las herramientas que permiten efectuar una gestión de las napas acuíferas que han padecido un fuerte impacto debido a la agricultura (napas de las que se bombea agua para irrigación, contaminaciones de diversa índole), y a los cambios climáticos.

La actividad científica de NRE está fuertemente orientada a la investigación aplicada al servicio de las administraciones locales y regionales, las agencias del agua y la industria. Varios proyectos han conducido a desarrollar metodologías para estudiar yacimientos de agua mineral y a su administración para fines industriales, como es el caso, por ejemplo, de Nestlé Waters y Danone Eaux France. Por lo demás, la unidad NRE participa estrechamente en el Polo de Competitividad «Agua», que tiene una dimensión mundial. ■



► *Muestras de agua de zonas no saturadas del acuífero cárstico en el Laboratorio de Bajo Ruido de Rustrel (Vaucluse, Francia).*

## > ACUÍFEROS CÁRSTICOS MEDITERRÁNEOS: UNOS SISTEMAS COMPLEJOS

Los acuíferos cársticos representan una parte importante del recurso hídrico en Francia (35% del territorio), especialmente en el contorno mediterráneo (> 50%). Estas zonas son objetos complejos porque son heterogéneos (con vacíos de dimensión variable, desde una fractura de unos pocos centímetros hasta un abismo de varios metros) y se caracterizan por un funcionamiento hidrológico particular. Debido a su complejidad, están globalmente subempleados y además la utilización de este recurso debe tener en cuenta las características propias de los sistemas cársticos, especialmente su vulnerabilidad a la contaminación y a una utilización excesiva. En regiones donde el agua ya es un bien escaso y en un contexto de cambio global, una mejor comprensión del funcionamiento de estos acuíferos es indispensable para utilizarlos y/o protegerlos de forma óptima y duradera. Las unidades regionales de investigación desarrollan diferentes enfoques complementarios en este sentido.

## > FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS COMPLEJOS

# Estudio del funcionamiento de la zona no saturada de los sistemas cársticos

El funcionamiento de la zona no saturada de los sistemas cársticos, que se puede desarrollar en varias decenas e incluso centenas de metros, todavía no se conoce bien y no se ha traducido en un modelo, mientras que actualmente se considera que desempeña un papel de primera importancia en la dinámica de las transferencias y en el almacenamiento.

Como resultado de cavar una galería artificial sin tener en cuenta ninguna consideración hidrogeológica, el Laboratorio Subterráneo de Bajo Ruido (LSBB) de Rustrel (Vaucluse) separa de forma aleatoria el flujo del macizo calcáreo de los Montes de Vaucluse, en una longitud de 3.800 metros, entre 0 y 500 metros de profundidad, permitiendo así acceder directamente a la zona no saturada de un carst, lo que es excepcional. Gracias a las medidas directas (geológicas, hidrodinámicas, hidroquímicas) e indirectas (hidrofísicas y geofísicas) realizadas en este lugar, la UMR EMMAH desarrolla un modelo del funcionamiento de la zona no saturada de los acuíferos cársticos. En el futuro, se podrá evaluar con precisión el impacto de la zona no saturada en el funcionamiento global de estos sistemas acuíferos. El centro experimental del LSBB, que se encuentra en la cuenca de alimentación de la Fontaine de Vaucluse, servirá como referencia para desarrollar este modelo que, más adelante, se validará y afinará aplicándolo a otros sistemas.

Más allá de la noción de acuífero cárstico en sentido estricto, las obras realizadas en la cuenca hidrológica de la Fontaine de Vaucluse integran todo su territorio situado aguas arriba, habiéndose trabajado su vegetación, la ocupación del suelo, la definición y la cartografía de las unidades de drenado. El impacto de este sistema en el medio, aguas abajo de la fuente, también ha sido estudiado en diferentes aspectos (anuncio de crecida, biodiversidad y turismo verde).

**Contactos: Christophe Emblanch, [christophe.emblanch@univ-avignon.fr](mailto:christophe.emblanch@univ-avignon.fr)  
Charles Danquigny, [charles.danquigny@paca.inra.fr](mailto:charles.danquigny@paca.inra.fr)  
& Kostantinos Chalikakis, [konstantinos.chalikakis@univ-avignon.fr](mailto:konstantinos.chalikakis@univ-avignon.fr)**

© UMR EMMAH

>FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS COMPLEJOS

## Gestión de usos múltiples del acuífero cárstico de la cuenca hidrológica del Lez



© M. Soulié

▲ Fuente del río Lez, cerca de Montpellier, Francia.

La línea de investigación «Carst y medio heterogéneos», del laboratorio HSM, se interesa especialmente en las transferencias subterráneas y de superficie en este tipo de entorno. En el marco de sus actividades de investigación, que alían caracterización y elaboración de modelos de un punto de vista hidrogeológico, hidrológico e hidráulico, el laboratorio participe en el ambicioso proyecto de investigación «Gestión multiusos de los acuíferos cársticos mediterráneos», coordinado por el BRGM para el área metropolitana de Montpellier, con la colaboración de la UMR G-EAU, la UMR TETIS, Biotope y el Centro Europeo de Investigación y Formación Avanzada en Cálculo Científico.

El proyecto comenzó en junio de 2009 y tenía una duración de tres años (financiación por parte del área metropolitana de Montpellier, cofinanciado por la Agencia del Agua de Ródano, Mediterráneo y Córcega, Consejo General del Hérault, BRGM). Fundamentalmente, concierne la cuenca hidrológica de Lez (Francia) y el acuífero cárstico correspondiente, para la gestión del recurso hídrico y del riesgo de inundaciones. El proyecto tiene los objetivos generales siguientes:

- 1 perfeccionar los conocimientos del medio subterráneo desde un punto de vista hidrogeológico, mejorando al mismo tiempo el conocimiento de los flujos subterráneos y de la geología de este tipo de sistema hidrológico perimediterráneo;
- 2 evaluar la vulnerabilidad del acuífero desde un punto de vista cualitativo y cuantitativo;
- 3 reevaluar el recurso hídrico disponible dentro del acuífero y caracterizar el impacto de los cambios globales a través de diferentes modelos;
- 4 caracterizar el papel del acuífero cárstico en el régimen hidrológico del río Lez para evaluar mejor la posibilidad de inundación al igual que la calidad química y ecológica del medio hidrológico;
- 5 producir un inventario y una descripción de la biodiversidad subterránea del acuífero del Lez;
- 6 estudiar los efectos de la gestión activa del acuífero cárstico en la disminución de las crecidas, a partir de modelos hidrológicos e hidrogeológicos acoplados.

**Contactos:** Véronique Leonardi, [leonardi@msem.univ-montp2.fr](mailto:leonardi@msem.univ-montp2.fr)

Hervé Jourde, [herve.jourde@univ-montp2.fr](mailto:herve.jourde@univ-montp2.fr)

& Jean-Christophe Maréchal, [jc.marechal@brgm.fr](mailto:jc.marechal@brgm.fr)

>FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS COMPLEJOS

## La geodesia al servicio del recurso hídrico en el ámbito cárstico

Desde hace varios años, la UMR GM (Geociencias de Montpellier, equipo de «Riesgos») lleva a cabo investigaciones originales sobre el seguimiento y la localización de los recursos hídricos de agua dulce en zona cárstica.

En el marco de la OSU OREME, y en colaboración con el Instituto Nacional de Ciencias del Universo, el ORE H+, la Casa del Agua y las sociedades imaGeau (Montpellier), MicroG y GWR (Estados Unidos), Geociencias de Montpellier ha establecido en 2011 un observatorio geodésico en el Larzac para aportar nuevas exigencias resultantes de observaciones originales de altísima tecnología durante largos periodos de tiempo. Entre otras cosas, el observatorio cuenta con el primer gravímetro superconductor de nueva generación (iGrav), desarrollado por GWR, al igual que uno de los 50 gravímetros absolutos existentes en el mundo (MicroG). La gravimetría consiste en pesar la masa del suelo desde la superficie y, sin necesidad de cavar, determinar la masa de agua subterránea y su variación con el paso del tiempo. Este tipo de medida se

aplica ahora en otros carsts como la meseta de Vaucluse, lo que constituye una prueba de su éxito.

El observatorio de Larzac también acoge a los investigadores franceses y extranjeros que desean participar en las investigaciones en curso, ya sea en el ámbito de la geofísica o de la hidrogeología. El observatorio es un lugar donde se llevan a cabo formaciones, en las cuales los estudiantes de UM2 y de toda Francia pueden trabajar con herramientas punta en las temáticas actuales. Los datos recopilados permitirán comprender más acertadamente y desarrollar mejores modelos de los acuíferos cársticos, suministrando información cuantitativa para la explotación y/o la protección de los recursos hídricos de Larzac y de los carsts en general.

**Contactos:**

Cédric Champollion, [champollion@gm.univ-montp2.fr](mailto:champollion@gm.univ-montp2.fr)

& Jean Chéry, [jean.chery@gm.univ-montp2.fr](mailto:jean.chery@gm.univ-montp2.fr)

&gt; FUNCIONAMIENTO DE LOS ACUÍFEROS COMPLEJOS

## Crecidas cársticas súbitas: de la investigación a los aspectos operativos

Desde 2004, la UPR EAU/NRE (BRGM) trabaja en la problemática de las crecidas súbitas de origen cárstico. Estos estudios se han desarrollado a través de varios proyectos, cuyos objetivos han evolucionado con el paso del tiempo. Un primer proyecto de investigación para la ciudad de Nimes (Francia) buscaba comprender el funcionamiento del sistema cárstico de la *Fontaine de Nimes* en crecida. Ese proyecto ha destacado el papel limitador de crecidas cuando el acuífero no está saturado, al igual que la fundamental contribución del sistema cárstico en la génesis de crecidas devastadoras en Nimes, con una importante contribución de las aguas subterráneas en el momento más álgido de la crecida. Se ha propuesto a las autoridades de Nimes una estrecha vigilancia de las aguas subterráneas.

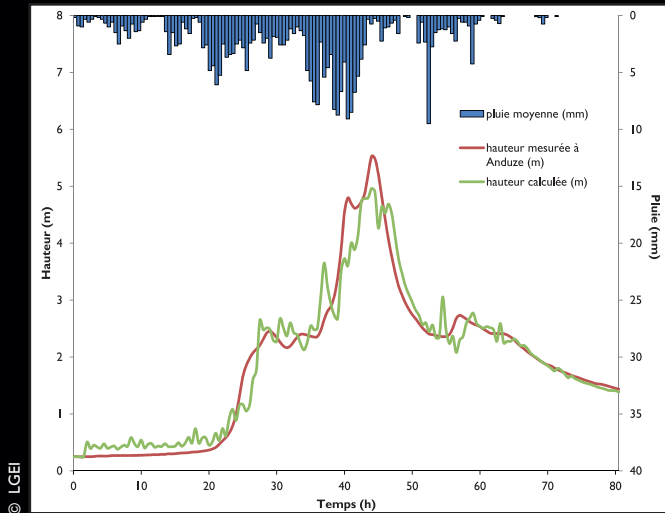
Además, se ha desarrollado un sistema de alerta para anticipar la amplitud de la crecida, en forma de un ábaco que tiene en cuenta la saturación del carst y las previsiones meteorológicas en tiempo real. Este enfoque también se ha aplicado a otras cuencas hidrológicas con componentes cársticos, a petición del Servicio Central de Hidrometeorología y de Soporte a la Previsión de las Inundaciones. Las herramientas de previsión desarrolladas están actualmente en fase de prueba en los Servicios de Previsión de Crecidas.

**Contactos: Perrine Fleury, [p.fleury@brgm.fr](mailto:p.fleury@brgm.fr)  
& Jean-Christophe Maréchal, [jc.marechal@brgm.fr](mailto:jc.marechal@brgm.fr)**

▲ *Antiguo pozo romano anegado durante la inundación de Nimes en 2005 (Francia).*

>RIESGOS VINCULADOS AL AGUA

## Previsión de crecidas en tiempo real empleando redes de neuronas



▲ **Previsión de inundaciones una hora antes del evento, en ausencia de previsión de precipitaciones (nivel calculado de agua en verde, nivel medido de agua en rojo).**

La previsión de crecidas en tiempo real constituye un problema complejo cuyas consecuencias económicas y sociales revisten una gran importancia. Su complejidad es fruto del acoplamiento entre los modelos atmosféricos, hidrológicos e hidrogeológicos.

Los centros de estudio y aplicación de los métodos desarrollados por la UPR LGEI (EMA) son las cuencas hidrológicas de Gardon, en Remoulins, y sus descargas río arriba en Francia. Este sitio se conoce por sus «gardonadas» devastadoras. También se

estudiarán otros sitios para validar estos modelos: los de Cèze y de Ardèche, conocidos asimismo por sus crecidas súbitas, al igual que la cuenca hidrológica de la Somme, reputada por sus crecidas de napa.

La utilización de redes de neuronas ofrece una nueva alternativa que consiste en aprovechar del mejor modo posible los datos experimentales registrados, elaborando modelos obtenidos por aprendizaje artificial. Los primeros resultados muestran que la previsión de crecidas del Gardon en Anduze puede efectuarse en ausencia de previsiones de lluvia, con horizontes muy cortos (2 a 3 horas). De este modo, las autoridades pueden tomar las primeras medidas necesarias sin pérdida de tiempo. Este método permite editar el mapa de vigilancia vigicrues\* en Internet. Estas investigaciones se llevan a cabo en cooperación con el Servicio Central de Hidrometeorología y Asistencia a la Previsión de Inundaciones (SCHAPI), en el marco del proyecto FLASH (*Flood forecasting with machine Learning, data Assimilation and Semi-physical modeling*) de la Agencia Nacional de Investigación, con otros actores nacionales (SCHAPI, Escuela Superior de Física y Química Industrial de la Ciudad de París, UMR «Medio Ambiente, Dinámicas y Territorios de Montaña»).

**Contactos:** Anne Johannet, [anne.johannet@mines-ales.fr](mailto:anne.johannet@mines-ales.fr) & Pierre-Alain Ayrat, [pierre-alain.ayrat@mines-ales.fr](mailto:pierre-alain.ayrat@mines-ales.fr)

Para más información: Toukourou M., 2009. *Application de l'apprentissage artificiel aux prévisions des crues éclair*. Tesis de doctorado de la EMA, Alès, Francia.

Kong A Siou L., 2011. *Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France)*. Tesis de Doctorado de la UM2, Francia.

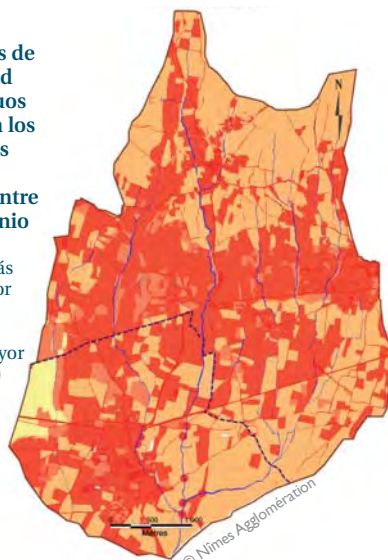
\* [www.vigicrues.gouv.fr](http://www.vigicrues.gouv.fr)

>RIESGOS VINCULADOS AL AGUA

## Metodología para evaluar el riesgo de arroyada pluvial

► **Clases cualitativas de sensibilidad a los residuos líquidos en los alrededores de Nîmes (Francia) entre marzo y junio de 2011**

(del color más claro = menor sensibilidad, al color más oscuro = mayor sensibilidad)



Classes de susceptibilité au ruiselement

- Très forte
- Forte
- Moyenne
- Faible
- Très faible

- Limite bassin versant
- Limite communale
- Réseau hydrographique

La arroyada pluvial es un fenómeno que todavía no se tiene mucho en cuenta y no se lo suele tratar como un verdadero riesgo. A menudo se lo suele confundir o vincular a la inundación. Sin embargo, puede causar importantes daños y la complejidad del fenómeno depende de su aparición súbita y muy localizada. Asimismo, generalmente afecta las pequeñas cuencas hidrológicas, tanto urbanas como rurales, y es tanto más difícil de caracterizar que está influido por numerosos parámetros físicos, pero sobre todo porque está agravado por las actividades humanas.

Las metodologías que se emplean habitualmente para estudiar la arroyada pluvial están basadas principalmente en un estudio cuantitativo y/o en la elaboración de modelos. Las investigaciones realizadas por la UPR LGEI (EMA) se orientan hacia un enfoque hidrogeomorfológico para caracterizar y representar espacialmente el fenómeno. Se ha establecido una metodología para realizar un diagnóstico pluvial, que se ha aplicado luego a una municipio rural.

El enfoque cualitativo utilizado hace una descripción de la situación general. En la cartografía cualitativa se puede integrar toda clase de información y de datos. Gracias a este enfoque, se ha podido realizar un análisis espacial global. Complementadas con medidas de permeabilidad, se han confirmado las tendencias observadas a través del análisis cualitativo.

**Contactos:** Sophie Sauvagnargues, [sophie.sauvagnargues-lesage@mines-ales.fr](mailto:sophie.sauvagnargues-lesage@mines-ales.fr) & Pierre-Alain Ayrat, [pierre-alain.ayrat@mines-ales.fr](mailto:pierre-alain.ayrat@mines-ales.fr)

## Medir el caudal de los ríos por satélite

Los satélites son herramientas invaluable para cuantificar las variables biofísicas a escala global y efectuar un seguimiento de su dinámica espacial y temporal. Facilitan el conocimiento que se tiene del ciclo del agua, midiendo la humedad atmosférica, las precipitaciones, la humedad de los suelos, la evapotranspiración y la topografía de las redes hidrográficas.

Medir el caudal de los ríos constituye un reto fundamental para el futuro de las misiones de los satélites. La UMR TETIS dedica a este tema un serio trabajo de investigación en cooperación con el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES), *The French Aerospace Lab* (ONERA) y otros actores industriales del sector espacial (*European Aeronautic Defence and Space Company, Thales Alenia Space, Collecte, Localisation, Satellites, Noveltis*). Por una parte, lo hace con tecnologías para medir variables de superficie de los ríos, y por otra parte integrando estas variables para derivar los parámetros hidráulicos de los ríos y deducir de ellos los caudales.

Se están desarrollando tres familias de técnicas espaciales. La altimetría por radar o Lidar, para medir el nivel de los ríos; TETIS desarrolla los métodos para cualificar las medidas de nivel y cuantificar su incertidumbre. La interferometría por radar espacial, objeto de la misión *Surface Water and Ocean Topography* (NASA-CNES), para medir las pendientes; TETIS, estudia la rugosidad de la superficie del agua, su influencia en la retrodifusión por radar y participa en campañas aeroportadas, para validar los dispositivos de radar, las cadenas de procesamiento y los modelos. Por último, gracias a la interferometría temporal se pueden medir las velocidades de superficie; TETIS participa en las campañas aeroportadas de prueba y explora la modelización de esta técnica en los ríos.

Para evaluar el caudal de los ríos midiéndolo a través del satélite, sin efectuar medidas *in situ*, TETIS desarrolla métodos de inversión de ecuaciones hidráulicas, con las cuales es posible determinar los parámetros de fondo (cuestas, pendientes, rugosidad del fondo, perfil de velocidad) exclusivamente a partir de las variables de superficie. Estos métodos suministran un marco coherente para especificar las futuras misiones espaciales y mejorar en los próximos 20 años el conocimiento del caudal de los cursos de agua en la superficie del planeta.

**Contacto: Pascal Kosuth, [pascal.kosuth@teledetection.fr](mailto:pascal.kosuth@teledetection.fr)**

▼ *Río Madeira en Brasil.*



>RIESGOS VINCULADOS AL AGUA

## Utilización de datos por satélite de muy alta resolución: estudio del origen geomorfológico de los caminos del agua en cuencas hidrológicas mediterráneas



© P.A. Ayral

▲ Experimentos de medida de caudal durante una precipitación.

La intensidad y variabilidad de las precipitaciones, al igual que la complejidad de los procesos hidrológicos en las cuencas hidrológicas de la zona mediterránea limitan la predictibilidad de los fenómenos extremos. Una mejor comprensión de los procesos que participan en las respuestas hidrológicas de esas cuencas, responsables de la variabilidad espaciotemporal de los caminos del agua, puede mejorar la elaboración de modelos sobre esta clase de eventos. Estas investigaciones (cooperación entre UPR LGEI y UMR TETIS) se llevan a cabo en el marco de una geomática aplicada a la hidrología. Ante todo, se interesan en la aportación de capacidades satelitales (especialmente en productos en 3D de muy alta resolución, para la caracterización espacial de las cuencas y de sus redes hidrográficas) que estudian los orígenes geomorfológicos de las variaciones espaciotemporales de las respuestas hidrológicas.

Un primer eje consiste en caracterizar, a partir de los datos espaciales, el drenaje «potencial» que representa la red geomorfológica seca formada por la serie continua de líneas de talweg de las cuencas. Un algoritmo original que utiliza una estructura de modelo digital de terreno (*modèle numérique de terrain* - MNT) en forma triangular (TIN) ha sido desarrollado específicamente con el fin de obtener un trazado de las redes que sea fiel a su trazado real, y suministrar elementos de su geomorfología y de las cuencas. El segundo eje concierne el estudio de la dinámica de drenaje o «dinámica real», con el fin de mejorar la comprensión de las dinámicas espaciales de la puesta en agua de los drenajes, a través de diferentes episodios de crecida. En este marco, se ha distribuido una red espacializada de sensores ligeros a través de dos cuencas experimentales (< 1 km<sup>2</sup>) situadas en el Gardon de Anduze, para efectuar el seguimiento de las variaciones espaciotemporales de las dinámicas hidrológicas en las redes que tienen agua.

La confrontación de las características geomorfológicas y de las respuestas hidrológicas observadas ha permitido confirmar el predominio de los flujos por debajo de la superficie en las cuencas estudiadas, destacando dos tipos de redes con un funcionamiento muy diferente, la gran influencia de las pendientes y su cambio en el inicio, la durabilidad de los flujos que componen las redes, y suministrar hipótesis de funcionamiento diferenciadas en función de los episodios.

**Contactos: Sophie Sauvagnargues, [sophie.sauvagnargues-lesage@mines-ales.fr](mailto:sophie.sauvagnargues-lesage@mines-ales.fr)  
Pierre-Alain Ayral, [pierre-alain.ayral@mines-ales.fr](mailto:pierre-alain.ayral@mines-ales.fr)  
Christian Puech, [puech@teledetection.fr](mailto:puech@teledetection.fr)  
& Jean-Stéphane Bailly, [bailly@teledetection.fr](mailto:bailly@teledetection.fr)**

>UTILIZACIÓN DEL AGUA PARA LOS CULTIVOS

## Cartografía de la evapotranspiración de la viña a partir de imágenes por satélite

La UMR LISAH ha puesto a punto un método sencillo para hacer una cartografía de la evapotranspiración de la viña a partir de imágenes por satélite. Se ha llevado a cabo un estudio sobre el bajo valle del Peyne, afluente del Hérault, en donde la viña ocupa más del 70% de la superficie. Se han adquirido así doce imágenes ASTER (julio de 2007-octubre de 2008). Estas imágenes de la temperatura de superficie (90 m de resolución), se han convertido en mapas diarios de evapotranspiración gracias a los índices WDI (*water deficit index*) y SSEBI (*simplified surface energy balance index*) que hasta ahora no habían sido utilizados en la viña. Para validar los mapas, se ha puesto en marcha un dispositivo de medida en siete parcelas de viña que son representativas de la variabilidad pedológica paisajística del valle del Peyne. Se han efectuado medidas directas de evapotranspiración, por covariancias turbulentas, en ambas parcelas.

Gracias a un seguimiento frecuente de la evolución de la humedad de los suelos y del nivel de las napas se ha podido evaluar con precisión la evapotranspiración diaria de las siete parcelas, a través del modelo de transferencias hídricas HYDRUS1D. Los mapas de evapotranspiración resultantes de las imágenes por satélite se han confirmado con éxito, dado que el índice SSEBI es ligeramente más preciso (0,8 mm/día) que el índice WDI (1,0 mm/día). Los mapas de evapotranspiración así obtenidos presentan una estructura espacial estable a lo largo del tiempo, similar a la del mapa de los suelos a una escala 1:25 000.

**Contactos: Frédéric Jacob, [frederic.jacob@supagro.inra.fr](mailto:frederic.jacob@supagro.inra.fr)  
Philippe Lagacherie, [philippe.lagacherie@supagro.inra.fr](mailto:philippe.lagacherie@supagro.inra.fr)  
& Laurent Prévot, [laurent.prevot@supagro.inra.fr](mailto:laurent.prevot@supagro.inra.fr)**

# Representación espacial del estado hídrico de la viña

El estado hídrico de la viña y sus variaciones espaciales y temporales determinan el potencial cuantitativo y cualitativo de la cosecha. Estos conocimientos son fundamentales para efectuar acciones correctivas que permitan controlar de modo óptimo la calidad de la uva y el recurso hídrico en caso de irrigación. Saber representar espacialmente la evolución del estado hídrico de la viña en los espacios cultivados también constituye un prerrequisito ineludible para diagnosticar el estado actual del recurso hídrico y eventualmente prever el impacto de los cambios climáticos en los cultivos mediterráneos, en donde predomina la viticultura.

El objetivo de esta investigación (cooperación entre UMRs ITAP, LISAH, Ciencias Enológicas, estación experimental del INRA de Pech Rouge, Instituto Francés de la Viña y el Vino, Universidad de Sydney, Australia, Universidad de Talca, Chile), es suministrar un modelo que sirva para evaluar el estado hídrico de la viña en el tiempo y el espacio, que se pueda utilizar en escalas operativas y en el área de producción, y capaz de generar un sistema de ayuda a la decisión operativa para administrar el cultivo. El proyecto se sitúa así en una escala intermedia interesante para los actores del sector vitícola.

Este modelo crea una sinergia a través de una nueva configuración de los datos disponibles, que en adelante se puede considerar en las escalas que se desee gracias a los avances tecnológicos recientes, con los cuales se pueden caracterizar las heterogeneidades de los cultivos (información aérea de infrarrojo cercano) y del suelo (medida de conductividad eléctrica aparente de los suelos con imágenes de alta resolución espacial, gracias a sensores embarcados en máquinas móviles) y a una red de medidas locales georeferenciadas para efectuar un seguimiento del estado hídrico de la viña.

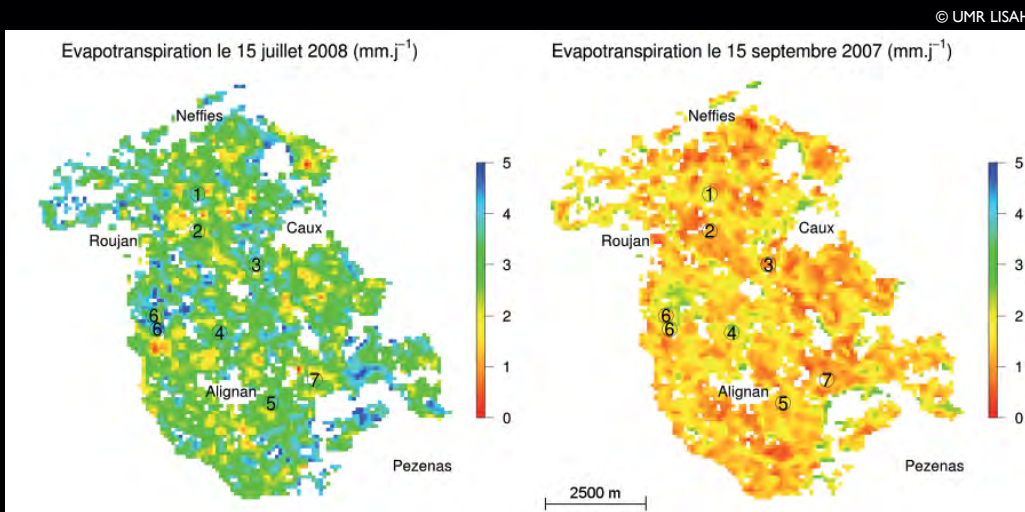
Con estas redes de sensores comunicantes (en el suelo y en los cultivos) se puede adquirir información en tiempo real y de forma continua (*plant and soil monitoring systems*) y efectuar un seguimiento de las variables con las cuales evaluar de forma indirecta y localmente el estado hídrico de las plantas.

▼ *Dispositivo experimental para medir directamente la evapotranspiración de la viña.*



La extrapolación espacial de una medida de referencia ha sido confirmada a escala de la parcela y del productor vitícola. Se la está transfiriendo a una empresa (*Société Fruition Sciences*) y será validada a mayor escala (bodega cooperativa).

Contacto: Bruno Tisseyre, [tisseyre@supagro.inra.fr](mailto:tisseyre@supagro.inra.fr)



◀ *Cartografía de los niveles de evapotranspiración de los viñedos en el Valle de Peyne (Francia) y localización de los siete sitios de validación.*