

Version 4 du 13/09/07

# La télédétection

une vision détaillée des inondations, un gisement d'information précieux pour la gestion de l'aléa



*Ce document a été réalisé sur la base d'une étude diligentée par le MEDAD et intitulée « Exploitation comparée des images aéroportées et spatiales pour la caractérisation d'un épisode d'inondation dans le Grand Delta du Rhône » (DPPR/SDPRM/BRN - 04404). Cette étude a été menée sous la responsabilité du SERTIT<sup>1</sup>, service de télédétection et de traitement d'image spécialiste des risques naturels, avec l'appui de la société SIEE<sup>2</sup>, experte en hydrologie et hydraulique.*

*Le travail a bénéficié du concours des agences spatiales CNES<sup>3</sup> et ESA<sup>4</sup> qui ont participé au comité de suivi des travaux aux cotés des représentants du MEDAD, des DIREN Languedoc-Roussillon et Provence Alpes Côte d'Azur ainsi que de la Délégation de Bassin Rhône-Méditerranée. Les agences spatiales CNES, ESA et CSA<sup>5</sup> ainsi que les distributeurs de données de télédétection SPOT IMAGE<sup>6</sup> et EUSI<sup>7</sup> ont permis la réutilisation gracieuse des données spatiales, acquises lors des inondations de 2003, dans le cadre de la Charte Internationale « Espace et Catastrophes Majeures ».*

*L'étude a été encadrée et suivie par de nombreuses personnes ; au MEDAD : Jean Gaber, Charly Vignal, Marie Renne et Patrick Chasagneux ; à la délégation de bassin et dans les DIREN : Aurélie Roy, Laurent Michels et Olivier Braud ; au CNES : Jean-Claude Bessis et André Husson ; à l'ESA et à la DDSC<sup>8</sup> : Jérôme Béquignon.*

*La maturation de la réflexion a bénéficié de confrontations avec les gestionnaires du risque appartenant aux services déconcentrés de l'État, gestionnaires d'ouvrages et collectivités territoriales : Agence de l'eau RMC, DDE 84, DDE 30 - SPC, DDE 13, CG 30-SERI, CNR, Mairie d'Arles, Mairie de Tarascon, SYMADREM, ...*

*La réalisation des travaux a profité des compétences de Samira Philip, Alain Hussard et Philippe Debar de la société SIEE qui ont, entre autres, rédigé le rapport du Lot 2 synthétisant les connaissances hydrologiques régionales sur les secteurs d'étude et sur la crue de 2003. Hervé Yésou du SERTIT a apporté sa connaissance des capteurs spatiaux dans l'étude bibliographique du lot 1. Stéphanie Battiston a réalisé, par traitement numérique et photo interprétation, l'essentiel de la cartographie qui fonde cette analyse. Elle a finalisé cette production en réalisant plus de 500 planches et illustrations ainsi que de nombreux tableaux et graphiques de synthèse.*

*L'étude complète, Lots 1 à 4, avec toutes ses annexes cartographiques est disponible sur DVD au MEDAD, auprès de la sous-direction de la prévention des risques majeurs.*

*Bernard Allenbach*

*Cet ouvrage a été élaboré, rédigé et illustré par Bernard Allenbach et Stéphanie Battiston du SERTIT, sa concrétisation profite du savoir faire de la société Graphies<sup>9</sup>.*

---

1 - SERTIT, Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection, Strasbourg, <http://sertit.u-strasbg.fr>

2 - SIEE, Société d'Ingénierie pour l'Eau et l'Environnement, Montpellier, [www.siee.fr](http://www.siee.fr)

3 - CNES Centre National d'Etudes Spatiales, [www.cnes.fr](http://www.cnes.fr)

4 - ESA, Agence Spatiale Européenne, [www.esa.int](http://www.esa.int)

5 - CSA, Agence Spatiale Canadienne, [www.space.gc.ca](http://www.space.gc.ca)

6 - SPOT IMAGE, [www.spotimage.fr](http://www.spotimage.fr)

7 - EUSI, European Space IMAGING, [www.euspaceimaging.com](http://www.euspaceimaging.com)

8 - DDSC ; Ministère de l'Intérieur, Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles

9 - Graphies, [www.graphies.com](http://www.graphies.com)

Couverture :

- En haut : cartographie des casiers hydrauliques dans le secteur de Tarascon.
- En bas : Extension de l'inondation de décembre 2003, cartographie des écoulements et objets hydrauliques.

[Source : image SPOT 5 du 06 décembre 2003].

<b>Résumé .....</b>	<b>2</b>
<b>Avant-propos .....</b>	<b>2</b>
<b><i>Le grand delta du Rhône, une zone exposée aux inondations .....</i></b>	<b><i>4</i></b>
Zones test et données d'Observation de la Terre.....	4
Contexte hydrologique et hydraulique .....	6
La couverture des inondations de 2003 par les plates-formes de télédétection .....	7
<b><i>La télédétection, outil de description de l'inondation .....</i></b>	<b><i>9</i></b>
<b>Vision de la tache d'inondation : les laisses de crues .....</b>	<b>9</b>
L'eau apparente et ses variations .....	9
Traces d'humidité dans les sols .....	11
<b>Vision dans la tache d'inondation : les objets hydrauliques .....</b>	<b>12</b>
Stockage de l'eau dans le lit majeur : les casiers .....	12
L'origine de l'eau : brèches, surverses et transferts entre casiers hydrauliques.....	13
Le chemin de l'eau : les zones d'écoulement .....	15
Méthodologie de cartographie détaillée des laisses de crue.....	16
<b><i>Laisses de crue et cartographie de l'extension de l'inondation.....</i></b>	<b><i>17</i></b>
Couverture de la tache d'inondation par les laisses de crue .....	17
Observation de l'inondation en milieu urbain .....	20
Traces d'humidité et extension de l'inondation en milieu rural.....	21
Les laisses de crue avec la télédétection, un fort potentiel pour établir l'extension des inondations.....	23
<b><i>La télédétection appliquée à la gestion de l'aléa inondation.....</i></b>	<b><i>24</i></b>
<b>Intégration des produits cartographiques de télédétection     dans le cycle de gestion du risque .....</b>	<b>24</b>
La cartographie rapide : l'évaluation de la situation pour la gestion de la crise.....	25
La cartographie détaillée : le constat exhaustif pour le retour d'expérience.....	27
Les annales cartographiques des inondations historiques : des références pour la modélisation et la réglementation .....	29
L'atlas des zones inondées : un support à la prévision des impacts complémentaire de la modélisation .....	30
Synergie des approches : terrain, modélisation et télédétection.....	31
<b>Éléments d'évaluation des coûts opérationnels .....</b>	<b>31</b>
Coûts d'acquisition des données de télédétection .....	32
Coûts de production de l'information sur l'inondation .....	34
<b><i>Gestion de l'aléa inondation : le bénéfice des images.....</i></b>	<b><i>37</i></b>



## Résumé

Ce document est dédié à la description des inondations avec les images de télédétection, il aborde successivement les trois points suivants. La description thématique détaillée du phénomène qui repose sur la reconnaissance, dans les images, d'objets hydrauliques statiques et dynamiques tirés d'une liste proposée par les hydrologues. La seconde partie est focalisée sur l'évaluation qualitative et quantitative des résultats obtenus à partir des différents capteurs en les comparant avec les études de terrain. Enfin, l'utilisation des informations issues de la télédétection, dans les procédures techniques et administratives de gestion du risque inondation, est abordée sous l'angle de l'intégration, en termes de faisabilité et de coût, de «géo produits inondations» dédiés aux différents stades du cycle du risque.

## Avant-propos

*L'objectif de ce document est de présenter le potentiel de l'imagerie aéroportée et spatiale comme source d'information pour la gestion du risque inondation. Concrètement, il s'agit de fournir des éléments de réponse à la question suivante : « Quels sont les objets, signifiants dans le cadre d'une inondation, visibles et cartographiables au moyen des capteurs de télédétection ? ». Du point de vue des gestionnaires de l'aléa, ce questionnement scientifique et méthodologique se double d'un problème applicatif à plusieurs facettes. Quelles stratégies adopter pour la mise en œuvre des systèmes d'observation par télédétection dans un contexte événementiel ? Quelle méthodologie d'extraction et de validation de l'information phénoménologique employer ? Comment intégrer l'information produite dans les procédures techniques et administratives tout au long du cycle de gestion du risque ? L'ambition n'est pas de fournir un jeu complet de solutions clef en main, ni d'embrasser la totalité du problème mais d'alimenter une réflexion sur les apports de la donnée de télédétection.*

*Ce document est conçu comme la partie émergente de l'étude intitulée : Exploitation comparée des images aéroportées et spatiales pour la caractérisation d'un épisode d'inondation dans le grand delta du Rhône (Réf. DPPR/SDPRM/BRN – 04404) par ailleurs disponible in extenso sous forme d'un DVD<sup>1</sup>.*

*Le point de départ de cette réflexion est l'existence d'un ensemble important de données spatiales et aéroportées, d'origines variées, couvrant la crue historique de décembre 2003 en vallée du Rhône et acquises, pour les données spatiales, dans le cadre de la Charte Internationale « Espace et Catastrophes Majeures »<sup>2</sup>. L'exploitation de ces données de télédétection s'appuie sur une synthèse du contexte hydrologique et hydraulique*



Vue en 3D des inondations de décembre 2003 autour de la ville de Tarascon [Source : Image SPOT 5 du 6 décembre 2003].



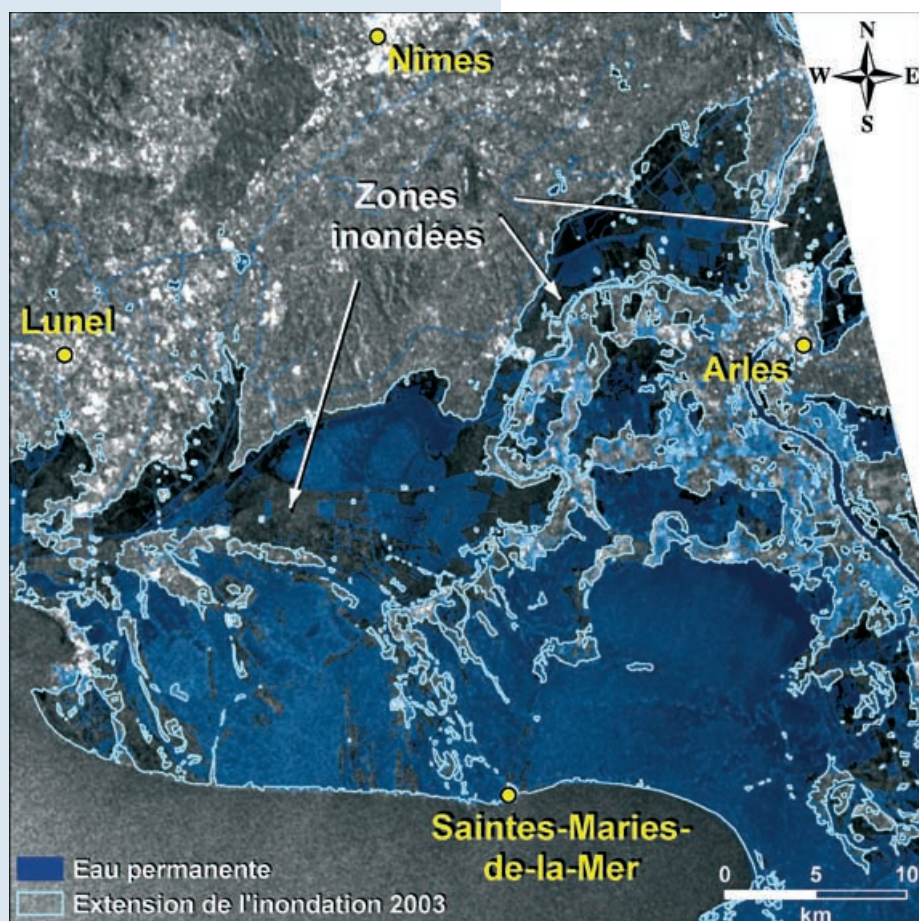
Vue en 3D des inondations de décembre 2003 dans la ville d'Arles [Source : Image SPOT 5 du 6 décembre 2003].

<sup>1</sup> - Il est possible de se procurer le DVD au MEDAD auprès de la sous-direction de la prévention des risques majeurs.

<sup>2</sup> - La Charte internationale « Espace et Catastrophes Majeures », voir encart page 8.

régional complétée par la somme des observations et études existantes dédiées à l'évènement de 2003 en basse vallée du Rhône.

L'atout majeur de la télédétection est d'offrir, dans un temps resserré autour du moment du pic de débit, une observation synoptique des traces laissées par l'inondation dans le lit majeur. Ces stigmates de l'inondation, regroupés sous le terme générique de « laisses de crue », apparaissent sous des formes variées : eau apparente, traces d'humidité et dépôts solides. La cartographie exhaustive de cette empreinte de la crue, à partir des images géoréférencées constituant une archive événementielle brute du phénomène, délivre une base factuelle solide pour évaluer finement l'extension géographique de la tache d'inondation. Couplée aux mesures de débits, cette délimitation de l'enveloppe inondée pourrait - devrait - constituer le fondement de la caractérisation de l'évènement naturel inondation.



Extension de l'inondation de décembre 2003 en Camargue  
[Source : Image radar ENVISAT ASAR du 05 décembre 2003].

En exploitant de façon approfondie ces images, on peut aller plus loin dans la description du phénomène. En particulier, il est possible de fournir une information, calée dans le temps et dans l'espace, sur les caractéristiques des écoulements en termes de localisation des échanges lit mineur - lit majeur, de délimitation des casiers hydrauliques et de localisation des courants et des zones d'échanges entre casiers. Le relevé géoréférencé de tous ces « objets hydrauliques » contribue à forger un panorama exhaustif et détaillé de l'épisode d'inondation, expression de la réalisation de l'aléa. La production de ce constat événementiel détaillé appartient au retour d'expérience, les bénéfices que l'on peut en attendre concernent tout le cycle de gestion du risque. Ce gain est bonifié si l'exploitation des données spatiales est couplée avec les études de terrain, en particulier les observatoires in situ et les modèles de transferts de débits. La systématisation d'une telle démarche de constat géoréférencé des épisodes d'inondation, à

l'échelle du territoire national, pour produire des annales cartographiques des inondations, rejoindrait les préoccupations de la commission européenne exprimées dans la directive du conseil relative à l'évaluation et la gestion des inondations. Elle répondrait également au souci de l'état français en matière de gestion du risque ; en effet, la plupart des documents réglementaires requièrent la cartographie de l'aléa.



# LE GRAND DELTA DU RHÔNE, UNE ZONE EXPOSÉE AUX INONDATIONS

## ■ Zones test et données d'observation de la terre

### *Critères de choix des zones d'étude*

Les critères utilisés pour le choix des zones d'étude sont présentés par ordre de priorité décroissant, en fonction de l'objectif méthodologique principal visant à caractériser les apports des différentes sources de données de télédétection pour l'étude des crues. La diversité des couvertures de télédétection est donc le critère premier : il s'agissait de maximiser le nombre de types de données de télédétection disponibles sur les zones d'étude afin d'obtenir un panorama de capteurs le plus complet possible. Chronologiquement : il était souhaitable de confronter des données, si possible synchrones, les plus proches possibles du pic de débit dans la zone considérée. De plus, une redondance temporelle des observations était recherchée pour apprécier le potentiel des capteurs à suivre le déroulement du phénomène. La typologie des paysages affectés par les inondations était aussi un critère important : les zones choisies devaient permettre l'analyse du potentiel des plates-formes d'observation en contexte urbain d'une part, rural et/ou naturel d'autre part. Le comportement hydraulique devait être pris en compte car les origines de l'inondation de 2003 sont variées à l'intérieur du lit majeur du Rhône ; ainsi l'intégration des phénomènes hydrauliques prépondérants de l'épisode constituait également un objectif pour le choix des zones. Enfin, la disponibilité documentaire a été recherchée : l'abondance et la qualité des données complémentaires en particulier de terrain, sur l'événement de décembre 2003 mais aussi sur le contexte hydrologique et hydraulique sont les garants de la validation des analyses.

### *Résultats de l'inventaire des images*

Le recensement des données de télédétection existantes auprès de producteurs de données a donné lieu à une bonne surprise : la grande quantité d'images acquises lors des événements de 2003. Une soixantaine d'images satellitaires étaient disponibles sur une période de 14 jours qui débute le 5 décembre lendemain du pic de débit, comprenant un ensemble très large de capteurs et de plates-formes aéroportées et spatiales allant de la basse résolution optique avec MERIS et MODIS à la très haute résolution SPOT5 et IKONOS et aux plates-formes radar ENVISAT et RADARSAT.



Emprise des données de télédétection événementielles retenues pour l'étude [Source : Image ENVISAT MERIS du 8 décembre 2003].

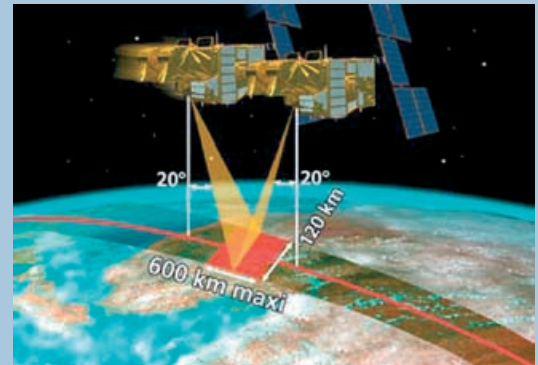
### Les satellites défilants d'observation de la Terre

Les satellites d'observation de la Terre opérationnels résultent d'un compromis mettant en jeu parmi d'autres les paramètres fonctionnels suivants : l'emprise totale du globe terrestre qui est observée toutes révolutions confondues ; la résolution géométrique de l'observation qui est la taille du plus petit élément discernable ; la résolution radiométrique c'est aptitude à détecter des sauts d'énergie faible ; la résolution spectrale définie par le nombre et la finesse d'échantillonnage des bandes du spectre électromagnétique mesurées ; la résolution temporelle qui va déterminer la fréquence d'observation ou de revisite au sein de l'emprise observée. Deux grandes familles de satellites d'observation de la Terre sont couramment utilisées.

**Les satellites géostationnaires** positionnés en orbite équatoriale haute (36000km) délivrent une vision permanente mais partielle du globe terrestre : un cône de quelques milliers de kilomètres de rayon échantillonné à basse résolution (kilométrique à pluri kilométrique) et à haute fréquence d'acquisition (de l'ordre de 15 minutes). Leur domaine d'application privilégié en observation de la Terre est la météorologie.

**Les satellites défilants**, le plus souvent situés sur des orbites sub-polaires assez basses, autour de 700 à 800 km, offrent des résolutions qui varient entre 0,5 m et 1000 m, sur des largeurs au sol, appelées fauchées, variant de la dizaine à quelques centaines de kilomètres. Parmi ces satellites et pour ceux couvrant l'intégralité du globe terrestre, la fréquence moyenne de passage à la verticale au dessus d'un même point du globe est de l'ordre de 25 jours. Afin d'augmenter leur fréquence d'observation ces satellites sont de plus en plus dotés de capacités de dépointage qui leur permettent de diriger leurs capteurs dans tous les azimuts avec un angle de visée vers le sol dont l'inclinaison maximale par rapport à la verticale est de l'ordre de 20 à 25 degrés. Ces possibilités de dépointage sont télécommandées depuis le sol et activées dans le cadre général de la programmation de l'acquisition d'image de la plate-forme d'observation. Grâce à ce système, les temps de revisite de ces plates-formes modernes sont voisins de 3 jours en tout point du globe. En raison de leurs capacités de discernement, les satellites défilants d'observation de la Terre constituent les outils privilégiés pour tous les scientifiques étudiant la surface du globe et les phénomènes qui s'y produisent.

**Satellite défilant et imagerie événementielle.** L'utilisation des satellites d'observation de la Terre pour décrire les inondations est pratiquement réservée à l'heure actuelle aux satellites défilants en raison de la résolution souhaitable pour l'observation. L'événement inondation étant fugitif et sa prévisibilité délicate, l'opérationnalité de l'imagerie spatiale pour la description des inondations dépend directement de la capacité à disposer, dans les plus brefs délais, d'un œil spatial sur un point désigné du territoire. Pour les satellites défilants classiques, la fréquence de revisite de 3 jours d'une plate-forme unique est insuffisante. La solution se trouve du côté des constellations de satellites, seules à même d'assurer la réactivité suffisante en l'absence de systèmes spatiaux spécifiques aux désastres. L'expérience tirée de la Charte Internationale « Espace et Catastrophes Majeures », montre que, avec les moyens actuels disponibles dans ce cadre, et dans la mesure où les circuits de décisions opèrent de façon efficace, l'image du lendemain devrait être assurée.



Dépointage avant/arrière et fauchée des satellites SPOT 5  
[Source : SPOT Image].



Emprise des deux zones d'étude, Arles (dominante urbaine) et Tarascon (dominante rurale) [Source : Image SPOT 5 du 16 avril 2003].

Cette abondance de données reflète à l'évidence un effet d'entraînement, vers l'événement, de la ressource satellite mondiale d'observation de la Terre, par la Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures, déclenchée à cette occasion en raison de la situation de crise par la DDSC<sup>3</sup>. Parallèlement, des missions aéroportées opérées par l'IGN étaient diligentées par les DIREN du Sud-Est de la France complétées par d'autres missions aéroportées à la demande de gestionnaires d'ouvrages sur le Rhône et de collectivités locales. Cette richesse documentaire conforte le choix de cet événement par le MEDAD pour réaliser cette étude méthodologique.

**Le choix** des zones d'études s'est porté sur une première zone à dominante rurale, située au Sud et à l'Est de Tarascon. L'inondation trouve ici son origine dans des phénomènes conjugués de ruissellement, de débordement du Rhône et d'autres drains de moindre ampleur, et enfin de brèches dans les ouvrages de protection. La zone de Tarascon représente le pôle amont à ressuyage rapide de l'étude. La seconde zone, à dominante urbaine, est emblématique des événements de 2003, il s'agit de la ville d'Arles avec ses périphéries Est et Nord. D'un point de vue hydraulique, l'origine de l'inondation y est principalement liée au débordement du Rhône en amont de l'agglomération, l'envahissement de la moitié Nord de la ville étant liée à la rupture des protections constituées par la ligne de chemin de fer. Certains compartiments appartenant à cette zone d'étude sont inondés par les eaux issues de drains secondaires comme le canal du Vigueirat.

3 - DDSC : Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles du Ministère de l'Intérieur.



## ■ Contexte hydrologique et hydraulique

### Les drains principaux et le contexte hydraulique

Les deux zones d'étude appartiennent à la plaine alluviale de la rive gauche du Rhône s'étendant depuis le Nord de Tarascon jusqu'au Sud de l'agglomération d'Arles. Les cours d'eau naturels sont peu nombreux : ruisseau de la Bagnollette et le Gaudre d'Auge : une partie des écoulements hors crues se fait également au travers d'un réseau de roubines<sup>4</sup> : Foubourouette, Pourrie, Terrenque, ... qui peuvent à l'occasion relayer ou remplacer des drains naturels. En dehors du Rhône, la plupart des drains permanents importants appartiennent à un treillis de canaux d'irrigation, dont les principaux sont le canal du Vigueirat drainant la plaine à l'Est de Tarascon, au Nord et à l'Ouest de la terminaison des Alpilles, le canal des Baux bordant le versant sud de ce même massif, ainsi que le canal des Alpines au Nord de l'agglomération d'Arles. Dans cette partie du bassin versant rhodanien, les altitudes dans le lit majeur varient entre 12 m au Nord-Est de la zone de Tarascon pour atteindre des valeurs proches de 1 m dans la partie Sud de la zone d'Arles. D'un point de vue hydraulique, et à des fins de modélisation, un découpage en casiers hydrauliques établi par BCEOM discrétise les zones d'étude.

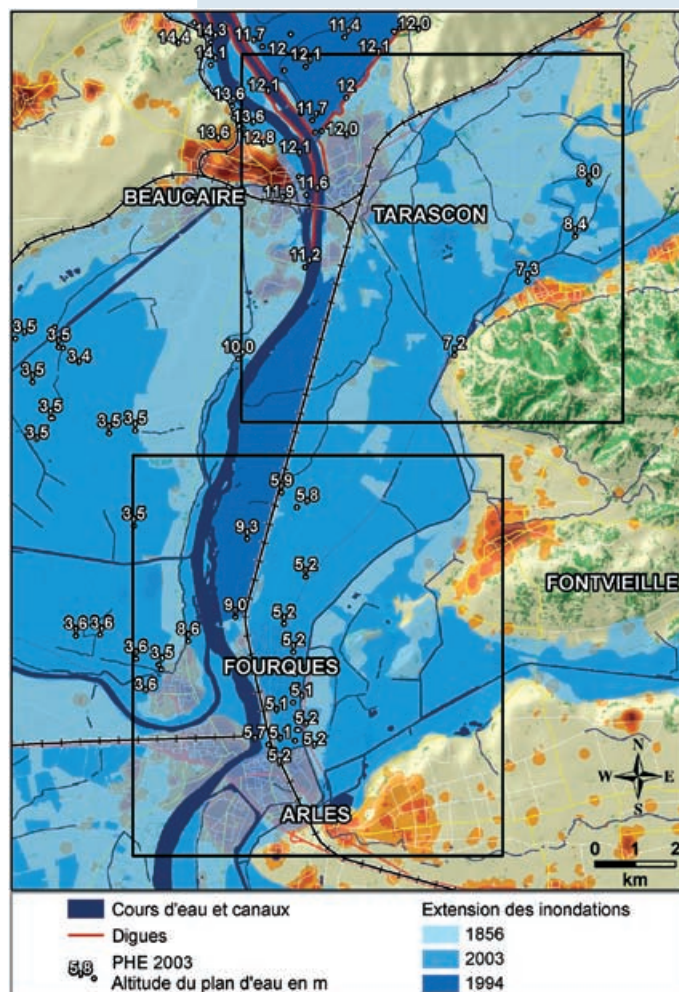
### Les crues historiques et l'événement de 1856

Au cours des 150 dernières années la partie aval du Rhône a été traversée par une dizaine de crues historiques. Parmi celle-ci, la crue de 1856 fait office de crue de référence non seulement en raison de son importance mais également parce qu'elle a fait, à l'époque, l'objet d'une cartographie exceptionnelle, très complète entre Lyon et le delta.

### La crue de 2003

Les informations concernant le positionnement historique de la crue de décembre 2003 sont tirées pour l'essentiel des deux communications sur le sujet données respectivement par D. Cœur et D. Duband lors du colloque : « La crue du Rhône de décembre 2003, quels enseignements ? » qui s'est tenu en Arles le 3 décembre 2004, un an après les événements catastrophiques étudiés. « Si l'on estime que l'événement de décembre 2003 a écoulé entre 11 000 et 12 000 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire, cet épisode rejoindrait à l'échelle historique des deux derniers siècles, le groupe très réduit des crues qui ont approché ou dépassé les 10 000 m<sup>3</sup>/s à Beaucaire ».

La crue de 2003 est une crue exceptionnellement bien connue puisqu'il faut remonter à 1856 pour disposer d'une couverture cartographique des zones inondées par le Rhône d'exhaustivité comparable. Le fonctionne-

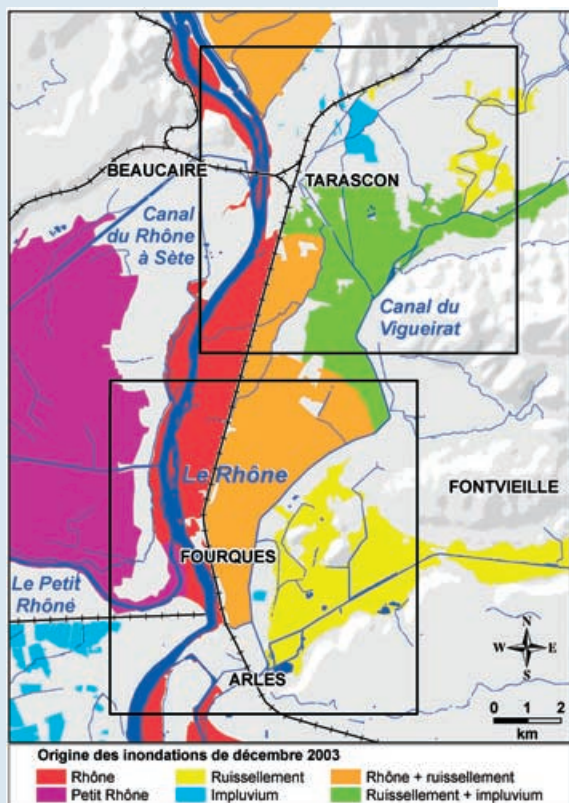


Extension des inondations de 1856, 1994 et 2003 et hauteurs d'eau pour la crue de 2003 dans les secteurs d'Arles et de Tarascon (SIEE).

Crues majeures du Rhône		
Année	Mois	Débit à Beaucaire
1840	Novembre	13 000 m <sup>3</sup> /s
1856	Mai	12 500 m <sup>3</sup> /s
1886	Novembre	9 500 m <sup>3</sup> /s
1935	Novembre	9 600 m <sup>3</sup> /s
1993	Octobre	9 800 m <sup>3</sup> /s
1994	Janvier	10 800 m <sup>3</sup> /s
2002	Septembre	10 500 m <sup>3</sup> /s
2002	Novembre	10 200 m <sup>3</sup> /s
2003	Décembre	11 000 m <sup>3</sup> /s

4 - Roubines : terme provençal désignant les canaux de drainage ; mais aussi, modelé du relief (ravin, ravinement) induit par le ruissellement.





Origines des inondations de décembre 2003 [Source : SIEE].

ment de l'inondation est synthétisé cartographiquement (étude SIEE pour la DIREN) par les vecteurs d'inondation spécifiant l'origine de l'eau inondant le lit majeur : eau du Rhône, de ruissellement et/ou impluvium. Les hauteurs d'eau sont connues de façon discrète par des levés sur le terrain, par des géomètres, de l'altitude des traces de l'inondation.

### Une autre vision des inondations : les modèles

Le dernier élément cartographique sur le contexte hydraulique des secteurs d'étude est fourni par les résultats des modélisations de la crue décennale, centennale et millénale réalisées par SIEE. Toutes ces modélisations font apparaître l'importance du rôle protecteur joué par le remblai de la voie ferrée Arles Tarascon.

## ■ La couverture des inondations de 2003 par les plates-formes de télédétection

### Diversité des plates-formes

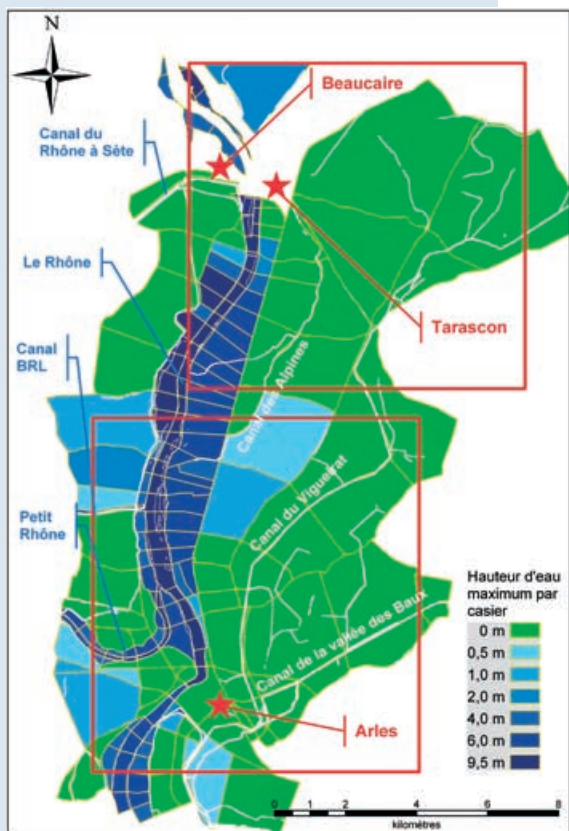
Grâce à la « Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures », une couverture étoffée d'images satellitaires événementielles est disponible pour les inondations de 2003 dans la basse vallée du Rhône. À la demande des services de l'état, représentés par la DIREN, une couverture aéroportée a également été acquise. Dix plates-formes et treize capteurs ont été retenus pour l'étude. Les résolutions des images varient entre 0,3 m pour l'orthophoto, 1 m pour IKONOS et vont jusqu'à 1 000 m pour certaines longueurs d'onde de MODIS un capteur multispectral basse résolution de la NASA. Les principaux types de capteurs opérationnels à l'heure actuelle sont représentés : optique en modes panchromatique et multispectral dont le moyen infra rouge (SPOT), radar avec les plates-formes RADARSAT et ENVISAT ; le domaine hyper spectral est également abordé avec les données du satellite expérimental de l'ESA PROBA.

### Chronologie des acquisitions

Les premières acquisitions exploitables sont datées du 5 décembre ; ce sont des images Radar d'une résolution de 30 m prises par ENVISAT, le satellite de l'ESA. Le 6 décembre, soit une soixantaine d'heures après le pic de débit à Beaucaire est la date pivot de l'étude avec des couvertures synchrones en photographie aérienne, IKONOS, SPOT5 et RADARSAT. Le panorama des capteurs est complété les 7, 8 et 9 décembre.

### Une gamme de capteurs représentative de l'offre actuelle

Aucune référence trouvée dans l'étude bibliographique ne concerne un panorama aussi large de vecteurs spatiaux et aéroportés ayant imagé le même événement d'inondation.



Modélisation d'une crue centennale [Source : SIEE].

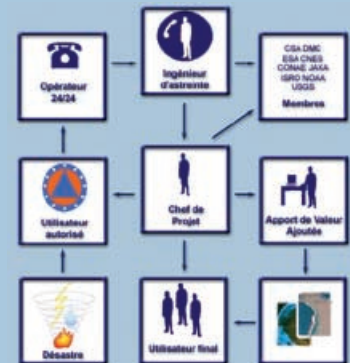


### La Charte Internationale «Espace et Catastrophes Majeures»

Pour les catastrophes majeures, et à l'échelle mondiale, il existe au travers de la Charte Internationale «Espace et Catastrophes Majeures» une procédure intégrée de mise à disposition des services d'urgence : protection civiles et ONG, d'images satellites événementielles et de référence.

Cette initiative rassemble à l'heure actuelle 9 des principales agences spatiales mondiales, qui se sont engagées à délivrer gratuitement, en cas de désastre les images satellitaires produites par les plates-formes spatiales qu'elles contrôlent et qui sont programmées alors en conséquence et de façon prioritaire. Depuis sa mise en œuvre en 2001, la Charte Internationale a été activée près de 150 fois. L'utilité des moyens spatiaux pour la gestion des grandes catastrophes est désormais largement démontrée et reconnue, à tel point qu'il s'agit d'un axe de développement prioritaire de la filière spatiale européenne dans le cadre de GMES.

Fonctionnement de la Charte, du déclenchement à la livraison des spatio cartes à l'utilisateur final [Source : [http://www.disasterscharter.org/main\\_f.html](http://www.disasterscharter.org/main_f.html)].



### Données de télédétection événementielle utilisées dans l'étude

Capteur	Producteur	Date d'acquisition	Mode spectral	Résolution	Type de capteur
Mission aéroportée	IGN	06-12-2003	Argentique panchromatique	0,3 m	Optique
IKONOS	Space Imaging EUSI	06-12-2003	Panchromatique	1 m	
IKONOS		06-12-2003	Multispectral	4 m	
Spot 5	CNES Spot Image	06-12-2003	Panchromatique	2,5 m	
Spot 5		06-12-2003	Panchromatique	5 m	
Spot 5		06-12-2003	Multispectral	10 m	
PROBA	ESA	07-12-2003	Multispectral	18 m	
Spot 4	CNES	07-12-2003	Multispectral	20 m	
MERIS	ESA	08-12-2003	Multispectral	250 m	
MODIS	NASA	08-12-2003	Multispectral	250/1000 m	
RADARSAT	RSI	06-12-2003	SAR	12,5 m	Radar
		09-12-2003			
ERS 2	ESA	05-12-2003	SAR	12,5 m	
ENVISAT	ESA	05-12-2003	ASAR	30 m	

### Les différents types de capteurs des plates-formes de télédétection

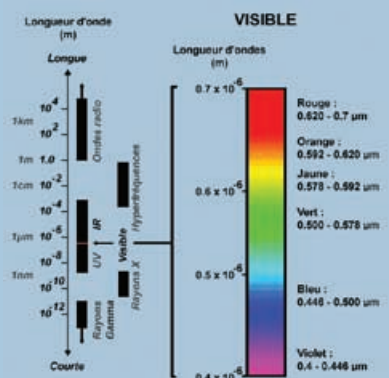
Les capteurs des satellites d'observation de la Terre appartiennent à deux grandes familles :

#### • les capteurs passifs

Les capteurs optiques sont dits passifs car ils exploitent une source de rayonnement naturelle : le soleil. La partie visible du spectre du rayonnement solaire est utilisée ainsi que le proche et le moyen infra rouge. Lorsque tout (ou presque) le spectre du visible est utilisé par un seul capteur (un seul canal), l'image produite, habituellement affichée en noir et blanc, est appelée image panchromatique. Lorsque le spectre mesuré est découpé en plusieurs bandes ou canaux, l'image résultante est dite multispectrale, elle peut être affichée en couleur, avec un rendu proche des couleurs naturelles.

#### • les capteurs actifs

Les capteurs radars sont dits actifs car ils exploitent des longueurs d'ondes, en dehors du spectre visible, appartenant au domaine des ondes dites radar, en particulier les bandes appelées C X et L. Comme la Terre n'est pas illuminée suffisamment par ce type de rayonnement, les satellites radars comportent une source de rayonnement (actif) qui va émettre le train d'onde initial qui sera réfléchi par la cible (la Terre) vers ses capteurs. Les modifications du train d'onde sont liées essentiellement à son interaction (réflexion) avec le sol ; ainsi, l'intérêt majeur du rayonnement radar est son insensibilité à la nébulosité de l'atmosphère ce qui en fait un système tous temps particulièrement intéressant.



Le spectre électromagnétique.

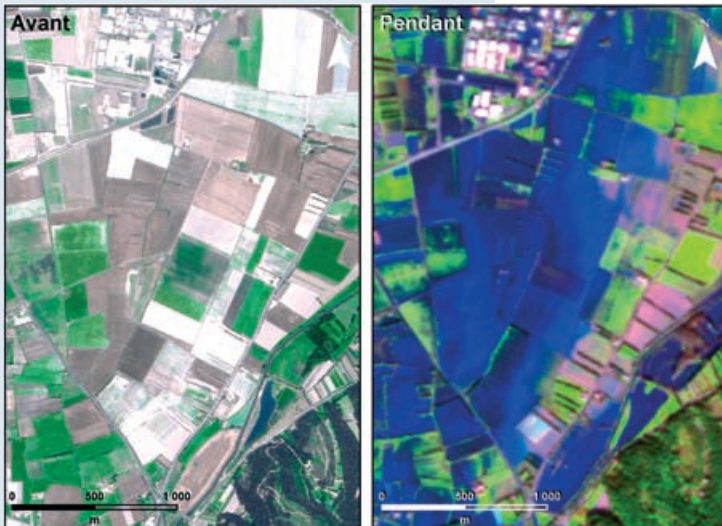


# LA TÉLÉDETECTION, OUTIL DE DESCRIPTION DE L'INONDATION

**Définition :** l'inondation est une submersion (rapide ou lente) d'une zone pouvant être habitée ; elle correspond au débordement des eaux lors d'une crue ([www.prim.net](http://www.prim.net)). Une inondation, qu'elle soit rapide ou lente est un phénomène évolutif complexe. Les observations de l'évènement que l'on va pouvoir rassembler risquent d'être parcellaires sur les plans temporels et géographiques et limitées en termes de mesures. Techniquement, pour décrire les inondations, il n'y a pas de différence fondamentale entre l'approche de terrain et la photo interprétation. Dans les deux cas, il s'agit, avec un œil de naturaliste, de recueillir un maximum d'observations, si possible quantifiées, sur le phénomène et ses traces, puis d'en dériver une interprétation la plus cohérente possible. À l'évidence, les deux approches sont complémentaires car fort heureusement leurs avantages et handicaps respectifs ne se recoupent pas strictement.

## *Vision de la tache d'inondation : les laisses de crues*

### **Problématique**



Visibilité des inondations par la télédétection : images avant et pendant l'évènement de 2003 [Source : image SPOT 5 de référence datant de 2002 et image SPOT 5 événementielle du 6 décembre 2003].

Le pic de débit dans la région de Beaucaire est enregistré le 4 septembre à 2 heures du matin. Les missions aéroportées de l'IGN sont effectuées entre le 5 et le 7 décembre, mais en raison de la nébulosité, les acquisitions exploitables débutent le 6 décembre ; elles sont synchrones des premières images satellitaires optiques exploitables prises par IKONOS et SPOT 5. Les missions de terrain diligentées par la DIREN débutent fin décembre et se poursuivent courant janvier. Quelle que soit l'approche utilisée, la problématique de la cartographie de l'extension d'une inondation est clairement posée, en terme de visibilité a posteriori des traces du phénomène. Dans ce document, toutes les traces et empreintes de la crue sont appelées génériquement laisses de crue.

### ■ L'eau apparente et ses variations

#### **Visibilité de l'eau avec les capteurs**

Les inondations laissent des traces dans les paysages, ces traces peuvent être enregistrées, mémorisées, par les systèmes imageurs aéroportés et spatiaux si ceux-ci sont programmés en conséquence. Lorsque l'on est proche du maximum de l'inondation ces traces sont représentées essentiellement par l'eau apparente dans le lit majeur des cours d'eau.

### Signature spectrale et traitement numérique des images

Différents types de surfaces tels que l'eau, un terrain nu ou de la végétation, reflètent le rayonnement solaire inégalement dans les différentes longueurs d'onde. La couleur des objets que nous percevons est la manifestation de ces interactions entre un rayonnement électromagnétique visible : la lumière et une surface. Ainsi les végétaux chlorophylliens qui nous apparaissent vert sont caractérisés par une absorption surfacique forte dans les longueurs d'ondes rouge et bleu et une réflexion importante dans le vert, et mais cela ne se voit pas, une très forte réflexion dans le proche infrarouge. Les rayonnements réfléchis par un type de surface déterminé, exprimés sous forme d'une intensité lumineuse par longueur d'onde ou gamme de longueur d'onde, sont appelés signature spectrale de la surface. Cela sous-entend que l'on va pouvoir identifier tous les objets similaires contenus dans une image présentant un même type de surface simplement en retrouvant des valeurs analogues d'intensité lumineuse pour les mêmes longueurs d'onde. Pour une image SPOT comprenant 4 canaux la signature spectrale d'un type d'objet sera caractérisée par 4 valeurs ou fourchettes de valeurs, pour PROBA capteur hyper spectral (grande résolution spectrale) 19 valeurs correspondant aux 19 canaux mesurés définiront une signature spectrale complète. Classiquement, on classe les pixels des images de télédétection par traitement numérique en comparant leurs comptes numériques dans les différents canaux avec des signatures pré établies de signification connue. Ce procédé est appelé classification dirigée, souvent fondé sur l'utilisation de classes d'entraînement pour définir les signatures. Dans d'autre cas, la classification est dite non dirigée : l'individualisation de groupes de pixels possédant une signature comparable est effectuée en premier, la recherche de la signification, sur le terrain de cette signature est réalisée par après. Tout le problème de l'utilisation des signatures numériques réside dans le caractère univoque ou non de la relation entre un type de surface et une signature spectrale et plus précisément encore entre une classe d'objets et une signature. Il n'existe pas de règle générale pour savoir si dans le contexte d'une prise de vue un type d'objet bénéficiera d'une signature « univoque » ; la plupart du temps cependant les signatures se « chevauchent » et les classifications des pixels dans les images produites par traitement numérique comportent des mélanges (une ombre prise pour de l'eau est un exemple typique). C'est pourquoi les résultats des traitements numériques aussi appelés automatiques doivent être validés par d'autres méthodes. Dans la pratique cela signifie souvent, dans le cas des objets naturels, par photo interprétation réalisée par des spécialistes.

### L'apparence de l'eau une fonction de la turbidité

L'apparence de l'eau n'est pas uniforme, elle varie en fonction de la texture de la surface, de la charge en éléments solubles et insolubles (la turbidité de l'eau) et de la profondeur de la lame d'eau. En première approximation, et pour le type de cours d'eau étudié, on peut admettre que la corrélation turbidité<sup>5</sup> – radiométrie<sup>6</sup> est dominante.

### Classification en quatre types d'eau : une discrétisation possible par le traitement numérique

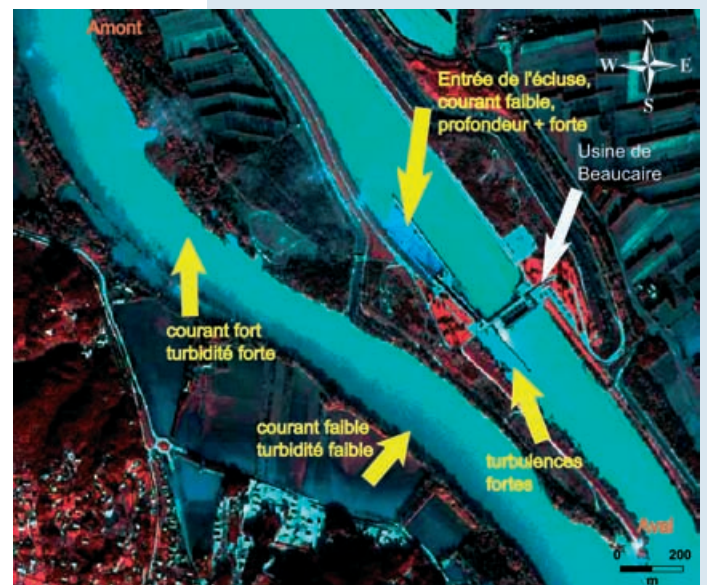
Cette variation de la « couleur » de l'eau est exploitée pour établir par traitement numérique des signatures différenciées au sein des surfaces en eau. Quatre « types d'eau » assimilables à quatre niveaux de turbidité relatifs sont distingués par traitement d'image. Cette classification est étalonnée à partir des drains permanents, puis généralisée à l'ensemble des surfaces inondées.

### Bénéfice de la distinction des différents types d'eaux

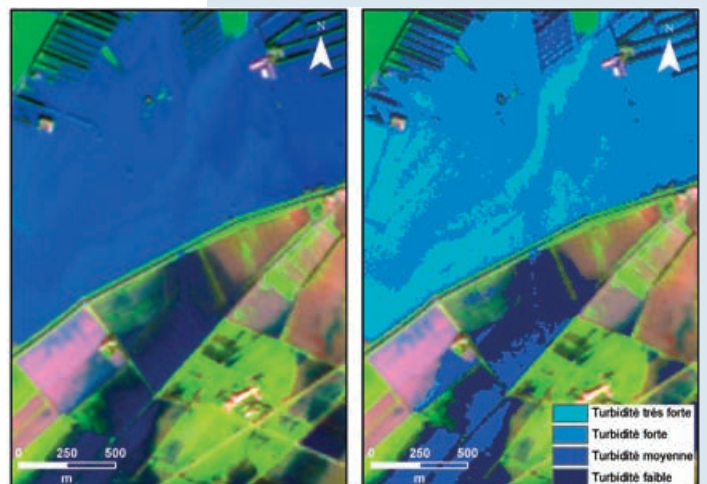
Le classement de l'eau apparente en fonction de la turbidité permet de tester la cohérence cartographique des laisses de crues et d'aider le photo interpréteur en charge de la validation du résultat des classifications par traitement numérique.

5 - Turbidité de l'eau : caractéristique d'un liquide contenant des matières en suspension qui en atténuent la transparence. Il faut noter que la charge en éléments en suspension est fortement corrélée avec la vitesse du courant qui augmente le potentiel de prise en charge.

6 - Radiométrie : mesure du flux d'énergie associé au rayonnement électromagnétique.

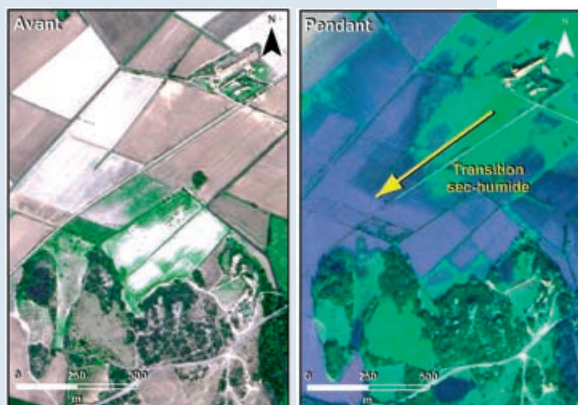


Hétérogénéité des réponses radiométriques dans les eaux de crue du Rhône [Source : image IKONOS du 6 décembre 2003].



Individualisation par traitement numérique de 4 niveaux de turbidité dans les eaux d'inondation à partir de l'image SPOT 5 multispectrale [Source : image SPOT 5 du 6 décembre 2003].





Transition sec-humide dans les secteurs en cours de ressuyage [Source : image SPOT 5 de référence datant de 2002 et image SPOT 5 événementielle du 6 décembre 2003].

## ■ Traces d'humidité dans les sols

Au cours du phénomène de ressuyage qui suit le passage de l'onde de crue, les terrains inondés retournent vers un état «normal». Ce retour n'est pas instantané ; après la disparition de l'eau en surface, le processus d'assèchement se poursuit par une désaturation progressive des terrains.

### Problème

Pendant la période de ressuyage il faut distinguer sur les images les sols humides des sols secs ou «normalement humides», normalement signifiant que l'humidité présente n'est pas liée à l'inondation étudiée.

### Observation

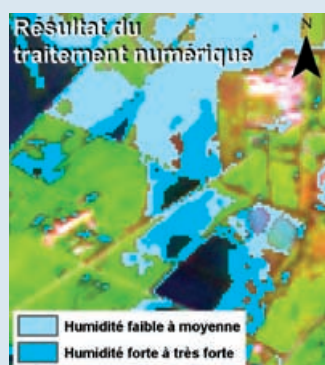
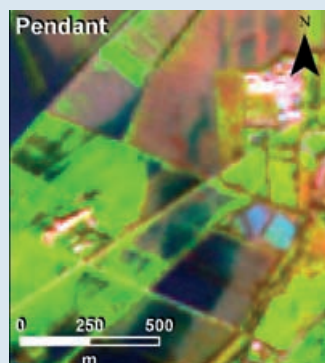
Sur les images de télédétection, pendant la période de ressuyage, on observe souvent que la limite des zones encore inondées n'est pas abrupte ; ce phénomène est particulièrement bien illustré à proximité des reliefs à pente faible. Cette frange de la zone inondée s'exprime par un changement graduel de la couleur des terrains enregistré par les capteurs CCD (capteurs optiques). Ces variations radiométriques, caractéristiques de cette zone intermédiaire, sont interprétées comme le reflet du ressuyage différentiel de l'eau d'inondation. Ce type de laisse de crue, sans eau apparente, est appelée trace d'humidité.

### Deux types d'humidité

Souvent, cette zone de transition est suffisamment bien marquée pour qu'il soit possible de l'individualiser par traitement numérique des images multispectrales. Les capteurs les plus sensibles à l'humidité des sols comme le canal moyen infra rouge des plates-formes SPOT permettent même de nuancer de façon relative au sein de ces zones humides transitoires plusieurs niveaux d'humidité. De la même façon que pour la transition eau apparente - traces d'humidité, la distinction des niveaux relatifs d'humidité est à nouveau validée par la disposition cartographique, en auroles, de ces différentes traces de crue.

### Conclusion

Pour arriver à une vision exhaustive des laisses de crues, il est important d'intégrer ces marques d'humidité dans la cartographie des zones touchées par l'inondation. Ainsi, la rémanence de zones de sols humides après la disparition de l'eau d'inondation en surface permet d'approcher plus précisément l'emprise totale des terrains touchés par l'inondation.



Cartographie par traitement numérique des laisses de crue de type humidité

Les zones de sols humides apparaissent en auroles autour des laisses de crue de type eau apparente ainsi que plus en amont. Les sols nus qui n'ont pas été touchés par l'inondation ne présentent pas la même signature spectrale [Source : image SPOT 5 de référence de 2002 et image SPOT 5 événementielle du 6 décembre 2003].

#### Les laisses de crue solides

Quand ils sont abondants, les dépôts solides sont un type de laisse de crue particulièrement intéressant en raison de leur durabilité, autorisant ainsi une observation «tardive» de l'impact. Cette caractéristique, valable pour les études de terrain, l'est aussi pour l'observation à partir des images de télédétection. Dans le cas de figure étudié les dépôts solides sont observés peu fréquemment ; les manifestations principales de ces phénomènes apparaissent de façon concomitante avec des creusements à proximité immédiate des brèches principales comme celle du Petit Mas d'Argence.

Le cas des dépôts solides n'est pas traité de façon significative par cette étude.



Dépôts solides au débouché de la brèche du Petit Mas d'Argence, sur le Petit Rhône [Source : image IKONOS du 6 décembre 2003].

## Vision dans la tache d'inondation : les objets hydrauliques

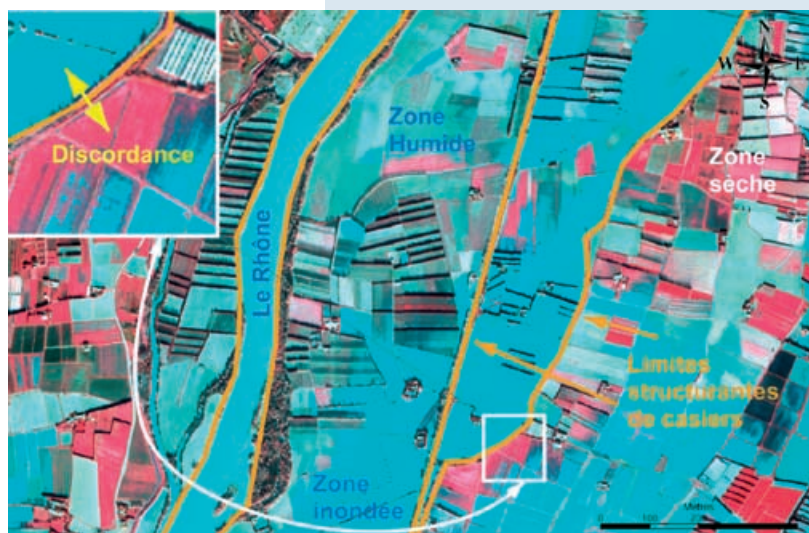
### ■ Stockage de l'eau dans le lit majeur : les casiers

#### Notions de casiers et de limites structurantes

L'eau d'inondation ne se répand pas dans le lit majeur de façon homogène. Usuellement, un modèle en « boîtes » juxtaposées appelées casiers hydrauliques permet de prendre en compte les caractéristiques du terrain pour les inclure dans les modélisations et autres descriptions des zones inondables. Par définition, un casier hydraulique est une zone élémentaire de stockage de l'eau dans le lit majeur, séparée de ses voisines par une frontière étanche pour une hauteur d'eau donnée ; cette frontière est aussi appelée limite structurante. Traditionnellement, le découpage du lit majeur en casiers hydrauliques est réalisé à partir de cartes IGN et de travaux de terrain.

#### L'observation

Le ressuyage des zones inondées au cours de la décrue ne se fait pas de façon homogène. Cette hétérogénéité qui n'est pas hasardeuse est liée à la complexité des écoulements, induite par les anisotropies principales du lit majeur : les limites structurantes. Par conséquent, il y a un intérêt à cartographier, ces hétérogénéités de l'inondation, qui se manifestent par des contacts discordants entre des zones à laisses de crue contrastées. L'exemple type est une zone humide bordant des terrains inondés, l'objet : chemin, route, talus, ... sur le terrain, matérialisant cette discordance, aura une valeur de limite structurante, attestée par le comportement différentiel des écoulements.



Matérialisation des limites structurantes des casiers hydrauliques par les contrastes de ressuyage [Source : image IKONOS du 6 décembre 2003].

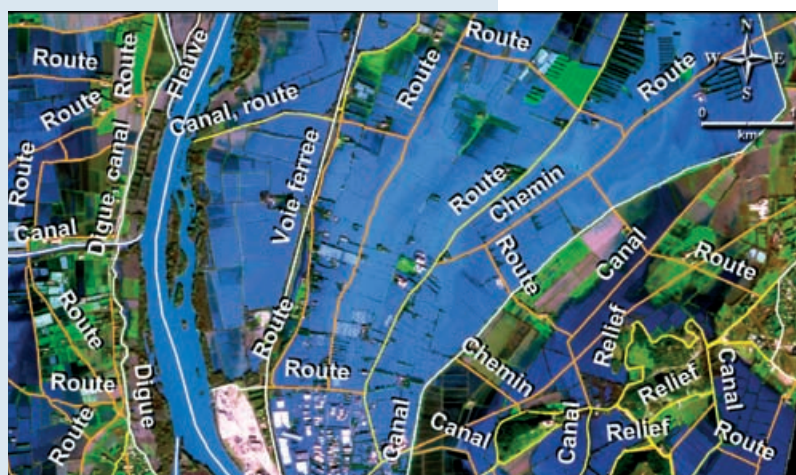
#### Les hauteurs d'eau

La détermination des hauteurs d'eau est un sujet à part entière, en raison entre autres de son utilisation par la réglementation.

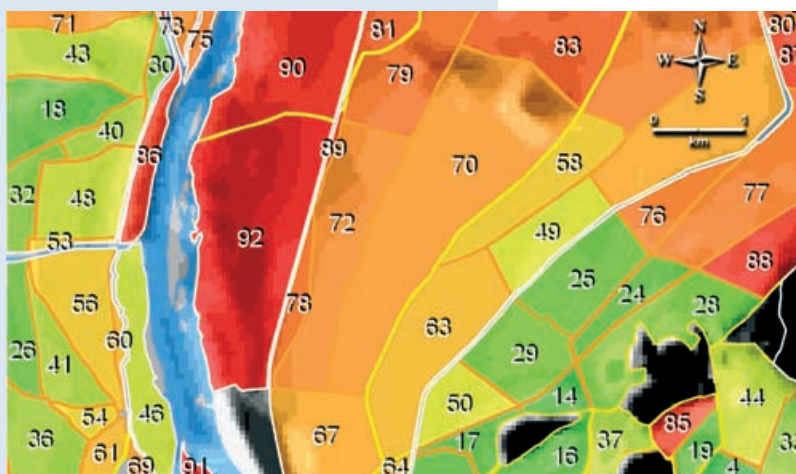
Les hauteurs d'eau dans les zones inondées sont accessibles de différentes manières. Soit, au moyen de levés altimétriques sur le terrain des traces de l'inondation : débris dans les arbres, traces d'humidité sur les constructions, ... Soit par la modélisation : le « remplissage » d'un modèle numérique de terrain discrétisé en casiers est approché par le calcul. Soit au moyen des méthodes exposées par Puech et Raclot à partir des photographies aériennes : en simplifiant, l'altitude du miroir de crue à l'intérieur de chaque casier est approchée en relevant systématiquement les points cotés immergés et émergés d'après les photos événementielles ; statistiquement, la surface de l'inondation est comprise entre les deux surfaces ainsi déterminées.

Toutes ces méthodes reposent sur la cotation altimétrique des laisses de crue. Hormis les mesures de terrain nivelées par un géomètre au point par point, les autres méthodes supposent l'utilisation d'un modèle numérique de terrain pour déterminer les altitudes des traces de crues. Compte tenu, des contraintes sur les phénomènes hydrauliques observés, l'obstacle principal à la détermination des hauteurs d'eau à partir des images de télédétection réside actuellement dans la disponibilité de modèles numériques de terrain ayant une résolution altimétrique et planimétrique suffisante, plutôt que dans la localisation des empreintes de la crue.





Identification des limites structurantes des casiers hydrauliques [Source : Image IKONOS du 6 décembre 2003].



Ordonnement des casiers hydrauliques fondé sur les altitudes moyennes.

## Exploitation

Pour réaliser une cartographie des casiers hydrauliques « en action », la période du ressuyage de la crue est particulièrement favorable car les contrastes entre les différents types de laisses de crue sont plus marqués qu'à l'apogée du phénomène de crue. Corrélativement, au fur et à mesure de la décrue, les limites structurantes de moindre importance vont apparaître petit à petit. Pour tenir compte de cet état de fait, une structuration gignonne en trois niveaux de casiers a été adoptée pour la description détaillée. L'ordre 1 est associé aux éléments structurants pluri-kilométriques, l'ordre 3 correspond aux éléments structurants pluri-hectométriques.

## Conclusion

Le calcul des altitudes moyennes par casier, possible même en utilisant une description lâche du relief (altitudes métriques et maillage de 50 m), permet d'établir une relation d'ordre théorique d'écoulement entre les casiers, qu'il s'agit de confronter avec les autres observations sur les directions d'écoulement pour mieux comprendre la dynamique de l'inondation.

## ■ L'origine de l'eau : brèches, surverses et transferts entre casiers hydrauliques

### Problème

Après la cartographie des casiers hydrauliques, l'objectif suivant est la détermination des points de transfert de l'eau depuis le lit mineur, vers le lit majeur.

Tous les phénomènes d'alimentation de la plaine d'inondation par les drains permanents naturels et artificiels lors d'une crue sont considérés sous le terme générique de débordement. Ces transferts se manifestent de plusieurs façons, un débordement du lit mineur : le niveau du drain dépasse le « plein bord » ; une surverse : le débordement passe par dessus un ouvrage ; une brèche : le débordement s'effectue au travers d'une rupture d'un endiguement.

*« La brèche est la manifestation ultime de la dégradation d'une digue sous l'effet de la montée des eaux d'un fleuve en crue. Elle se traduit par l'effacement brutal de la digue sur une plus ou moins grande longueur, typiquement 30 à 300 m » (P. Mériaux, 2004).*

## Les interactions ou échanges drain-casiers

Ils peuvent être complexes surtout lorsque plusieurs drains coexistent dans le lit majeur comme c'est le cas dans les zones étudiées. C'est pourquoi, il est parfois difficile de trouver qui alimente qui d'autant plus que cette relation producteur - consommateur peut varier au cours du temps et au long d'une même frontière. La combinaison de la vision en grand avec la haute voire la très haute résolution des capteurs récents est particulièrement bien adaptée à l'analyse du problème de l'origine de l'eau. D'un point de vue méthodologique, le cas général de l'échange drain - casier, avec transfert non orienté, est distingué des nombreux cas pour lesquels la ou les directions de transfert sont déterminées à partir des images.

Lors des événements de décembre 2003, en aval de Beaucaire, les drains majeurs et les ouvrages de protection sont le siège de plusieurs brèches. Dans son article P. Mériaux<sup>7</sup> (2004) en dresse un inventaire et analyse ce problème de façon approfondie. Ces brèches ne sont pas toutes de même nature ni de même ampleur. Il faut distinguer les deux brèches majeures qui affectent la rive droite du Petit Rhône au niveau du Mas de Claire Farine et du Mas d'Argence, de celles qui affectent la voie SNCF Arles - Tarascon : une structure à effet de digue, et de celles qui affectent les canaux plus petits comme le canal de Vigueirat. Dans quelle mesure ces phénomènes de brèches sont-ils observables au moyen de la télédétection, que ce soit pour les brèches de grandes dimensions mais aussi pour les plus modestes ?

### Vision des brèches majeures

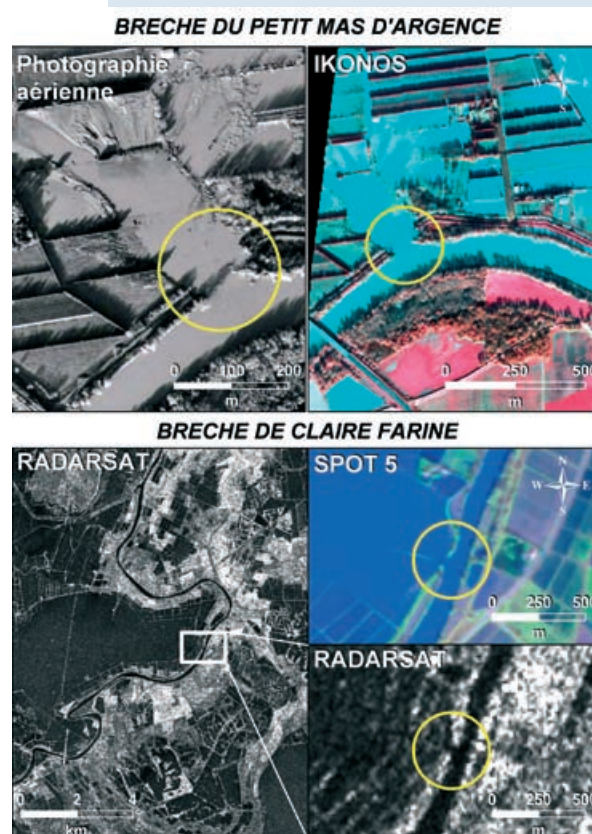
Les deux brèches spectaculaires du Petit Mas d'Argence et de Claire Farine sur le petit Rhône en aval d'Arles avec des largeurs respectives d'environ 50 et 85 mètres sont parfaitement visibles sur les images radar, satellites optiques et photo aériennes.

### Vision des brèches de petite taille et petits débordements

Le canal du Vigueirat, au nord est d'Arles est affecté par une brèche sur sa rive Est. L'eau qui cascade a travers cette brèche d'une vingtaine de mètres est parfaitement visible sur les capteurs optiques à haute résolution (orthophoto, Ikonos, Spot 5). Le cône humide-inondé en aval est visible également sur les capteurs radar. D'autres débordements tout au long des drains secondaires de la plaine d'Arles-Tarascon ont pu être identifiés et argumentés à partir des images haute résolution.



Complexité des échanges drains-casiers dans la zone de Fourques/Saint-Gilles [Source : image SPOT 5 du 6 décembre 2003].



Points de vue sur la brèche avec différents capteurs (radars et optiques) : exemples des brèches du Petit Mas d'Argence et de Claire Farine - Photographie aérienne du 4 décembre 2003 [Sources : images IKONOS, RADARSAT et SPOT 5 du 6 décembre 2003].

7 - Patrice Mériaux, CEMAGREF, Description des brèches sur les digues de protection contre les crues, Colloque La crue du Rhône de décembre 2003 : quels enseignements ? Les actes du colloque, 2005, CNS-50.



### Les échanges casier-casier

Les échanges casier à casier s'effectuent soit au travers d'une brèche affectant un élément structurant, soit par débordement lorsque le niveau de la crue dépasse la cote maximale de protection de l'élément en question. Ainsi, les transferts entre casiers peuvent être assimilés au cadre général des brèches et débordements dans les ouvrages. Un cas «classique» est le passage par-dessus un point bas d'une limite structurante qui permet la vidange du casier amont.

### Conclusion

L'imagerie haute résolution permet de réaliser un inventaire très complet des brèches, surverses et débordements de petite et grande dimensions. Souvent il est possible de préciser le sens des échanges au moment de la prise de vue.

## ■ Le chemin de l'eau : les zones d'écoulement

### Le problème

Après avoir repéré et cartographié les points ou zones d'échanges entre les drains et les casiers, puis de casier à casier, l'objectif est désormais de trouver le chemin de l'eau à l'intérieur des différentes unités hydrauliques ou casiers, sachant que ce chemin varie au cours de l'histoire de l'inondation.

### L'observation

Visualiser des courants au sein de la zone inondée revient une fois encore à distinguer des nuances au sein des surfaces en eau. Ces nuances sont celles déjà utilisées pour établir une classification à l'intérieur des zones inondées. On peut distinguer deux cas : soit le courant est suffisamment fort ou rapide pour induire une modification de l'état de la surface de l'eau, soit il n'y a pas de remous, mais l'eau est chargée en éléments solides qui font contraste. Dans les deux cas, il s'agit de dériver la direction du courant (si possible le sens également), à partir d'un gradient, exprimé par un changement textural et/ou radiométrique. **Les écoulements même peu turbulents sont riches en surprises, il n'est pas question de dresser l'inventaire des cas de figure possibles, mais d'exposer les principes employés pour dresser les cartes de directions de courant à partir de l'imagerie.** Deux sortes d'objets ont été régulièrement reconnues sur les images : les lignes de courant et les figures de ressuyage.

### Les lignes de courant

Sur les images optiques, la figure typique observée est celle d'un panache d'eau turbide claire au sein d'une masse d'eau sombre moins ou peu chargée en éléments en suspension. L'exemple type est le panache des eaux de crue, en mer, au

Relevé des directions de courants et de ressuyage au Nord et à l'Est d'Arles [Source : image SPOT 5 du 6 décembre 2003].



débouché du delta. Des figures analogues sont observables au sein des drains permanents et dans les zones inondées. La variation de couleur peut être assimilée à un gradient de turbidité plus ou moins brutal suivant les conditions locales, perpendiculaire à la direction du courant. Ces figures s'observent sur les images de télédétection à toutes les échelles, de pluri-hectométrique à pluri-décamétriques.

### Les directions de ressuyage

Une seconde figure typique des directions d'écoulement, visible grâce aux contrastes radiométriques, est la variation de l'état de ressuyage le long d'une pente qui a été submergée par la crue. Ce gradient de ressuyage entre la zone encore immergée et la zone déjà asséchée exprime également une direction de transfert ; dans ce cas, celle-ci est peu ou prou parallèle au gradient. Les directions de ressuyage délivrent une description de détail des écoulements ultimes ; le relevé systématique de ces indices complète les autres éléments de la description hydraulique de l'inondation qu'ils soient passifs et/ou actifs.

## ■ Méthodologie de cartographie détaillée des laisses de crue

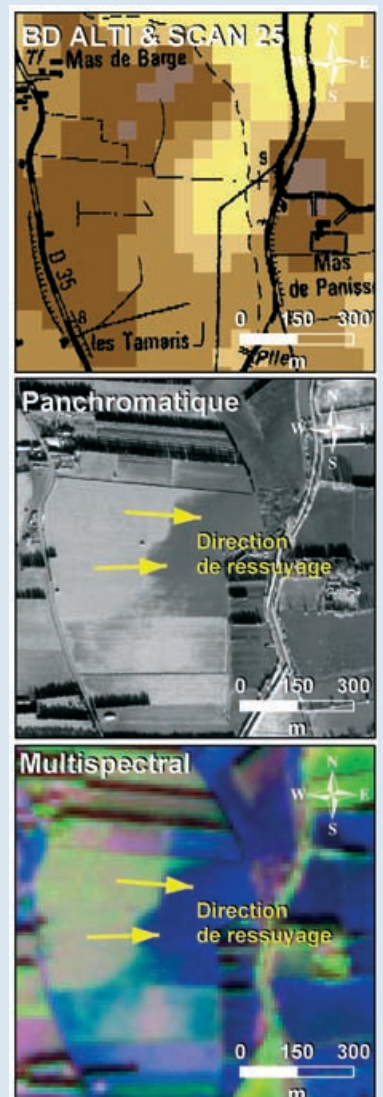
L'inventaire cartographique systématique et détaillé des laisses de crue : eau résiduelle stagnante ou en cours d'écoulement, traces d'humidité, dépôts alluvionnaires..., délivre une vision signifiante du phénomène d'inondation à travers l'identification des « objets hydrauliques » suivants.

- **L'extension cartographique détaillée des laisses de crue**, une donnée factuelle pour dériver la tache d'inondation.
- **La cartographie des casiers hydrauliques** non pas théorique, mais fondée sur l'observation du ressuyage différentiel des terrains et sur le relevé des limites structurantes « en action ».
- **L'inventaire exhaustif des brèches, surverses et débordements** sous la forme d'un recensement des zones d'échanges visibles entre les casiers et les drains.
- **Le relevé des directions d'écoulement** appuyé sur l'observation des gradients de turbidité dans les zones immergées « actives ».
- **Le recensement des directions de ressuyage** marquées par la transition entre des terrains à laisses de crue contrastées.

La combinaison, au sein d'un système d'information géographique, de tous ces éléments géoréférencés, issus de l'observation à distance, délivre une vision fine de l'inondation disponible pour dériver des interprétations sur le fonctionnement et l'impact de la crue et pour fournir des données test à destination des modélisations hydrauliques. Le point important est l'association, au sein d'une même description, de tous ces levés détaillés, permettant d'en vérifier la cohérence interne et de la confronter avec les autres approches de l'inondation : descriptive avec les études de terrain, théorique avec les modélisations.



Gradient de turbidité et direction du courant, exemple d'un panache turbide dans l'étang de Vaccarès [Source : image SPOT 5 du 6 décembre 2003].



Observation des directions de ressuyage au moyen des capteurs optiques [Source : images IKONOS et SPOT 5 du 6 décembre 2003].



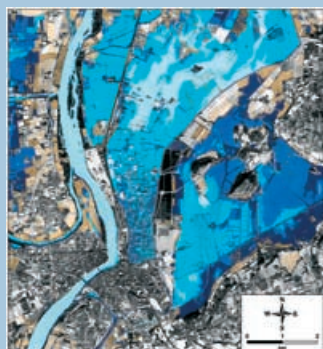
# LAISSES DE CRUE ET CARTOGRAPHIE DE L'EXTENSION DE L'INONDATION

## ■ Couverture de la tache d'inondation par les laisses de crue

Avec les débits, la connaissance cartographique de l'extension de la tache d'inondation constitue la deuxième information fondamentale pour décrire un événement d'inondation. La comparaison des résultats, sur l'exploitation des images produites par les différents capteurs, est focalisée sur ce point particulier. Des comparaisons chiffrées, concernant les inventaires cartographiques des objets hydrauliques, sont disponibles dans l'étude complète.

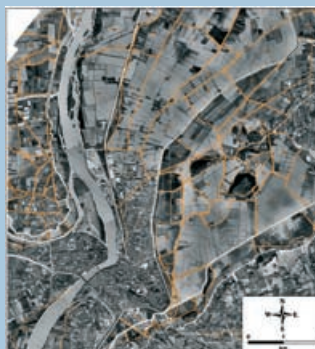
### Méthodologie de la comparaison des capteurs

L'un des objectifs de l'étude était de répondre à la question : quelle information sur l'inondation avec quel capteur ? Pour cela, un traitement similaire a été appliqué aux données issues des différents capteurs. Toutes les données ont été calées géométriquement sur une référence commune, en l'occurrence l'orthophoto de l'IGN. Une première phase a consisté à extraire par traitement numérique les traces de l'inondation. Dans un second temps, le « champ d'inondation numérique » est finalisé, validé par photo interprétation. Puis les cartes d'objets hydrauliques statiques et dynamiques sont également produites par photo interprétation. Pour chacun des capteurs testés, quatre produits cartographiques sont réalisés : la carte détaillée des laisses de crue (correspondant à une exploitation maximum du capteur), la carte des casiers hydrauliques, l'inventaire cartographique des transferts drain - casier, l'inventaire cartographique des directions d'écoulements. Toutes les cartes réalisées sont disponibles dans les annexes du rapport.



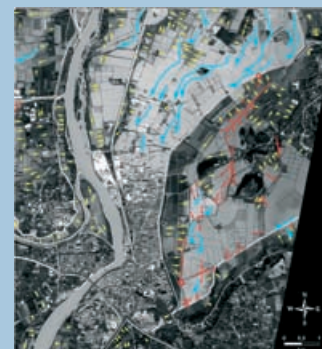
Carte des laisses de crue : eau apparente et traces d'humidité  
Les eaux très turbides figurent en bleu clair, les eaux peu turbides en bleu plus foncé, les zones plus ou moins humides en beige et crème.

[Source : image IKONOS du 6 décembre 2003].



Carte des casiers hydrauliques.  
Les casiers hydrauliques du 1<sup>er</sup> ordre (blanc) et du 3<sup>e</sup> ordre (orange) sont associés à des limites structurantes sur le terrain ; chacun d'entre eux possède un numéro d'ordre altimétrique (orange) permettant de réaliser des graphes théoriques de circulations d'eau.

[Source : orthophoto du 6 décembre 2003].



Carte des écoulements et autres objets hydrauliques dynamiques.

Les lignes de courant figurent en bleu, les directions de ressuyage en jaune, les brèches et zones d'échange drain-casier en rouge.

[Source : image SPOT 5 du 6 décembre 2003].

Les résultats issus de la télédétection sont étalonnés à l'aide des résultats cartographiques, présentés dans la synthèse sur la crue de 2003 de l'étude et présentés comme résultats de terrain sur les cartes et les diagrammes. Les cartes détaillées produites avec les différents capteurs sont des cartes de laisses de crue (traces d'humidité, flaques d'eau, dépôts solides...). Cette cartographie a pour objectif de se rapprocher au maximum du factuel : les traces visibles de l'inondation sur les images. La carte de référence utilisée représente la carte de la zone inondée par la crue de 2003

établie à partir d'observations de terrain, de photos aériennes et satellitaires. Par conséquent, les comparaisons se font entre une carte généralisée de synthèse et les différentes cartes de laisses de crue issues de chacun des différents capteurs de télédétection. Ainsi, la comparaison surfacique montre la proportion de la zone, interprétée comme inondée (étude de référence), pour laquelle les traces ou laisses de crue sont encore visibles au moment de l'acquisition de l'image.

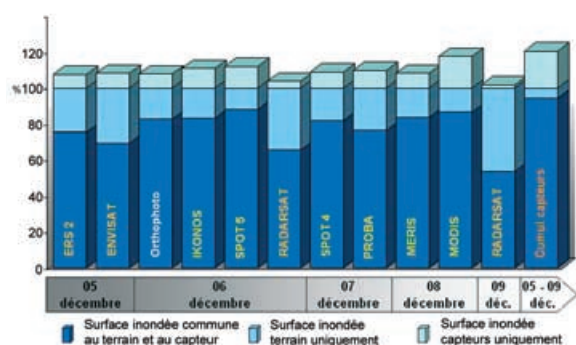
Comme tous les produits de l'étude sont cartographiques, donc géoréférencés, les comparaisons : laisses de crue - surfaces inondées sont quantifiées au moyen de l'outil SIG, les paysages ruraux et urbains sont différenciés.

### Comparaison globale

Pour chaque capteur, le premier point de vue de la comparaison de la carte des zones inondées avec l'emprise des laisses de crue est global. Il s'exprime sous forme d'un pourcentage, pour chaque zone d'étude, qui mesure la proportion entre la surface de la zone inondée de référence (terrain) et la surface totale des laisses de crue observées. Pour les capteurs optiques haute résolution, 2 jours après le pic de débit, la surface des laisses de crue représente 90 à 100 % de la surface de la « zone inondée terrain ».

### Comparaison spatialisée

La comparaison globale souffre d'un défaut majeur, les écarts inverses des différentes visions tendent à s'annuler. Afin de mieux cerner ces différences et de s'affranchir de ce hiatus, les comparaisons chiffrées et cartographiques sont analysées plus avant sur la base de trois sous-ensembles ou partitions : la partition commune à la zone inondée (terrain) et aux laisses de crue (capteurs), la partition particulière à la zone inondée terrain et la partition particulière au capteur.



Arles - partition du cumul des surfaces inondées terrain et des surfaces des laisses de crue en fonction des capteurs.

### Les zones inondées communes

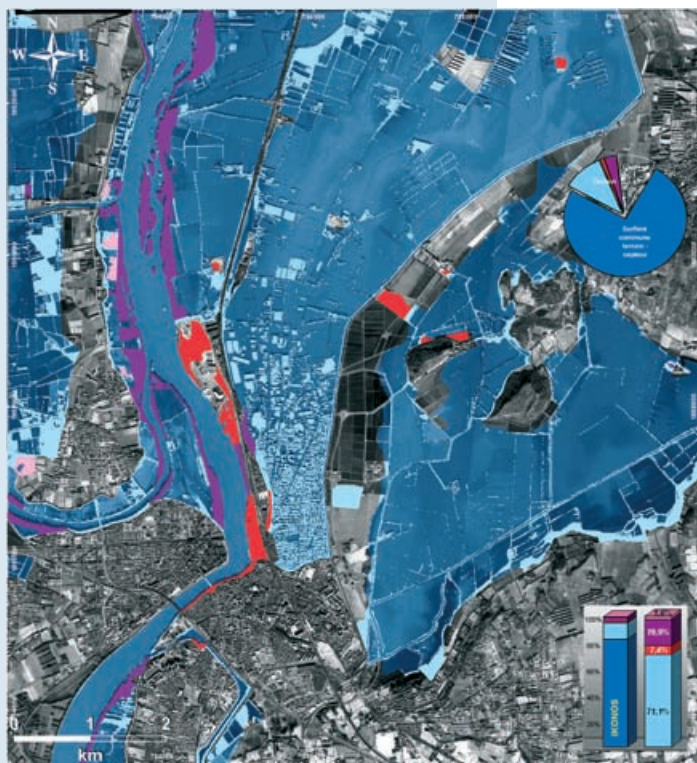
De 80 à 90 % des laisses de crues observées avec les différents capteurs sont situées à l'intérieur du domaine défini comme inondé par l'étude de terrain.

### Les zones inondées vues uniquement par le terrain

L'observation des cartes d'écarts permet de fournir des explications pour les zones non couvertes par les laisses de crue.

**Généralisation de la tache d'inondation** : la cartographie dérivée des images satellites est plus détaillée que la cartographie issue du terrain, de





Analyse thématique de la partition « terrain uniquement ». Cette figure fait apparaître la surface inondée commune au terrain et au capteur (bleu transparent), les secteurs de généralisation de la tache d'inondation par les relevés terrain (bleu opaque), la surface inondée masquée par la végétation haute (violet), la zone inondée sur les relevés de terrain mais sans trace visible sur les images (rouge), et la surface inondée vue uniquement par les relevés terrain (rose) [Source : image IKONOS du 06 décembre 2003].

nombreux objets de petite taille qui sont inclus dans les surfaces inondées par les études de terrain sont détournés pour les cartographies réalisées à partir des images de télédétection haute résolution.

**Surfaces inondées masquées par la forêt :** les cartes issues de l'imagerie sont des cartes factuelles, les inondations ne sont pas extrapolées sous le couvert forestier au stade de la cartographie des laisses de crues.

**Surfaces classées inondées par le terrain qui ne sont visibles sur aucun capteur :** quelques cas sont considérés comme douteux pour le photo interprète car aucune laisse de crue n'est observée sur aucun capteur, à aucune date, et y compris sur les photos aériennes obliques prises à basse altitude le premier jour de l'inondation.

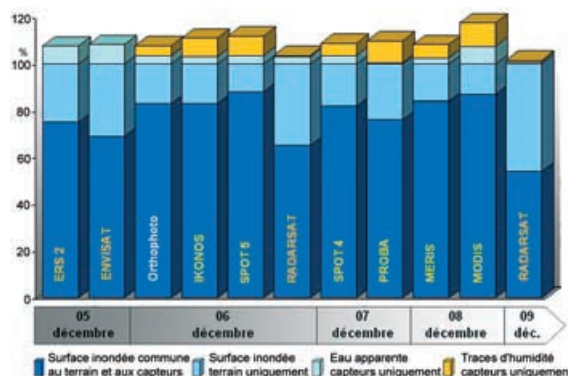
### Les omissions vraisemblables

Elles sont peu nombreuses et représentent quelques pourcents avec les capteurs haute résolution. En résumé, sur le secteur d'Arles à occupation du sol mixte urbaine et rurale, la zone inondée terrain dépourvue de laisses de crue représente 10 à 20 % de la surface inondée terrain

totale (optique). Les explications principales sont : la plus grande finesse des cartographies réalisées à partir des images (on limite le propos aux capteurs haute et très haute résolution) en raison du détournement du bâti et d'éléments du paysage en relief et de l'existence de zones vraisemblablement inondées masquées par les ripisylves.

### Les zones inondées vues uniquement par le capteur

De façon symétrique à la partition « terrain uniquement », il existe un ensemble de surfaces en dehors de la zone inondée terrain, pour lesquelles des laisses de crue sont observées à partir des images produites par un ou plusieurs capteurs.



Arles - partition du cumul des surfaces inondées terrain et des surfaces des laisses de crue en fonction des capteurs ; la partition capteur uniquement est différenciée par type de laisse de crue : eau apparente ou humidité.

Les diagrammes montrent que tous capteurs de télédétection optiques confondus, la partition « capteur uniquement » comprend une partie importante (supérieure ou égale à 50 %) de laisses de crue de type humidité. Sur le plan de la répartition géographique des laisses de crue, un effet d'auréoles ressort clairement des cartes. La concordance des résultats

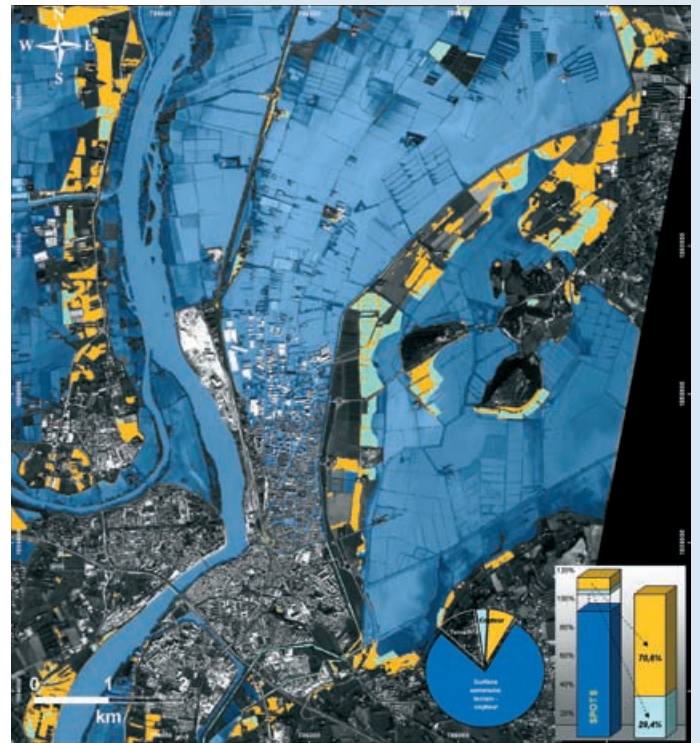
entre les différents capteurs tant du point de vue des cumuls chiffrés de surfaces que de la cohérence géographique des levés conforte la vraisemblance de ces traces et donc l'intérêt de les cartographier.

Environ 10 % des surfaces de laisses de crue identifiables au moyen des différents capteurs sont extérieures à la zone inondée terrain. Entre les deux tiers et les trois quarts de ces laisses de crue sont des traces d'humidité qui se disposent cartographiquement en auréoles autour des laisses de crue de type eau apparente, elles permettent de compléter la cartographie de l'extension de la tache d'inondation.

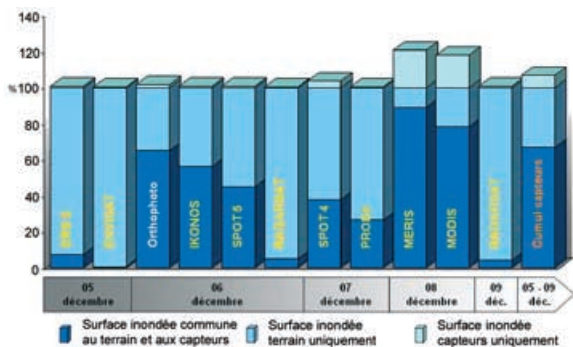
## ■ Observation de l'inondation en milieu urbain

En zone urbaine dense les performances brutes des capteurs optiques sont directement corrélées avec leur résolution, les capteurs radars de résolution décimétrique à pluri-décimétriques sont inopérants.

La photo-interprétation de l'orthophoto événementielle montre que 35 % de la surface classée comme inondée par les études de terrain ne présente pas de laisses de crue. Trois raisons principales expliquent cet écart. La surface bâtie incluse dans la tache d'inondation terrain est importante, elle représente 70 % de l'écart. La plus grande finesse des travaux cartographiques par photo interprétation



Disposition cartographique des laisses de crue - eau apparente (turquoise) et traces d'humidité (jaune) - de la partition « capteur uniquement ». La surface inondée commune au terrain et au capteur apparaît en bleu foncé (avec transparence) [Source : image SPOT 5 du 6 décembre 2003].



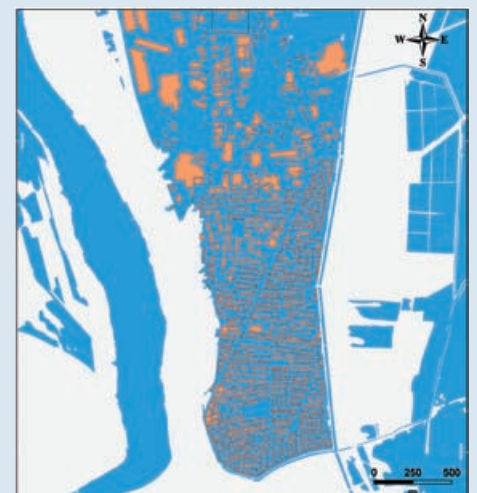
Arles - partition du cumul des surfaces inondées « terrain » et des surfaces des laisses de crue en fonction des capteurs.

de données haute résolution permet une « cartographie au bâtiment ». La végétation urbaine masque l'inondation, cela représente 8 % de l'écart. Enfin, dans certaines zones, aucune trace de l'inondation n'est visible sur aucun capteur y compris l'orthophoto ce qui explique 20 % de l'écart.

Afin de mieux apprécier la couverture de l'inondation par les laisses de crue, on peut améliorer la référence en supprimant les surfaces bâties de la surface inondée terrain. Les résultats de la comparaison avec les cap-

Ratio, en pourcentage, des surfaces inondées des capteurs optiques, par rapport à l'observation sur l'orthophoto			
Orthophoto 0,30 m 6 décembre	IKONOS 1 m 6 décembre	SPOT 5 2,50 m 6 décembre	SPOT 4 20 m 7 décembre
100	89	76	71

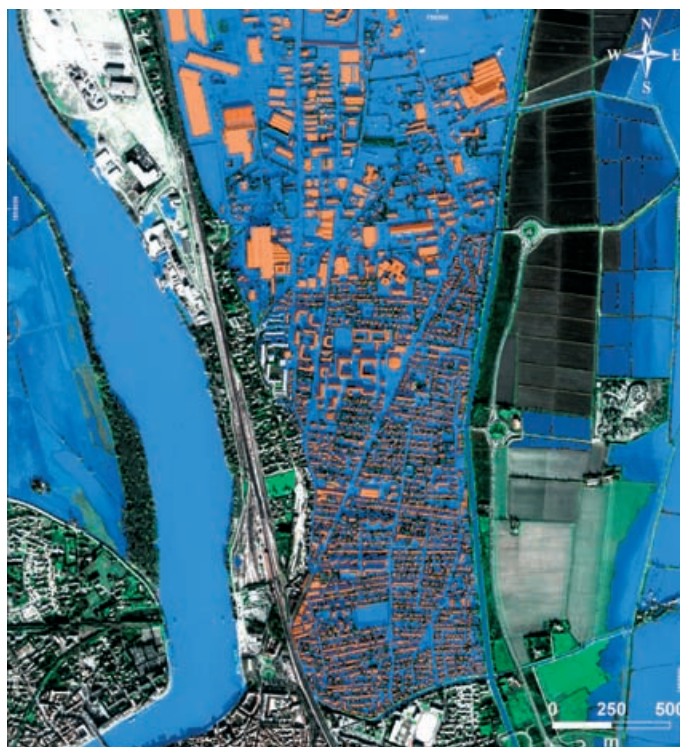
Cartographie du bâti (orange) dans les zones inondées (bleu) d'après l'orthophoto du 06 décembre 2003.







Laisses de crue en Arles avec SPOT 5 [Source : image SPOT 5 du 6 décembre 2003].



Laisses de crue en Arles avec Ikonos [Source : image IKONOS du 6 décembre 2003].

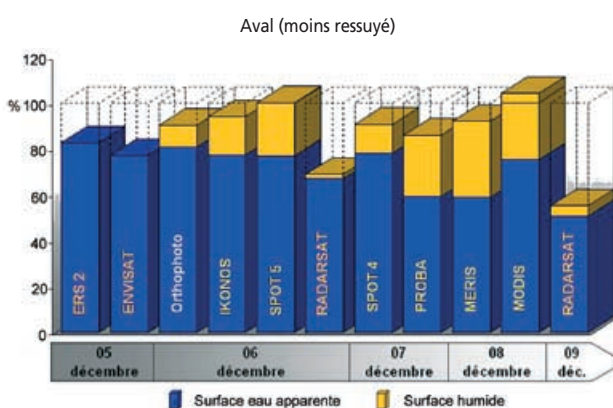
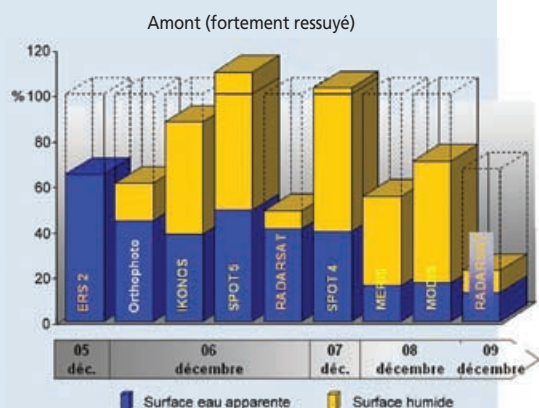
teurs optiques haute résolution varient alors entre 100 % pour l'orthophoto et 71 % pour SPOT4. Le couvert végétal, mesuré sur l'image Ikonos, étant de 10 % l'effet de masque urbain est compris entre 10 et 15 % pour Spot 5, 20 % pour SPOT 4, il est pratiquement nul avec Ikonos.

En Arles, zone urbaine dense, le taux de couverture de la zone inondée corrigée par les laisses de crues permet une cartographie au quartier avec SPOT 4, au bâtiment où à l'îlot avec SPOT 5, au bâtiment avec Ikonos et l'orthophoto.

## ■ Traces d'humidité et extension de l'inondation en milieu rural

### *Ressuyage différentiel amont - aval*

En aval, en Arles (parties rurales), la couverture de la surface inondée terrain par les laisses de crue est proche de 90 %. À la même date, en



Couverture des zones inondées terrain par les laisses de crue des différents capteurs.

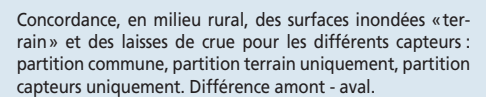
### ***Partition commune***

Dans la plaine de Tarascon en amont, la couverture de la zone inondée terrain par les laisses de crue est plus faible : autour de 70 %. Symétriquement, la quantité de laisses de crue hors tache d'inondation terrain est également beaucoup plus grande.

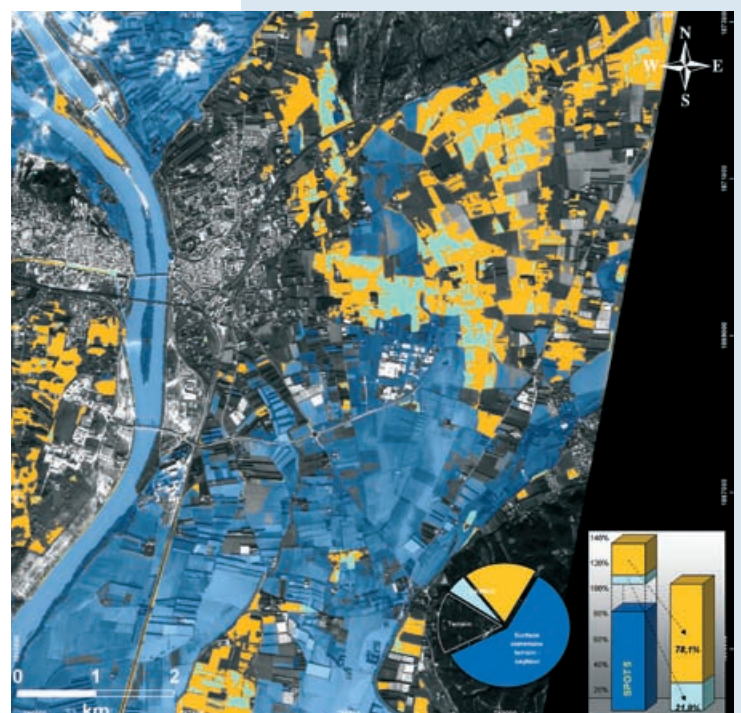
L'analyse à partir des cartes des zones inondées terrain dépourvues de laisses de crues (30 % en optique) permet de retrouver les trois explications principales mises en avant sur le secteur d'Arles tous types d'occupation du sol confondus.

**Les zones inondées vues uniquement par le(s) capteur(s)**

Au moins pour la partie nord, cette divergence reflète la difficulté de cartographier après coup des inondations de type ruissellement ou mixtes impluvium/ruissellement et débordement de drains secondaires. Les trois quarts des laisses de crue observées sur l'image SPOT 5 sont situées dans cette partie amont du domaine étudié, qui n'est pas alimentée par le débordement du Rhône, et dont la dynamique de ressuyage, au moins dans le cas étudié, est plutôt rapide.



Disposition cartographique des laisses de crue - eau apparente (turquoise) et traces d'humidité (jaune) - de la partition « capteur uniquement » en zone rurale. La surface inondée commune au terrain et au capteur apparaît en bleu foncé (avec transparence) [Source : image SPOT 5 du 6 décembre 2003].





## Enseignements

Dans un secteur déjà fortement ressuyé, deux jours après le pic de débit, les résultats dans le secteur de Tarascon montrent **l'importance de la cartographie des laisses de crue de type traces d'humidité. Les capteurs multi spectraux sont particulièrement appropriés pour cette détection** avec une mention spéciale pour les combinaisons spectrales comportant un canal dans le **moyen infra rouge** (SPOT 4 et 5).

### ■ Les laisses de crue avec la télédétection, un fort potentiel pour établir l'extension des inondations

Tous types d'occupation du sol confondus, la couverture de la tache d'inondation terrain par les laisses de crues issues de la télédétection est de l'ordre de 85 à 90 % avec les capteurs haute résolution. Les deux raisons principales de la non couverture sont la finesse de la spatio carte de l'empreinte de l'inondation qui détoure de petits objets émergents et le masque par le couvert végétal de certaines parties du terrain.

Pour les zones fortement ressuyées, l'humidité des sols permet de détecter jusqu'à 30 % de zones inondées complémentaires.

En milieu rural, l'évaluation de l'inondation par les outils radars est pertinente. Une exploitation fondée sur la détection de changements améliore encore les résultats. Cette capacité, combinée avec le bénéfice d'une acquisition tous temps rend les capteurs radar incontournables dans la panoplie des outils d'observation des inondations sur de vastes territoires.

En milieu urbain, les capteurs radar de résolution décamétrique à pluri-décamétriques sont inopérants. Les résultats avec les capteurs optiques à haute et très haute résolution montrent une couverture du résultat issu de l'image aéroportée comprise entre 70 et 90 %. Ce taux de couverture permet dans tous les cas de distinguer à l'échelle des quartiers ceux qui sont affectés de ceux qui ne le sont pas. La végétation urbaine explique à hauteur de 10 % (de la zone inondée totale) les non détections. Pour les capteurs de très haute résolution, une détermination à l'échelle du bâtiment est possible.

Quel que soit le type d'occupation du sol, les outils de télédétection offrent un potentiel particulièrement intéressant pour le suivi des inondations. En utilisant les possibilités apportées par la constellation actuelle des plates-formes commerciales spatiales, une fréquence journalière d'observation de l'intégralité des territoires affectés par un événement, même de très grande ampleur géographique comme les inondations de l'Elbe en 2002 (plusieurs centaines de kilomètres de linéaires de cours d'eau) est à l'heure actuelle techniquement possible.

L'observation de la Terre à partir des plates-formes spatiales est en plein développement. De nombreux nouveaux outils sont en projet ou en construction, le nombre de plates-formes optiques et radar à très haute résolution (métrique et infra métriques) disponibles dans un futur proche pour l'observation des inondations augmentera régulièrement. D'ores et déjà, dans de nombreux pays, la pertinence de la télédétection pour décrire les inondations n'est plus une question ouverte, l'interrogation concerne plus certainement la manière d'intégrer au mieux cette source d'information dans les procédures de gestion du risque.

# LA TÉLÉDÉTECTION APPLIQUÉE À LA GESTION DE L'ALÉA INONDATION

## Intégration des produits cartographiques de télédétection dans le cycle de gestion du risque

L'objectif est d'alimenter une réflexion sur l'employabilité de la donnée de télédétection événementielle pour la gestion des inondations en identifiant les produits d'information susceptibles d'être réalisés à partir de cette source de donnée brute.

### Géo produits de télédétection pour la gestion de l'aléa inondation

Les «géo produits inondation» tirés des images de télédétection sont spécialisés en fonction de la mission principale dévolue à chacune des quatre phases de gestion du risque : la prévision pour l'anticipation, l'évaluation pour la crise, le constat détaillé pour le retour d'expérience, la référence réglementaire pour la prévention et la mitigation. Dans tous les cas, l'information géographique produite repose sur un enregistrement initial par l'image des événements. Cette donnée brute, factuelle, est exploitée en temps quasi réel pour la gestion de crise dans le cadre de la cartographie rapide avec les images satellitaires ; en temps différé, de façon exhaustive et détaillée pour le retour d'expérience ; comme référence pour la prévention et la mitigation en fondant certains documents de gestion réglementaires ; comme composante des bases de données pour la phase de vigilance au sein d'annales historiques cartographiques d'aide à la prévision des impacts, aux cotés des mesures hydro météorologiques classiques primordiales pour cette dernière mission.

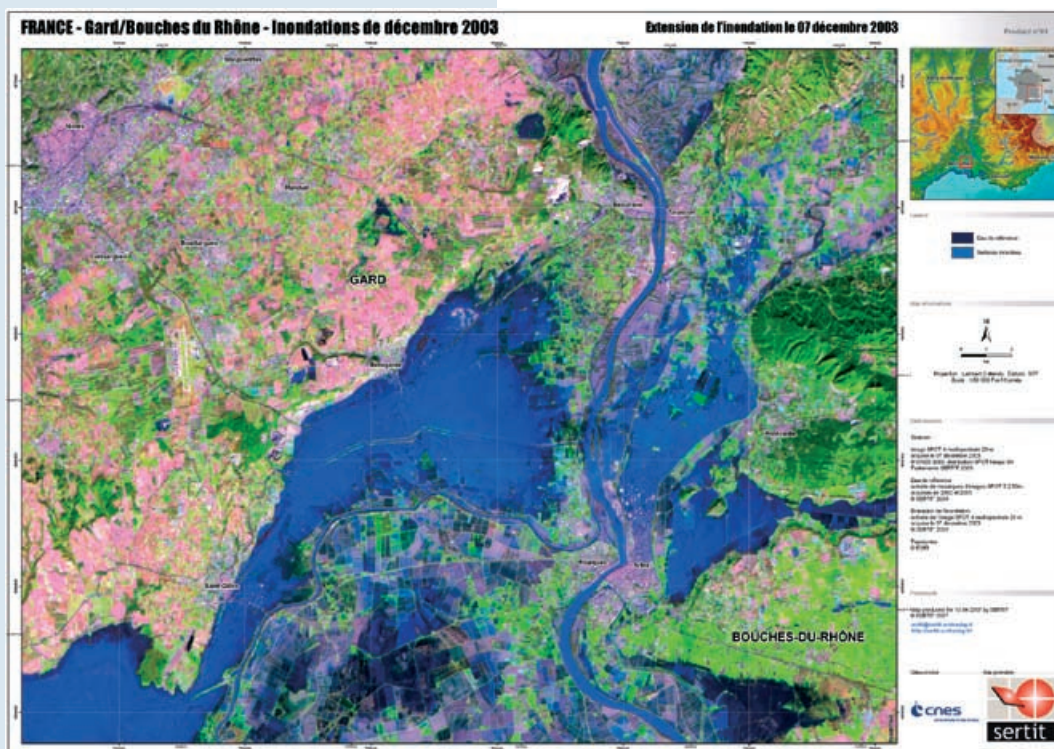
	Cycle du risque et points d'application de» Géo produits inondation» issus de la télédétection				
	Phase de gestion du risque	Anticipation	Crise	Retour d'expérience	Prévention et mitigation
	Application de l'information	Prévision	Évaluation	Constat	Référence
	Mission principale des pouvoirs publics	Gradation de la vigilance et déclenchement de l'alerte	Protection des biens et des personnes, gestion des ressources opérationnelles	Connaissance, compréhension, explication de l'aléa	Règlementation
Phénomène Inondation	Débts	Pas accessibles directement par télédétection (appréciation indirecte à partir de la tache d'inondation combinée avec les annales et bases de données)			
	Extension de l'inondation	Carte prévisionnelle de l'inondation à partir d'un atlas de référence	Carte d'évaluation des zones inondées : le service de cartographie rapide utilisant les données spatiales	Carte de constat détaillée de l'inondation + mémoire objective du phénomène	Carte de la crue maximum historiquement connue
		Faisabilité : oui	Opérationnel	Faisabilité : oui	Faisabilité : oui
	Casiers			Spécificité : observation des casiers en action	
				Faisabilité : oui	
	Hauteurs d'eau		?	Carte des hauteurs d'eau	Carte des hauteurs d'eau historiques
				R & D	
	Courants			Carte des courants au temps t	Carte des vitesses
				Faisabilité : oui	non
	Origine de l'eau			Synthèse	
Contribution signifiante de l'image évènementielle					
Impact	Populations	Carte prévisionnelle des populations menacées	Carte d'évaluation des populations touchées	Carte d'impact sur les populations	
		R & D			
	Enjeux	Carte prévisionnelle des enjeux menacés	Carte d'évaluation des enjeux touchés	Carte d'impact sur les enjeux i.e. Carte des dommages	
R & D					



## ■ La cartographie rapide : l'évaluation de la situation pour la gestion de crise

Le point de départ est la crise générée par l'impact du phénomène naturel sur les personnes, les biens et l'environnement. Si la programmation des moyens d'observations à distance est activée, il existe une opportunité réelle de mémoriser le phénomène et son impact. Actuellement, la justification d'une telle demande relève toujours des missions de gestion de

la crise et de l'immédiat post crise, précisément, la protection des personnes et des biens ainsi que la gestion des ressources opérationnelles de sécurité civile. Dans cette optique, les informations requises pour gérer la situation appartiennent au domaine de l'évaluation de l'événement. En période de crise, le facteur temps détermine une bonne partie de la pertinence des données. Les besoins en information opérationnelle des services de protection civile relèvent en première instance de la délimitation cartographique des zones affectées, puis de l'évaluation des



Exemple de produit de cartographie rapide : vision grand territoire des inondations de 2003.

populations touchées et de l'estimation des impacts aux infrastructures. Plus que jamais, l'information fournie doit être directement consommable par les gestionnaires du risque, il n'est pas envisageable de diffuser de l'imagerie brute.

En raison de la contrainte de temps, seule la filière spatiale est actuellement à même de boucler le processus qui va de l'acquisition de la donnée événementielle jusqu'à la diffusion des cartes numériques d'évaluation aux gestionnaires du risque, dans un délai déjà pertinent dans le contexte de la situation de crise (12 heures entre l'acquisition de l'image et la diffusion de la carte d'emprise de l'inondation, Allenbach et al. 2005<sup>8</sup>). Dans ce cadre opérationnel, l'information de télédétection doit être considérée comme un complément à la vision du terrain. Mais, l'utilisation de la donnée événementielle doit être regardée dans le contexte du cycle du risque dans son ensemble car, toutes les applications et produits dérivés des images de télédétection bénéficient de l'existence d'un système opérationnel de crise, déclencheur de la mise en mémoire des événements.

8 - Allenbach B. & al., *Rapid EO Disaster Mapping Service : Added Value, Feedback and Perspectives after 4 Years of Charter Actions*, proceedings of IGARSS 2005, Seoul, Korea.

Entre la mémoire brute événementielle et une carte détaillée de l'inondation, il existe de nombreux paliers dans les produits d'information possibles. Pour la gestion de crise, le qualificatif d'évaluation employé signifie qu'une spatio carte réalisée en temps limité, quelques heures, ne possède pas les mêmes caractéristiques de fiabilité, de validité et d'exhaustivité que l'on trouvera dans un document élaboré en temps différé, non limité, et avec des possibilités de confrontation des résultats avec les autres approches. La carte de crise est un produit en soi, mais elle ne doit pas être considérée de façon isolée : quand ce document existe, les exploitations approfondies en aval bénéficient aussi de cet acquis thématique.

### La cartographie rapide avec les données satellites

Le service rendu au travers de la Cartographie Rapide est la **production et la diffusion en temps de crise** d'information cartographique sur les événements catastrophiques. Cette information est produite sur la base d'images satellitaires prises par tous les satellites d'observation de la Terre et en particulier par l'ensemble des moyens mobilisables au travers de la Charte Internationale « Espace et Catastrophes majeures ». Un tel service s'adresse au monde entier, il suppose la mise en astreinte permanente d'un pool de ressources important comprenant des spécialistes en télédétection appliquée aux catastrophes, de moyens de traitements informatiques conséquents à la fois en logiciels et en matériel, ainsi que des moyens de télécommunications significatifs tant pour la réception de la donnée satellitaire brute que pour la diffusion de l'information produite vers les gestionnaires de l'urgence. En période de crise, les destinataires de cette information appartiennent à trois grandes familles d'acteurs : les autorités publiques, la protection civile et les organisations de secours non gouvernementales. L'Europe est en pointe dans la définition et la mise en place de tels services, avec deux entités opérationnelles à l'heure actuelle : le Sertit et le DLR (Agence spatiale allemande). Actuellement, une démarche ciblée Cartographie Rapide est prioritaire à l'échelon européen dans la définition des objectifs du 7<sup>e</sup> PCRD<sup>9</sup> et de GMES<sup>10</sup>.

### Étapes d'une action de cartographie rapide



9 - 7<sup>e</sup> PCRD : Programme Cadre de Recherche et de Développement de la Communauté Européenne.

10 - GMES : Global Monitoring for Environment and Security, la mobilisation européenne en faveur de l'environnement et de l'espace.



## ■ La cartographie détaillée : le constat exhaustif pour le retour d'expérience

Le retour d'expérience est entendu comme la phase d'analyse qui vise à la connaissance, la compréhension et l'explication scientifique de l'aléa. Cette phase d'acquisition de savoir est réalisée à partir des traces résiduelles du phénomène et de tous les enregistrements événementiels disponibles.

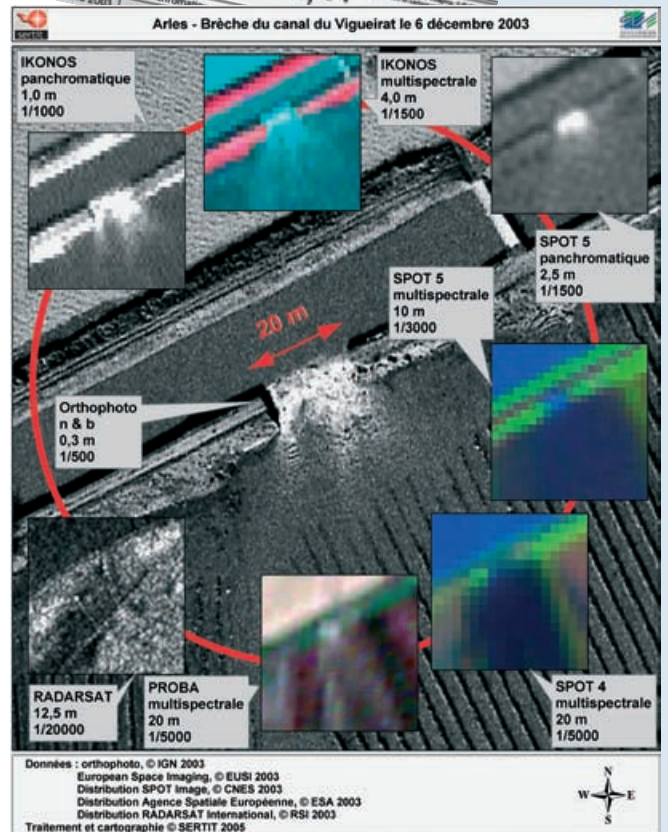
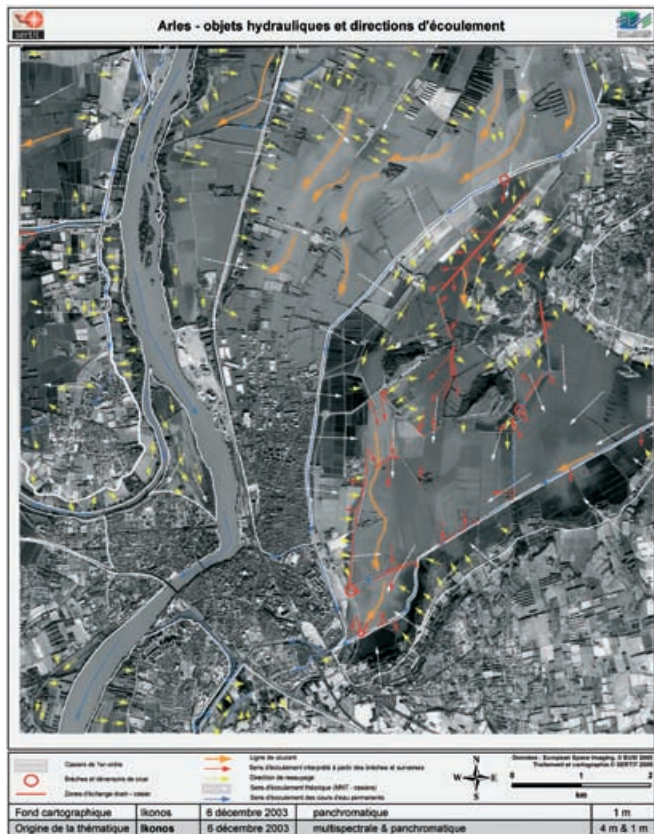
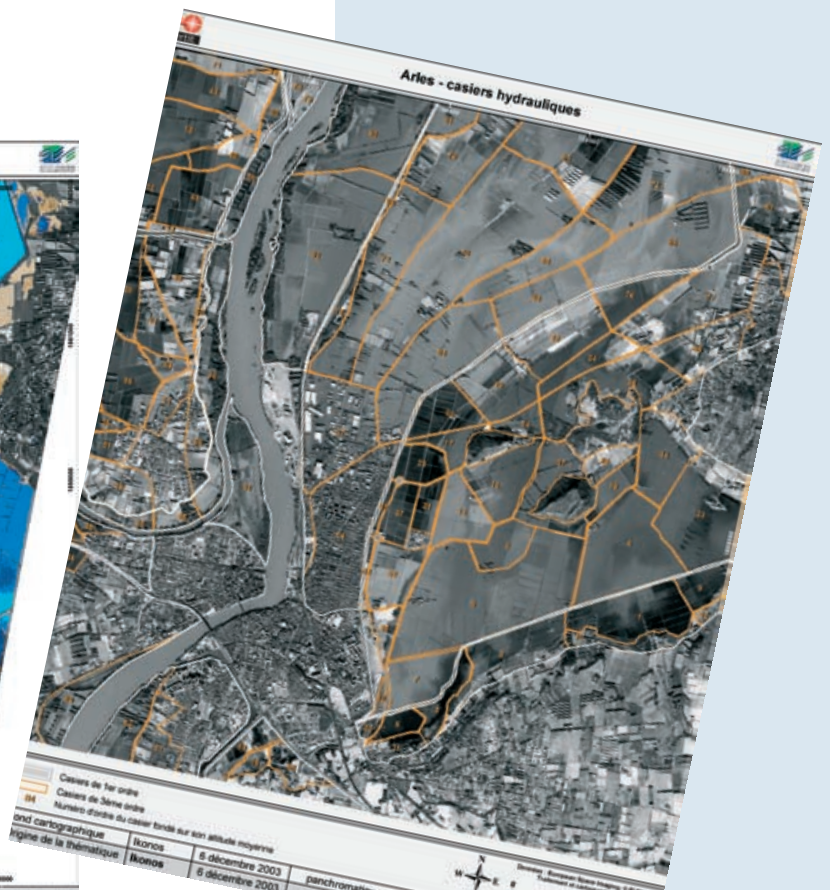
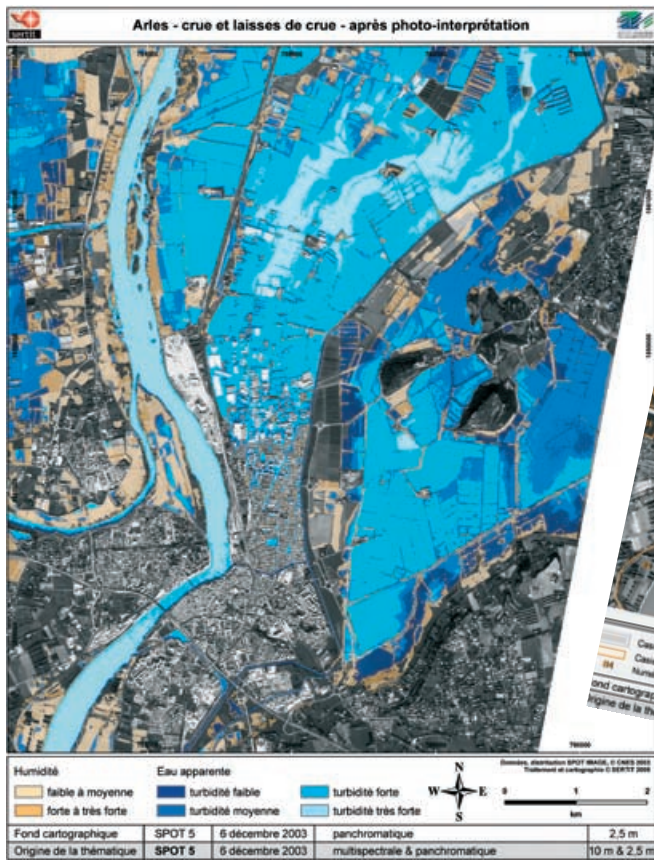
Le maître mot adopté pour cette phase de gestion du risque est constat ; ce constat doit être le plus exhaustif possible, c'est pourquoi les éléments d'information sont, pour l'essentiel d'entre eux, requis sous forme de cartes en format numérique. L'étape finale de ce retour d'expérience peut être représentée (en partie) par le produit cartographique appelé vecteur d'inondation, spécifiant en tout point de la tache d'inondation l'origine de l'eau, qui représente elle-même une synthèse des autres éléments descriptifs : emprise de l'inondation, casiers, brèches et débordements, courants ...

La contribution de la télédétection à cette synthèse comprend les produits de base réalisés pour l'étude détaillée à savoir : carte de constat de l'emprise de l'inondation ; carte des échanges drain – casier ; carte des casiers hydrauliques ; carte des courants.

Pour les cartes issues des outils de télédétection haute ou très haute résolution, la finesse des travaux réalisés va largement au-delà du 1 : 25 000<sup>e</sup>, usité à l'heure actuelle comme échelle de cartographie des inondations. Les cartes rendues correspondent à une exploitation «au maximum» de la donnée disponible, qui dans certains cas est largement utilisable au 1 : 5 000<sup>e</sup> voire jusqu'au 1 : 1 000<sup>e</sup>. Dans un premier temps, on peut raisonner sur la réalisation d'une carte de type enveloppe de l'inondation au 1 : 25 000<sup>e</sup> ; celle-ci est intégrée par traitement d'image et photo-interprétation à partir de la généralisation de l'observation des laisses de crue observées sur l'image et du MNT ; cette méthode est similaire à celle des hydrologues parcourant le terrain.

Cependant, les bénéfices de la cartographie détaillée sont importants. Sur le plan méthodologique, la cohérence cartographique des différents types de laisses de crue renforce la validité des observations. Sur le plan de la conservation de l'argumentaire de l'interprétation elle permet de bien distinguer le factuel du conjectural. Mais, c'est surtout en raison des attentes fondées sur les cartographies dérivées de la carte d'emprise de l'inondation que la cartographie détaillée trouve tout son sens. En effet, les constats économiques sur l'impact des inondations constituent un résultat escompté des études réalisées dans le cadre du retour d'expérience. Un des éléments importants qui conditionnent la qualité de ces études est la finesse de la carte de l'emprise de l'inondation. L'objectif à terme est de se rapprocher d'une «carte au bâtiment touché» à même de permettre des évaluations économiques avec une granularité suffisante. Dans cette optique, aller au maximum du détail dans la délimitation du champ d'inondation peut être considéré comme un investissement dont les fruits sont cueillis lors de l'étude des impacts, l'autre volet du retour d'expérience.





Retour d'expérience, production d'un constat cartographique détaillé de l'évènement avec les images : carte des laisses de crue, carte des casiers hydrauliques, carte des courants, image d'une brèche [Source : orthophoto et images IKONOS, SPOT 5, RADARSAT du 6 décembre 2003 et images SPOT 4 et PROBA du 7 décembre 2003].



## ■ Les annales cartographiques des inondations historiques : des références pour la modélisation et la réglementation

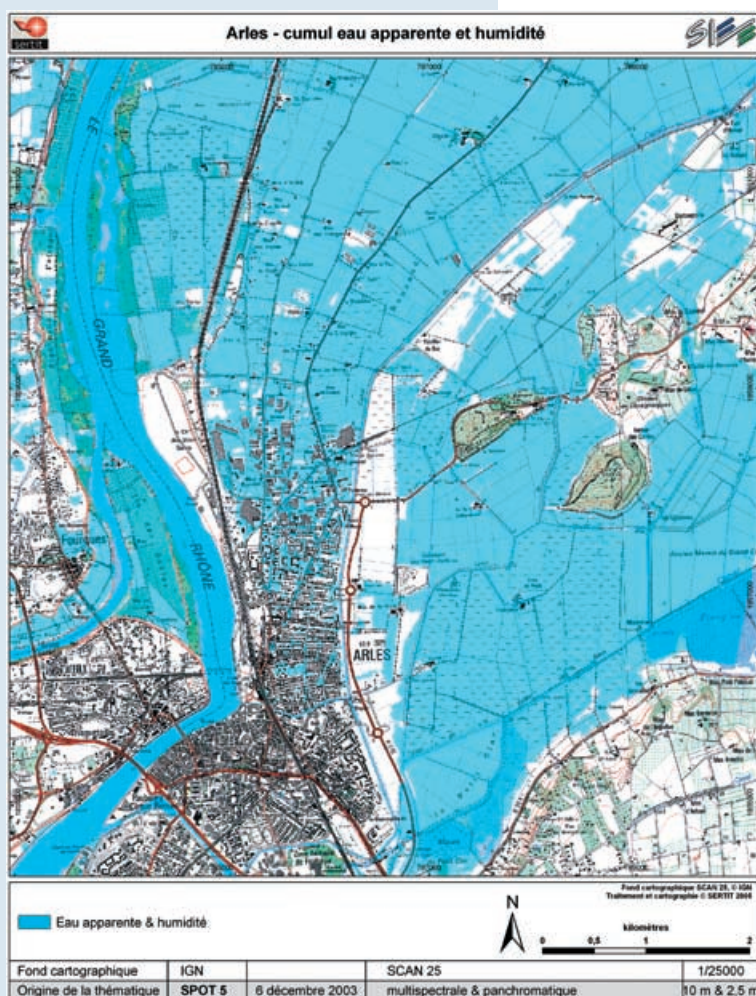
La démarche réglementaire de gestion du risque d'inondation est sous-tendue par une notion d'événement de référence. Cet événement de référence est l'événement le plus important connu et documenté, dans la mesure où sa probabilité d'occurrence est au moins centennale. À défaut de référence historique, un événement centennal modélisé en tient lieu quand sa réalisation est possible. Les zonages réglementaires et règlements sont construits à partir de la connaissance de cette référence exprimée en termes d'emprise de la zone inondée, de hauteurs d'eau et de vitesses de courants.

Il est certain que le recul dont nous disposons avec les archives de télédétection aéroportée (50-60 ans) ou spatiale (20-30 ans) ne permet pas d'espérer, statistiquement, une bonne documentation de ces événements historiques par les outils de télédétection, d'autant plus que cela aurait supposé l'existence d'une stratégie d'acquisition systématique des images événementielles. D'autre part, la pauvreté en cartes d'observation des inondations historiques semble être plus la règle que l'exception. Seules

trois inondations sont cartographiées pour la vallée du Rhône : 1856, 1994 et 2003 : la mémoire événementielle n'est pas toujours à la hauteur des besoins des gestionnaires du risque.

Dans un contexte d'insuffisance documentaire sur l'extension des inondations passées, l'alternative proposée par la modélisation prend tout son sens. L'une des difficultés des modélisations hydrauliques reste cependant le calage du modèle théorique sur la réalité de terrain. Autrement dit, le choix parmi tous les résultats de la modélisation qui ont satisfait les équations de la mécanique des fluides, de celui qui est représentatif de l'événement prévisible, observé, ou analysé a posteriori. Il est certain que toute la connaissance accumulée lors des phases de retour d'expérience sur les débits et leurs variations, mais aussi sur l'extension de l'inondation, le positionnement et le fonctionnement des limites structurantes et des casiers hydrauliques, les hauteurs d'eau dans le lit mineur et dans le lit majeur, le recensement des zones d'écoulement principales ... toutes ces informations sont à même d'aider les modélisateurs dans leurs travaux d'ajustements vers un modèle réaliste. Ainsi, même pour l'établissement de la référence historique, la connaissance sur un événement unique peut s'avérer insuffisante. Le savoir cartographique acquis sur des événements de plus petite ampleur, cinquantennale, trentennale, voire décennale est susceptible de conforter les hypothèses et descriptions de base des modèles. La crue de référence est alors

Intégration de la cartographie des inondations dans les bases de données de référence [SCAN 25 © IGN].



extrapolée à partir de la connaissance par l'observation et la modélisation d'événements plus modestes, d'une façon similaire à l'extrapolation des débits exceptionnels à partir des courbes de tarage.

Il faut cependant garder à l'esprit que la crue de référence peut être devant nous, et qu'il s'agit aussi de mettre en place les moyens qui assureront une couverture documentaire suffisante de cet événement futur ; dans cette perspective, le potentiel des outils de télédétection est significatif (cf. phase de gestion de crise).

Finalement, il faut replacer l'ensemble de la problématique des annales et références dans le contexte du changement climatique, et de ses impacts sur la validité des séries statistiques.

## ■ L'atlas des zones inondées : un support à la prévision des impacts complémentaire de la modélisation

Dans l'analyse proposée la phase d'anticipation est organisée autour de la gestion de la gradation de la vigilance et de déclenchement de l'alerte. La vigilance relève désormais de l'organisation des Services de Prévision de Crue (SPC). Le cadre de cette mission est défini localement dans le Schéma Directeur de Prévision des Crues (SDPC) complété par le Règlement de Surveillance, de Prévision et Transmission de l'Information sur les Crues (RIC). Dans le cadre de la mission de prévision des crues, et au-delà de l'aspect des débits et hauteurs d'eau, l'accent est aussi porté sur la prévision souhaitable de l'impact. Cette prévision est envisageable à partir de la combinaison d'une prévision de l'extension de l'inondation, combinée avec des cartographies numériques de la répartition de la population et de spatialisation des enjeux économiques.

Dans la phase d'anticipation : la prévision de la crue, le rôle principal est tenu par les services hydro météorologiques. L'observation des crues (antérieures à ce stade du cycle du risque) n'entre éventuellement en ligne de compte que dans les phases de vigilance orange et rouge. Il est concevable alors, dans le cadre de l'implémentation d'une politique de prévision, de compléter les informations sur les précipitations et les débits, par des informations cartographiques sur les enjeux menacés. La production de ce type d'information est possible au travers de la synergie existant entre les modélisations et les annales cartographiques des inondations antérieures. Dans ce contexte, la mise en place d'une systématisation de l'enregistrement de l'emprise des inondations, à l'échelle du territoire, serait un moyen d'enrichir et/ou de constituer ces annales cartographiques des

Impact des inondations de 2003 en Arles : image virtuelle combinant l'extension de l'inondation, le plan de masse extrudé des bâtiments et l'imagerie satellite.





inondations. Une fois définie l'emprise prévisionnelle de l'inondation, le croisement de cette information avec une connaissance spatialisée des enjeux humains et économiques, qui relève de producteurs d'information spécialisés, fournit l'élément de la prévision d'impact de la crue.

### ■ Synergie des approches : terrain, modélisation et télédétection

Quelle que soit la phase du risque, les différentes approches : observations de terrain, modélisation et observation à distance sont complémentaires. Le potentiel de la télédétection est grand, mais il ne constitue que l'une des approches vers la connaissance nécessaires à la gestion de l'aléa inondation. Pendant la phase d'anticipation la complémentarité de toutes les cartographies d'extension des inondations existantes et des modèles est nécessaire pour l'établissement de prédictions des impacts éventuels. En période de crise, la capacité de la filière spatiale à produire et diffuser des cartes d'évaluation en quelques heures est désormais reconnue, cette cartographie rapide est bonifiée par les informations de terrain. Lors du retour d'expérience, la complémentarité des observations et mesures in situ avec la « vision d'en haut » de la télédétection est le meilleur moyen d'aboutir au constat exhaustif et détaillé du phénomène synthétisé dans la carte du vecteur de crue. Enfin, pour la phase de prévention et de mitigation, le savoir historique de référence devra intégrer la description des événements aléatoires futurs délivrée par les différentes visions événementielles complémentaires : in situ, à distance et modélisées ; l'observation de demain sera la référence d'après demain.

## *Éléments d'évaluation des coûts opérationnels*

L'objectif est la définition d'ordres de grandeurs de coûts pour la réalisation de produits cartographiques dédiés inondations. Les coûts des fournitures de données sont estimés sur la base de prix catalogues ou sur la base de fournitures spécifiques acquises à l'occasion de cette étude. Pour la production d'information par les méthodes et techniques traditionnelles, les chiffres fournis sont fondés sur les travaux qui ont été réalisés pour le compte de la DIREN à l'issue des inondations de 2003. Pour les travaux utilisant les données de télédétection, les évaluations sont réalisées à partir d'un décompte des heures de travail qui ont été nécessaires pour la production des cartes et inventaires lors de la réalisation de cette étude. Le chiffrage est appliqué à la réalisation de produits spécifiques : carte d'extension de l'inondation, carte de courants... tels qu'ils ont été réalisés lors de cette étude.

Les coûts des achats de données et les coûts de traitements sont individualisés. La raison de ce choix est la difficulté de répartir le coût des données entre tous les produits ou applications qui peu ou prou en font usage. La donnée événementielle est utile entre autres pour la carte d'évaluation de l'emprise de l'inondation en période de crise, pour la carte enveloppe de constat de l'inondation dans le cadre du retour d'expérience, pour la

cartographie détaillée des bâtiments réellement affectés par l'inondation lors de l'étude d'évaluation économique des impacts. La clef de répartition du prix d'achat des données est délicate à établir, sachant que la liste des produits et applications qui en font usage est loin d'être complète.

## ■ Coûts d'acquisition des données de télédétection

Pour les comparaisons, les prix des données exposés sont normalisés au km<sup>2</sup>. Les distributeurs de données commercialisent les images suivant plusieurs types de découpages qui aboutissent pour un même capteur à des prix au km<sup>2</sup> différents. La règle adoptée pour l'évaluation est de calculer le prix sur la base de l'achat d'une scène standard spécifique entière.

Coût d'acquisition des données orthorectifiées en 2005 (par km <sup>2</sup> )							
	Donnée de référence				Donnée événementielle		
	Résolution	Achat de la donnée brute	Scannage - Mosaïquage Orthorectification	Total orthorectifiée	Achat de la donnée brute	Scannage - Mosaïquage Orthorectification	Total orthorectifiée
Aéroporté panchromatique	0,3 m	-	77,70 €	77,70 €	32,50 €	77,70 €	110,20 €
Ikonos panchromatique	1 m	13,60 €	8,00 €	21,60 €	28,90 €	8,60 €	37,40 €
Ikonos multispectrale	4 m	13,60 €	8,00 €	21,60 €	28,90 €	8,60 €	37,40 €
Spot 5 panchromatique	2,5 m	1,50 €	0,20 €	1,70 €	2,58 €	0,20 €	2,78 €
Spot 5 panchromatique	5 m	0,75 €	0,20 €	0,95 €	1,83 €	0,20 €	2,03 €
Spot 5 multispectrale	10 m	0,75 €		0,95 €	1,83 €	0,20 €	2,03 €
Spot 4 panchromatique	10 m	0,43 €	0,20 €	0,63 €	1,61 €	0,20 €	1,81 €
Spot 4 multispectrale	20 m	0,43 €	0,20 €	0,63 €	1,61 €	0,20 €	1,81 €
Radarsat	25 m	0,23 - 0,30 €	-	-	0,40 - 0,47 €	-	-
ERS	30 m	0,04 - 0,07 €	-	-	0,22 €	-	-
ENVISAT	30 m	0,04 - 0,07 €	-	-	0,22 €	-	-

### Orthorectification

Les images utilisées pour réaliser les produits cartographiques doivent être corrigées géométriquement. Cette orthorectification, nécessaire lorsque l'on souhaite fusionner des données cartographiques d'origines variées, peut être réalisée par les distributeurs de données ou par les opérateurs de valeur ajoutée. Pour les évaluations de coûts, avec le souci de différencier le coût du traitement thématique : l'extraction d'information sur les objets hydrauliques, du coût de la fourniture des données, le parti pris adopté est d'intégrer le traitement d'orthorectification au coût de fourniture des données. Les prix d'orthorectification pris en compte sont ceux indiqués par les catalogues des distributeurs de données, ils varient notablement pour les différentes plates-formes.



	Coûts d'acquisition des données orthorectifiées par scènes standards en 2005						
	123 km <sup>2</sup> (mini aéroporté 20 mn vol)	100 km <sup>2</sup> (mini Ikonos)	169 km <sup>2</sup> (mini Spot)	729 km <sup>2</sup> (Spot)	2 916 km <sup>2</sup> (Spot)	3 600 km <sup>2</sup> (Spot)	10 000 km <sup>2</sup> (Radar)
Aéroporté	13 530 €	11 000 €	18 590 €	80 190 €	320 760 €	396 000 €	1 100 000 €
Ikonos panchromatique	4 600 €	3 740 €	6 320 €	27 264 €	109 058 €	134 640 €	374 000 €
Ikonos multispectrale	4 600 €	3 740 €	6 320 €	27 264 €	109 058 €	134 640 €	374 000 €
Spot 5 panchromatique 2,5 m	5 400 €			6 700 €	10 020 €		30 060 €
Spot 5 panchromatique 5 m	4 900 €			5 610 €	7 320 €		21 960 €
Spot 5 multispectrale 10 m	4 900 €			5 610 €	7 320 €		21 960 €
Spot 4 panchromatique 10 m	4 600 €			5 200 €	6 520 €		19 560 €
Spot 4 multispectrale 20 m	4 600 €			5 200 €	6 520 €		19 560 €
Radarsat	4 700 €						
ERS	2 200 €						
ENVISAT	2 400 €						

### **Données satellitaires de référence**

Les prix des données indiqués pour les données de référence des études sont les prix de données d'archives (quand elles existent) ou bien des prix de données avec les contraintes de programmation les plus laxistes et donc les tarifs les plus bas.

### **Données satellitaires événementielles**

Pour les données événementielles, le coût des données, en raison de la contrainte de priorité imposée sur la plate-forme d'observation, est plus élevé. Chaque distributeur fonctionne avec sa propre grille de tarification ; pour chaque plate-forme, le prix correspondant à la contrainte maximale a été retenu pour l'évaluation.

### **Données aéroportées**

Pour le prix de la donnée aéroportée, les coûts sont établis à partir des missions réalisées lors des événements de 2003. Le coût d'achat de la donnée brute représente le coût facturé pour les missions d'acquisition aéroportées des images argentiques en noir et blanc. Le coût additionnel rapporté à la fourniture de la donnée sous forme orthorectifiée intègre le scannage des documents papiers, l'orthorectification proprement dite et le mosaïquage des clichés.

La fourchette de prix des données de télédétection est d'une ampleur considérable puisqu'elle dépasse le facteur 100 (voire 1 000) pour le prix ramené au km<sup>2</sup>. L'achat de cette fourniture de base suppose une bonne maîtrise de l'offre du marché, de la finalité applicative et des techniques de mise en œuvre.

## ■ Coûts de production de l'information sur l'inondation

Le coût de réalisation d'un produit n'est pas indépendant de la taille ni des caractéristiques géographiques de la zone d'étude. Les conditions locales, en termes de taille de l'emprise du secteur d'étude et de taille de la zone d'investigation (taille du lit majeur), influent à la fois sur le coût d'achat des données, rapporté au km<sup>2</sup> utile, et sur la quantité de travail à fournir. Les cas de figure sont trop nombreux pour faire l'objet d'une approche exhaustive ; c'est pourquoi les coûts ont été calculés à la fois pour les données et pour les traitements sur deux scénarios théoriques très distincts en terme de superficie de la zone d'étude : le premier correspond à un lit majeur de grande ampleur, la vallée du Rhône entre Lyon et la mer, à savoir 3 750 km<sup>2</sup> (250 km x 15 km) ; le second, plus réduit est dimensionné d'après la basse vallée de l'Hérault : 600 km<sup>2</sup> (60 km x 12 km). Les coûts calculés sont synthétisés sous forme de prix au km<sup>2</sup>.

Les coûts de traitement des données sont indiqués dans une décomposition par produit.

### Cartographie des zones inondées

La cartographie des zones inondées est évaluée sur la base de trois produits qui représentent trois étapes de traitements successifs dans l'élaboration d'un produit final d'exploitation détaillé de la donnée de télédétection. Le premier est le **produit** dit de « **cartographie rapide** », il correspond à l'exploitation en temps de crise de l'imagerie spatiale délivrée, par exemple, dans le cadre de la Charte Internationale « Espace et Catastrophes

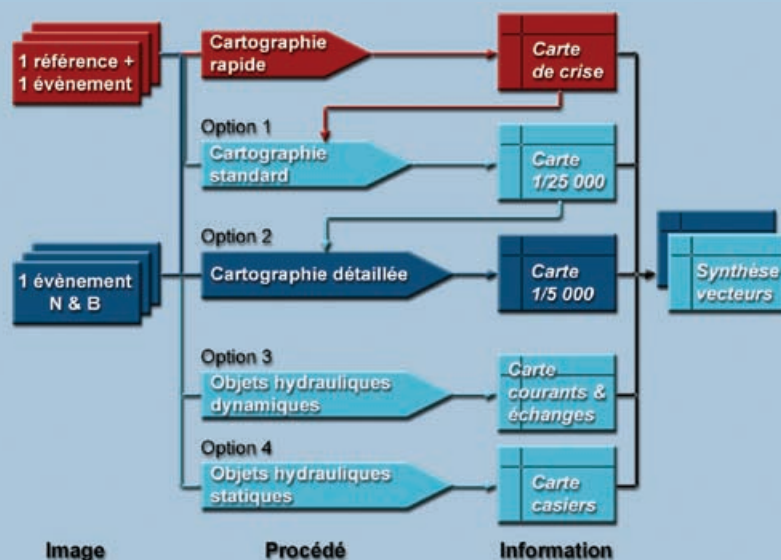
Évaluation de coûts de production de l'information sur les inondations, par type de produit et par km<sup>2</sup> (2005)

	Coût de traitement hors données ( <i>données fournies orthorectifiées et mosaïquées</i> )					Traitement des données	
	Cartographie de crise	Cartographie standard	Cartographie détaillée	Carte des courants & échanges drain-casiers	Carte des casiers et limites structurantes & vecteur de crue de 3 <sup>e</sup> ordre	Total forfait + 1 <sup>er</sup> + 3 <sup>e</sup> + 4 <sup>e</sup>	Total 1 <sup>er</sup> + 3 <sup>e</sup> + 4 <sup>e</sup>
	Cartographie zone inondée						
	Cartographie zone inondée produit de carto rapide	Enveloppe inondation 1:15 000 <sup>e</sup> - 1:25 000 <sup>e</sup>	Cartographie détaillée des laisses de crue type lot 3 (1:1 500 <sup>e</sup> - 1:5 000 <sup>e</sup> )				
	Forfait carto rapide (base scène)	1 <sup>er</sup> coût additionnel (lit majeur)	2 <sup>e</sup> coût additionnel (lit majeur)	3 <sup>e</sup> coût additionnel (lit majeur)	4 <sup>e</sup> coût additionnel (lit majeur)	Forfait + 1 3 4	1 3 4
Aéroporté	-	20 - 25 €	38 - 41 €	6 - 7 €	6 - 7 €	34 - 38 €	34 - 38 €
Ikonos	6 - 13 €	8 - 9 €	23 - 26 €	4 €	4 €	24 - 28 €	15 - 18 €
Spot 5	6 - 13 €	5 - 6 €	15 - 19 €	3 €	3 €	19 - 23 €	10 - 13 €
Spot 4	6 - 13 €	4 - 5 €	11 - 14 €	2 €	2 €	16 - 20 €	7 - 10 €
Radarsat	6 - 13 €	2 €	-	-	-	8 - 15 €	2 €
Envisat	6 - 13 €	2 €	-	-	-	8 - 15 €	2 €
Basse résolution	6 - 13 €	-	-	-	-	6 - 13 €	-



### Intégration des « géo produits inondation » dans la gestion globale de l'aléa

L'exploitation de la donnée satellite en période de crise est opérationnelle. Pour cette partie du cycle du risque, et à l'heure actuelle tout au moins, des financements nationaux (CNES) et Européens (GMES) de la valeur ajoutée correspondant à la transformation des images brutes en produits d'information cartographiques à destination des gestionnaires de la crise sont en place. Intégrer le coût de la cartographie phénoménologique dans la chaîne de gestion du risque revient à raisonner dans un système où les produits eux aussi sont chaînés : les sorties des traitements initiaux sont les entrées des processus subséquents qui enrichissent la matière initiale. Dans un tel système séquentiel, les coûts pourraient être partagés. Ainsi, « le retour d'expérience » assumerait uniquement la valeur ajoutée correspondant à la transformation de la cartographie évaluée de crise en cartographie validée de constat. Les demandeurs d'études économiques fines des impacts auraient alors la possibilité d'ajouter un complément financier pour l'exploitation approfondie des données acquises afin de bénéficier d'une cartographie détaillée exploitable à la parcelle voire au bâtiment. Sur la base d'un tel raisonnement, et en utilisant des éléments financiers opérationnels pour la part assumée par la « gestion du risque », le coût évalué d'une étude complète sur la base des scénarios de la basse vallée de l'Hérault et de la vallée du Rhône passerait d'une fourchette 16 - 28 € à une fourchette 7-18 € pour les coûts de traitement au km<sup>2</sup> de la donnée spatiale.



Chaînage procédural pour la confection des « géo produit inondation » à partir des images de télédétection événementielles et de référence

Majeures». Dans ce contexte, des cadrages de prix opérationnels existent à l'heure actuelle. L'unité de compte est la scène satellite, le prix est forfaitaire, il comprend une exécution des travaux dans l'extrême urgence : immédiatement à réception de la donnée par le réseau télématique, avec une publication en quelques heures. Le second produit : **l'enveloppe de l'inondation**, est une cartographie de l'enveloppe de la tache d'inondation à une échelle au 1 : 25 000<sup>e</sup>, comme elle est fournie par les méthodes traditionnelles sur la base de travaux de terrain. Le coût indiqué pour la production de cette carte est un surcoût qui s'additionne à la part forfaitaire dépensée pour la cartographie rapide. Le troisième produit correspond à la **cartographie détaillée de l'inondation** 1 : 5 000<sup>e</sup>, telle qu'elle a pu être réalisée dans cette étude. Cette finesse, validation, fiabilisation supplémentaire est appréhendée comme un second coût additionnel optionnel qui permet d'extraire tout le contenu informatif de l'imagerie tant aéroportée que spatiale à très haute résolution.

### Cartographie des autres objets hydrauliques

Le produit **carte des courants** accompagné du **levé des échanges drain - casier** est un inventaire cartographique complémentaire de la carte de la zone inondée, son coût est exprimé comme une charge additionnelle optionnelle. La **carte des casiers hydrauliques et limites structurantes** complète la description des objets hydrauliques. Combinée avec toutes les autres sources d'information issues de la télédétection, du terrain et de la modélisation, elle contribue à l'élaboration et la compréhension de la carte des vecteurs de crue.



## Coûts

Les fourchettes pour l'évaluation des coûts de traitements, que ce soit par une approche purement terrain ou uniquement à partir de l'exploitation de données de télédétection, ressortent dans des ordres de grandeur comparables. Pour le produit standard moyen : l'enveloppe de l'inondation au 1:25 000<sup>e</sup>, la valeur indiquée par le terrain est de 10 € au km<sup>2</sup>. En fonction des plates-formes d'observation, la valeur cumulée des traitements de télédétection pour la réalisation d'un produit similaire varie entre 8 et 25 €. Pour une étude plus complète, avec inventaire cartographique des brèches et débordements, carte des courants, carte des casiers et limites structurantes, synthèse de l'événement, les évaluations avancées sont de 18 € pour les travaux de terrain et l'écart pour les traitements de télédétection s'étend de 16 € à partir de données SPOT 4 jusqu'à 38 € avec les données aéroportées. Pour compléter l'évaluation, les coûts des approvisionnements en données rapportés à la surface utile (lit majeur) chiffrés à partir des deux scénarios varient entre 2 et 188 € au km<sup>2</sup> en fonction du type des plates-formes d'observation utilisées et du nombre de couvertures acquises. Pour la production de l'enveloppe de l'inondation au 1:25 000<sup>e</sup> à partir de la donnée SPOT, les coûts d'achat évalués de la donnée orthorectifiée événementielle et de référence sont compris entre 10 et 18 € ; ils grimpent à 59 € si l'on utilise exclusivement de la donnée Ikonos et culminent à 188 € avec les orthophotos. Dans la mesure où la donnée de référence adéquate s'avérerait disponible (accès à des bases de données publiques partagées), l'enveloppe coût des données baisserait environ d'un tiers. Pour une étude plus complète, l'option d'évaluation choisie ajoute une couverture événementielle haute résolution (panchromatique) aux couvertures précédentes. Le coût cumulé de la donnée est alors compris entre 17 et 30 € pour les capteurs SPOT qui occupent une position médiane en termes de prix dans la gamme des capteurs.



## GESTION DE L'ALÉA INONDATION : LE BÉNÉFICE DES IMAGES

Les services techniques de l'État disposent d'outils et de procédures éprouvées pour caractériser les inondations, la télédétection ouvre des possibilités complémentaires. Est-il concevable, de ne pas utiliser ce potentiel, au minimum pour archiver la mémoire brute des événements catastrophiques de type inondation ?

En dehors de toute problématique d'exploitation de la donnée, une réponse à cette question est déjà donnée par Olivier Braud de la DIREN Languedoc-Roussillon<sup>11</sup> justifiant l'acquisition des données aéroportées sur les événements de 2003 : « L'enjeu est de conserver le plus de traces physiques de la crue ». La nécessité d'une conservation de la mémoire factuelle de l'événement ne peut être exprimée plus clairement ; la conséquence opérationnelle dans ce cas a été la commande d'une campagne de photographies aériennes dont une partie des clichés est utilisée dans cette étude.

Une autre considération sur la nécessité de l'archivage de données factuelles est l'éventualité de leur utilisation dans le cadre de procédures contradictoires, techniques, et/ou administratives et/ou légales sur la caractérisation de l'événement. Poussé à l'extrême, ce raisonnement pose la question de la responsabilité de l'État au regard des moyens dédiés à la mémorisation factuelle des événements catastrophiques.

Sur le plan de la communication et de la culture du risque, l'imagerie événementielle est un élément percutant lorsqu'il s'agit de communiquer la mémoire du risque vers le public et les autorités locales. Ainsi, un discours réglementaire pourra être complété par une illustration factuelle, dont la compréhension est intuitive, et la remise en cause difficile.

Sur un plan plus technique, une remarque d'ensemble s'impose : la multiplicité des points d'application de l'imagerie événementielle. L'utilisation conjointe de l'image phénoménologique est techniquement pertinente, voire nécessaire, pratiquement quel que soit le procédé utilisé pour élaborer de la connaissance sur l'aléa, que ce soit le terrain, la modélisation ou la photo interprétation. La complémentarité avec les autres approches phénoménologiques de l'aléa, en particulier les études de terrain et les modélisations est soulignée ; la télédétection offre des possibilités uniques pour l'observation des crues dans le lit majeur complétant ainsi les observatoires permanents in situ du lit mineur.

Les possibilités d'application de la télédétection à la gestion des inondations concernent toutes les phases du cycle du risque et la valorisation

11 - Olivier Braud, 2004, Inventaire cartographique des zones inondées lors de la crue de décembre 2003 ; « La crue du Rhône de décembre 2003 quels enseignements ? » ; Colloque d'Arles, 3 décembre 2004, publication DIREN Rhône-Alpes et Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse.



maximale des données de télédétection et des produits cartographiques spécifiques élaborés est obtenue lorsque leur exploitation est chaînée. Par voie de conséquence, le coût des données de télédétection, aéroportée ou spatiale, pourrait être budgétisé indépendamment, cet investissement initial étant exploité au bénéfice de toute la chaîne de gestion du risque.

Cette façon de voir est cohérente avec la nécessité d'une démarche budgétaire anticipée pour la mise en œuvre régulière d'acquisition d'images événementielles des inondations. Même dans le cadre d'un système de vigilance efficace, le temps disponible pour programmer des moyens d'observations à distance est réduit (crues éclair) ; l'anticipation budgétaire devient alors la clef de l'anticipation technique.







Direction de la Prévention des pollutions et des risques  
Sous-direction de la Prévention des risques majeurs  
20, avenue de Ségur, 75302 Paris 07 SP  
<http://www.ecologie.gouv.fr> - <http://www.prim.net>



Service Régional du Traitement d'Image et de Télédétection  
Parc d'innovation - Boulevard Sébastien Brant - F67412 Illkirch - <http://sertit.u-strasbg.fr/>