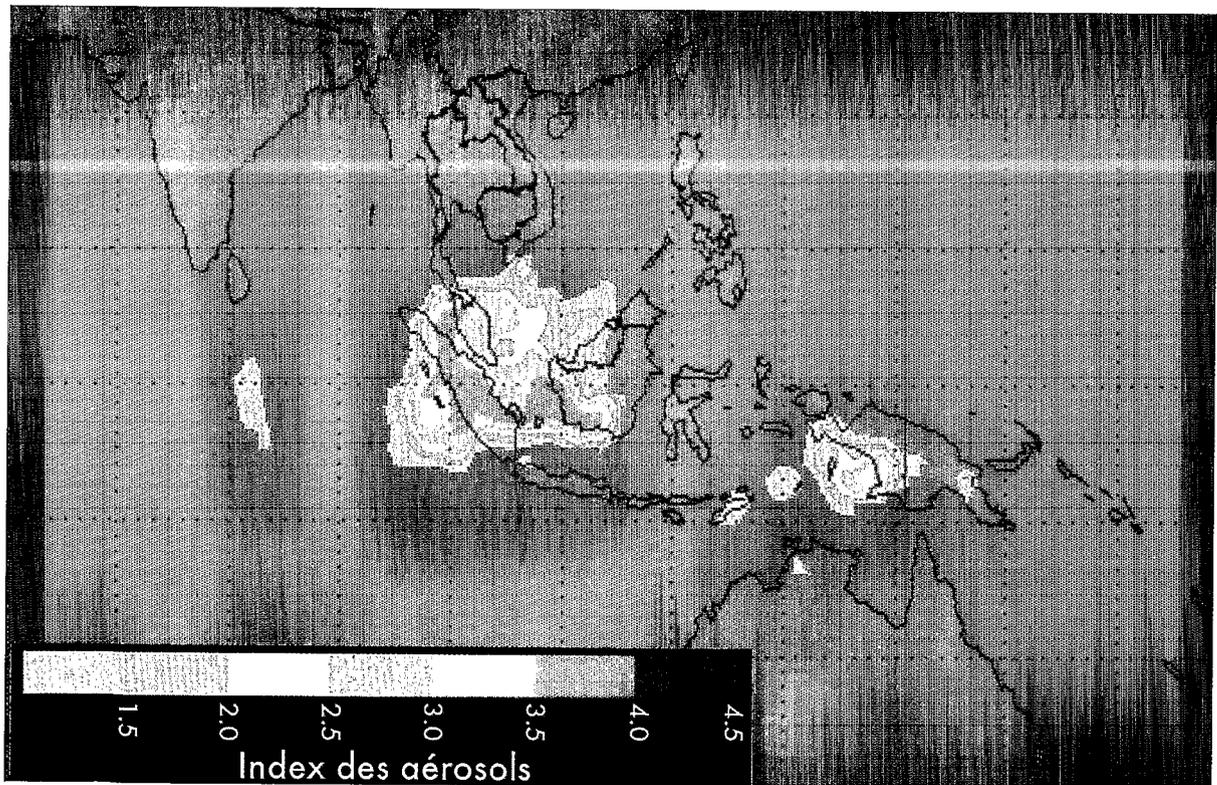


YVES LAUMONIER
CIRAD-Forêt

CHRISTOPHER LEGG
SCOTT CONSEIL

LE SUIVI DES FEUX DE 1997 EN INDONÉSIE

Apports d'Internet et de la télédétection
à une situation d'urgence

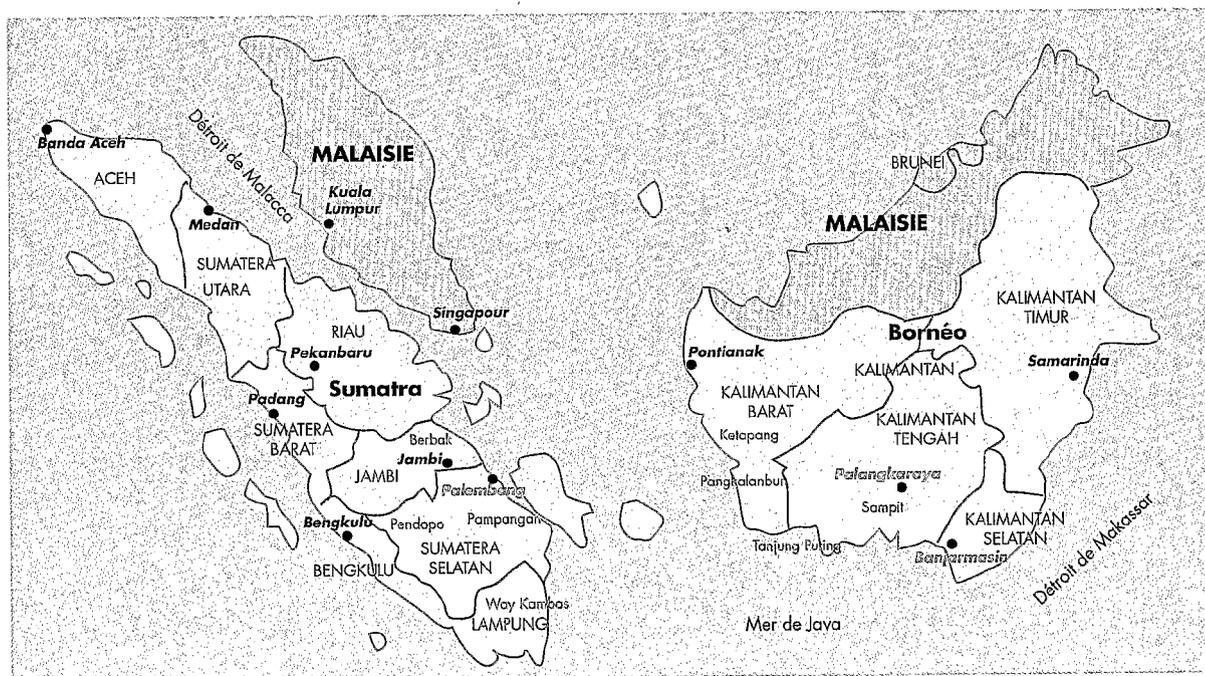


Carte 1. Index de la densité des aérosols de la haute atmosphère généré quotidiennement par le Goddard Space Flight Center (GSFC) de la NASA à partir des données du capteur TOMS (exemple du 26 septembre 1997).
Index of the density of high atmosphere aerosols produced on a daily basis by the GSFC of NASA based on data from the TOMS sensor (26th September 1997 example).

C'est en suivant au jour le jour l'évolution des incendies qui se sont déclarés sur le territoire indonésien, en 1997, que les auteurs de cet article ont pu faire, à la demande de l'Union européenne, une première évaluation sur la nature et l'étendue de ces feux.

Les années 1982-1983 sont tristement célèbres en Indonésie ; en effet, les feux violents qui se sont produits dans l'Est-Kalimantan à cette époque ont détruit 3,5 Mha de forêts secondaires et de forêts exploitées (LENNERTZ, PANZER, 1983 ; LEIGHTON, WIRAWAN, 1986 ; MALINGREAU *et al.*, 1985 ; BERTAULT, 1991). Des incendies ont sévi encore en 1986, 1991 et 1994 et, dès le début du mois de septembre 1997, il ne faisait plus aucun doute qu'une nouvelle sécheresse exceptionnelle, liée au phénomène climatique El Niño, favorisait le développement de nouveaux incendies importants situés pour la plupart dans les îles de Sumatra et de Bornéo (carte 2). Une fumée épaisse s'étendait déjà sur de larges surfaces, atteignant parfois les côtes de la péninsule malaise et Singapour. A la fin du mois de septembre, ces fumées devenues très abondantes dans certaines parties des îles mentionnées atteignaient

alors des densités extrêmement élevées. Bon nombre d'aéroports étaient contraints de fermer, alors qu'un accident aérien au nord de Sumatra et une collision de navires dans le détroit de Malacca étaient *a priori* imputés à ces fumées. Les ambassadeurs des pays membres de l'Union européenne à Djakarta réagissaient alors en formant une cellule d'urgence (European Union Fire Response Group-EUFREG) chargée d'analyser la situation et de conseiller les états-membres quant aux modes possibles d'assistance internationale. C'est ainsi qu'au début du mois d'octobre, les auteurs du présent article ont été mobilisés pour analyser la situation des incendies à l'aide des techniques de télédétection et des Systèmes d'Information Géographique (S.I.G.). Le suivi des feux s'est poursuivi jusqu'à la mi-novembre, après extinction de la majorité d'entre eux.



Carte 2. Carte des régions d'Indonésie les plus touchées par les feux en 1997 (en rouge).
Localities most affected by fire in Indonesia in 1997 (in red).

SOURCES DES DONNÉES

Au début de cette étude, on avait envisagé d'utiliser avant tout les données de sources locales, en particulier celles des stations de réception des satellites NOAA¹ installées à Palembang (Sumatra), Bogor (Java) et Samarinda (Kalimantan), ainsi que les images des catalogues (quick-looks) des satellites SPOT² et Landsat TM³ ; cependant, une exploration rapide du réseau Internet révélait un nombre étonnant de sites consacrés aux feux indonésiens. Globalement ces sites Internet ont fourni un éventail d'informations précieuses sur les feux et les fumées associées, reflétant de manière magistrale l'utilité de ce réseau dans une telle situation d'urgence. De nombreuses données utilisées dans cette étude ont été obtenues sur la base de recherches quotidiennes sur de nombreux sites Internet. Les sources principales des données utilisées sont énumérées dans le tableau 1, p. 8.

PROCÉDURE UTILISÉE

Les données « hot-spots »⁴ dérivées des canaux thermiques des capteurs AVHRR⁵ (satellites NOAA) et ATSR⁶ (ERS-2) sont très souvent utilisées dans la télédétection des feux (LEE, TAG, 1990 ; JUSTICE, DOWTY, 1994 ; MALINGREAU *et al.*, 1996). Un éventail de techniques de traitements automatiques permet de mettre en évidence ces « hot-spots » en temps réel, assurant en théorie un suivi rapide des incendies. Ces techniques de génération des « hot-spots » dépendent de la calibration initiale du canal 3 de l'imagerie AVHRR, à un niveau de température pré-établi, et du seuil fixé. A ces

techniques viennent s'ajouter ultérieurement des méthodes de filtrage des pixels⁷ utilisant les valeurs des autres canaux, ainsi que les caractéristiques des pixels environnants (FLASSE, CECCATO, 1996). Toutes ces techniques d'extraction et de filtrage sont, de plus, fortement dépendantes de la calibration par rapport au type d'utilisation du sol (KENNEDY *et al.*, 1994). Les erreurs sont fréquentes. Certains feux peuvent ne pas être détectés par les techniques automatisées parce qu'ils sont intégralement ou partiellement masqués par les nuages ou la fumée. Une couverture dense de fumées ou de nuages rendra la surface complètement invisible, tandis qu'une couverture mince atténuera le signal, réduisant la valeur des pixels au-dessous de la valeur-seuil dans le canal 3. Inversement, d'autres « hot-spots » peuvent également être enregistrés de façon erronée, en raison par exemple de hautes températures du sol dans les régions de végétation éparse, ou encore à cause de la réflexion du soleil sur l'eau ou sur les nuages. Enfin, les trois stations de réception NOAA locales, sources principales des données « hot-spots » dérivées d'AVHRR, employaient des algorithmes différents pour l'extraction. La station EU-FFPCP⁸ Palembang employait un seuil de 320 K, avec parfois l'utilisation du filtrage contextuel. Celle du JICA⁹ à Bogor employait trois niveaux de seuil, 310, 315 et 320 K, avec filtrage contextuel constant. La station GTZ¹⁰ de Samarinda à Kalimantan, quant à elle, utilisait le seuil de 310 K, mais aussi les niveaux d'albedo des canaux 1 et 2, ainsi que les températures dans les canaux 3 et 4. Ces derniers paramètres devraient permettre des filtrages plus précis à condition que les constantes de l'environnement local soient connues. L'algorithme employé pour l'extraction des « hot-spots », à partir des valeurs du capteur ATSR par Earth

Watching, n'est pas connu des auteurs mais il est probablement basé aussi sur un seuillage de 3,7 microns.

Un produit totalement différent des images traitées par le satellite américain DMSP¹¹ était rendu disponible sur Internet au cours du mois d'octobre. Le capteur utilisé à bord de ce satellite observe la surface de la terre durant la nuit dans les longueurs d'onde du visible (0,5-0,6 μ) et détecte les émissions de lumière des feux plutôt que leur chaleur. Des images de référence sont utilisées pour filtrer les sources de lumière associées aux villes et autres artéfacts tels que les plates-formes pétrolières. Les localisations des feux sur ces images concordait bien avec les feux observés dans le canal thermique de AVHRR-NOAA.

L'utilisation des données obtenues, lors du passage de nuit du satellite, permet d'éliminer le problème des « hot-spots » surnuméraires observés sur certaines images AVHRR-NOAA. Le nombre de « hot-spots » détectés pendant la nuit est toujours beaucoup plus faible que pendant le jour. Le fait tient en partie à l'élimination des principales causes d'erreur associées aux techniques de détection automatique des « hot-spots », mais peut résulter aussi tout simplement de la nature diurne de nombreux feux de courte durée. Des feux destinés à brûler délibérément des friches agricoles seront allumés durant le jour et pourront s'éteindre d'eux-mêmes avant le passage du satellite, la nuit. Enfin il ne faut pas oublier non plus que, durant certaines parties de l'année, la couverture nuageuse peut être plus envahissante la nuit, obscurcissant alors un grand nombre de feux.

Les feux peuvent également être interprétés visuellement sur écran par l'examen d'images convenablement améliorées. Une combinaison des canaux 1, 2 et 3 de AVHRR (bleu, vert et rouge) avec le canal 3 à un seuil

¹ Les chiffres mis en exposant dans cet article renvoient à l'encadré p. 13.

TABLEAU I
SOURCES DES DONNÉES UTILISÉES POUR L'ÉTUDE DES FEUX DE 1997 EN INDONÉSIE

Type de données	Région couverte	Source	Accès	Dates
Images NOAA-AVHRR, toutes bandes	Sumatra	EU-Forest Fire Prevention & Control Project	Palembang, Jazz disque via courrier	Quotidiennes pour septembre et octobre
Images NOAA-AVHRR, canal 3 Images NOAA AVHRR et « hot-spots »	Sumatra et Kalimantan Irian Jaya	NOAA, USA DOLA, Perth, Australie	Internet Internet	Octobre et novembre Quotidiennes, août, septembre et octobre
Images NOAA GAC et « hot-spots »	Kalimantan et Sumatra	Bureau Météorologique de Singapour	Internet	Quotidiennes de mi-septembre à mi-novembre
NOAA « hot-spots »	Sumatra	EU-FPCP Palembang, Sumatra	E-mail	Quotidiennes pour septembre, octobre
NOAA « hot-spots »	Sumatra et Kalimantan	JICA/PHPA, Bogor, Java	Courrier	Quotidiennes pour août et septembre
NOAA « hot-spots »	Kalimantan et Ouest Sulawesi	GTZ, Samarinda, Kalimantan	E-mail	Quotidiennes pour tout septembre
ERS-2 ATSR « Hot-spots » et images	Kalimantan et Sumatra	ESA/ESRIN Earth-Watch	Internet	Octobre et novembre
Images DMSP traitées	Kalimantan et Sumatra	NOAA DMSO site	Internet	Octobre et novembre
TOMS aérosols	SE Asie	NASA GSFC site	Internet	Quotidiennes du 3 septembre au 16 novembre
Cartes interprétées de feux	Parties de Kalimantan et Sumatra	US Forest Service, Washington DC	Internet	Régulièrement mise à jour de début octobre à début novembre
Images numériques quicklook SPOT	Parties de Kalimantan, Sumatra et Sulawesi	CRISP Université nationale de Singapour	Internet	Essentiellement mi-septembre à mi-octobre
Images numériques quicklook Landsat TM	Irian Jaya	Half, Alice Spring, Australie	Internet	Septembre et octobre
Images analogues quicklook Landsat TM	Parties de Kalimantan et Sumatra	IAPAN, Jakarta, Indonésie	Courrier	Août et septembre

d'environ 310 K permet de mettre en évidence à la fois les « hot-spots » et les panaches de fumées sur la même image (CHUNG, LE, 1984). Si un feu est alors défini par

la présence de hot-spot combinée à une émission visible de fumées, beaucoup de « hot-spots » douteux peuvent encore être éliminés. Avec un peu de pratique, les positions des

feux couvrant par exemple tout le sud de Sumatra sont interprétées en moins d'une heure. Grâce à cette technique, on peut aussi identifier des feux partiellement obscurcis par

la fumée, ce que ne permettent pas les techniques automatisées.

Après quelques essais initiaux, on décide d'utiliser essentiellement les données AVHRR de nuit des mois d'août et septembre. Les stations de la JICA à Bogor et de la GTZ à Samarinda archivaient régulièrement de telles données, contrairement à la station du projet européen de Palembang. Pour les mois d'octobre et de décembre 1997, ce sont les données hot-spots de nuit du capteur ATSR disponibles sur Internet qui ont été utilisées, étant d'un accès quotidien plus rapide que celles provenant des stations de réception locales NOAA. Comme indiquées ci-dessus, ces données de nuit ne permettaient pas de détecter les feux de courte durée, mais ne laissaient aucune équivoque sur le fait que la plus grande partie de la fumée était générée par des feux de longue durée, essentiellement dans les zones de tourbières ; en effet, les feux de ce type sont facilement détectés sur les images de nuit. Comme validation finale des procédures d'automatisation de génération de « hot-spots », les positions des feux ont été également interprétées manuellement à partir d'images AVHRR pour les provinces de Jambi, Sumatra Selatan et Lampung, et ce pour chaque jour de septembre. Seuls les pixels ou groupements de tout au plus quatre pixels anormalement chauds dans le canal 3 de AVHRR, auxquels étaient associées des panaches de fumées, étaient alors interprétés comme des feux individuels. On enregistre un total de 4 450 feux durant le mois de septembre 1997. Le nombre de feux interprétés de cette manière était toujours considérablement inférieur (souvent de 20 %) au nombre généré de façon automatique par l'ordinateur. Beaucoup de feux interprétés pour la province de Jambi n'étaient cependant pas détectés en tant que « hot-spots » à cause de l'atténuation du signal par la fumée. Afin d'indiquer la persistance des

feux et souligner les plus grandes concentrations, les localisations des foyers étaient ensuite regroupées par unités de 6 km², approche qui avait l'avantage de pouvoir se situer plus précisément au sein de la marge d'erreur possible de localisation, due à la correction géométrique grossière de l'imagerie satellitaire. Chaque unité était alors classée en fonction du nombre de jours de feux observés.

LES FEUX DE 1997 DANS LE TEMPS ET L'ESPACE

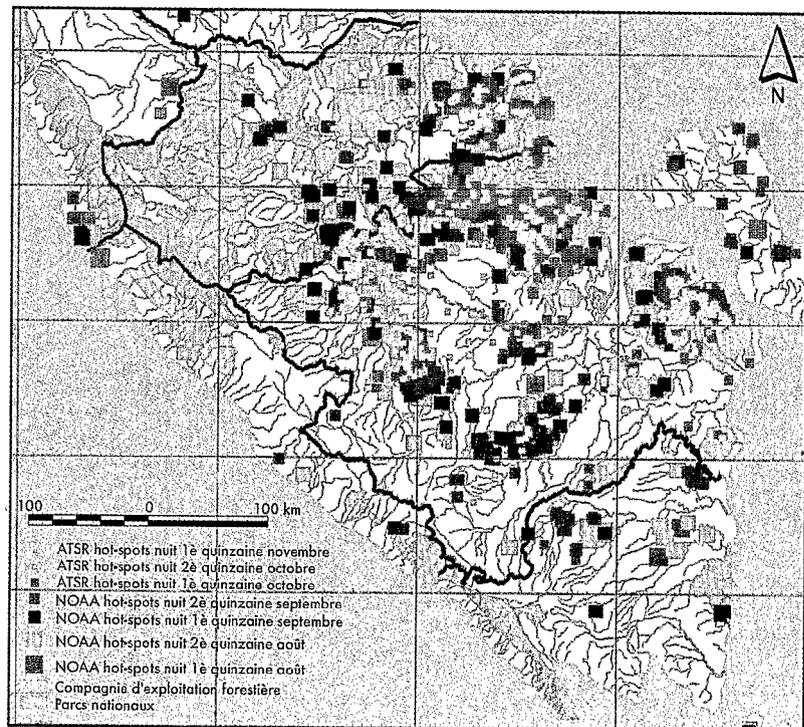
SUMATRA

Les premiers feux importants de l'épisode 1997 sont apparus pendant la deuxième semaine d'août :

- Au centre de la province de Sumatra-Sud (carte 3), au sein et à la périphérie des plantations forestières de Pendopo.
- Au nord-ouest de Palembang, à la frontière entre cette province et celle de Jambi au nord.
- Dans le centre de la province de Jambi elle-même.
- Dans le parc national de Berbak (côte est).

Pendant la troisième semaine d'août, le nombre de feux augmenta, et des concentrations supplémentaires sont apparues :

- Dans les régions de Pampangan au sud-est de Palembang ; à l'ouest de la ville et au nord de la ville.
- Dans le sud de la province, au sud du Lampung.



Carte 3. Suivi dans le temps de l'évolution des « hot-spots » de nuit entre août et novembre 1997 dans la partie méridionale de Sumatra.
Monitoring, in the period of evolution, of nocturnal « hot-spots » between August and November 1997 in southern Sumatra.

- A nouveau dans la zone côtière de l'Est-Jambi, en dehors cette fois du parc national de Berbak.

Fin août, d'autres feux se déclarèrent au nord-ouest de la province de Sumatra-Sud. Les feux ont perduré dans toutes ces zones jusqu'en septembre, les plus persistants couvrant quatre régions :

- La région de Pampangan à l'est.
- La région située entre Palembang et la limite provinciale de Jambi.
- La zone de Pendopo au centre-ouest.
- La zone de l'Est-Jambi à proximité du parc national.

Les feux de la région de Pendopo étaient essentiellement des feux de forêts et de brousses secondaires autour des plantations industrielles, mais les trois autres concentrations de feux étaient toutes situées dans des zones de forêts dégradées sur tourbe, en périphérie ou au sein des concessions. Les feux ont atteint leur paroxysme dans la dernière semaine de septembre, ceux de Pendopo

ayant pratiquement cessé après cette date. Les feux de Pampangan, du nord de Palembang et de l'Est-Jambi ont continué pendant tout le mois d'octobre, en même temps que d'autres feux plus diffus au centre-sud et nord-ouest de Sumatra-Sud, à Berbak (Jambi) et à Way Kambas (Lampung). Le nombre de feux diminuait légèrement fin octobre, et les incendies cessèrent vers le 9 novembre.

KALIMANTAN

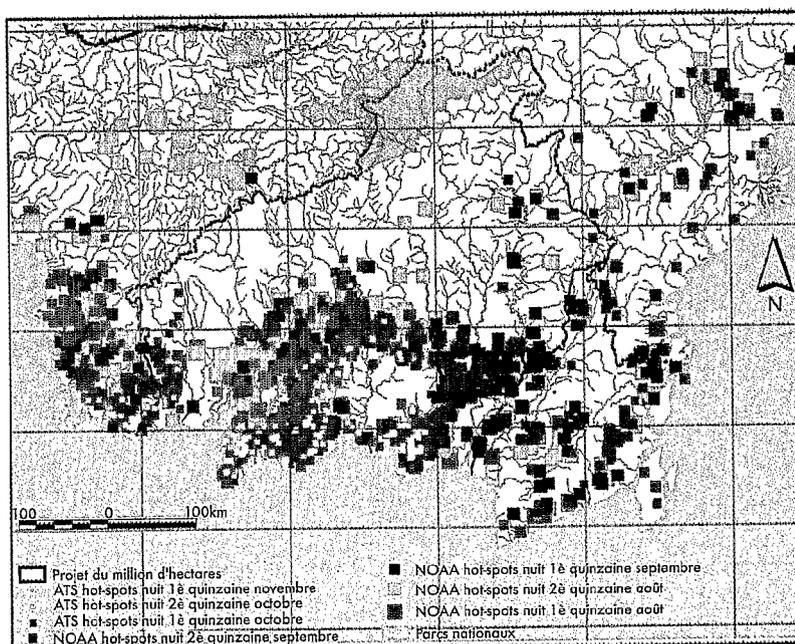
Quelques feux épars sont apparus dans la deuxième semaine d'août, essentiellement à Kalimantan Centre (carte 4), au nord-est de Pangkalanbun et à l'est de Palangkaraya. Le nombre de feux s'accrut de façon conséquente durant la troisième semaine d'août. Les concentrations principales étaient établies :

- A l'est de Ketapang dans la province de l'Ouest-Kalimantan.
- Près de Sampit sur la côte sud.

- Sur le futur site de transmigration du « million d'hectares » à l'est de Palangkaraya.

- Dans la région de l'ouest de Palangkaraya vers Pangkalanbun.

Une nouvelle concentration de foyers apparut au sud-est de Ketapang dans la quatrième semaine d'août, puis au sud-ouest de Sampit dans la deuxième semaine de septembre, enfin au sud-ouest de Kalimantan-Centre et sur la côte sud entre Sampit et Banjarmasin dans la quatrième semaine de septembre. Des feux sporadiques apparus dans le parc national de Tanjung Puting au Centre Kalimantan, dès la mi-septembre, atteignirent leur apogée à la mi-octobre. Les feux de la région sud-est de Ketapang cessèrent fin septembre, mais ceux du « million d'hectares », ceux du nord et de l'est de Sampit, et ceux du nord-ouest de Palangkaraya continuèrent pendant tout le mois d'octobre. Comme à Sumatra, tous les feux cessèrent brutalement à la fin de la première semaine de novembre 1997.



Carte 4. Suivi dans le temps de l'évolution des « hot-spots » de nuit entre août et novembre 1997 dans la partie méridionale de Bornéo.
Monitoring in the period of evolution of nocturnal « hot-spots » between August and November 1997 in southern Borneo.

SULAWESI

Les données « hot-spot » AVHRR-NOAA de nuit n'étaient disponibles que pour le centre-ouest de Sulawesi et, dans cette zone, il n'y eut pas de feux de longue durée. La plupart des « hot-spots » étudiés sur les images « quicklook » de SPOT correspondaient à des petits feux associés à des zones habitées (petits agriculteurs). Bien que les données disponibles ne soient pas exhaustives pour cette île, il faisait peu de doute que les dommages causés par les feux à Sulawesi étaient mineurs en comparaison de Kalimantan et Sumatra.

IRIAN JAYA

Irian Jaya est en dehors de la zone de réception de toutes les stations NOAA employées pour cette étude, y compris la station de Singapour pour les images SPOT. Les seules données disponibles étaient des quicklooks Landsat numériques de la station australienne d'Alice Spring, des quicklooks NOAA de la DOLA¹² à Perth et des images TOMS¹³ traitées par le Goddard Space Flight Centre de la NASA¹⁴. Les quicklooks Landsat obtenus couvraient environ 60 % de l'île pour des dates s'étendant de fin août à mi-octobre, et les données NOAA téléchargées correspondaient à la période du 1^{er} septembre au 21 octobre 1997. Des feux extensifs étaient observés dans les savanes le long de la côte sud-ouest. Ceux-ci variaient en intensité, connaissant une apogée à la mi-septembre, un déclin à la fin du mois et une reprise à la fin de la première semaine d'octobre. Des feux ont aussi été clairement identifiés dans la région du parc national du Lorenz au centre d'Irian Jaya dès le début de septembre, avec une activité renouvelée début novembre. Dans ce cas, il s'agissait de véritables feux de forêts primaires, la forêt de montagne en période de sécheresse brûlant très facilement. D'autres feux sporadiques furent observés dans les montagnes centrales, particulièrement entre le 6 et le 12 septembre, et des feux moins importants, le long de la côte nord, entre le 18 et 20 septembre. Le passage saisonnier du feu est fréquent dans les régions de savanes herbacées du sud-ouest Irian Jaya, au nord et à l'ouest de Merauke, où de grandes zones de transmigration ont été développées. Les feux de cette année étaient certainement plus importants et ont occasionné de grands volumes de fumées ; la plupart d'entre elles se sont dissipées sur la mer à l'ouest et au sud.

DISTRIBUTION DES FUMÉES

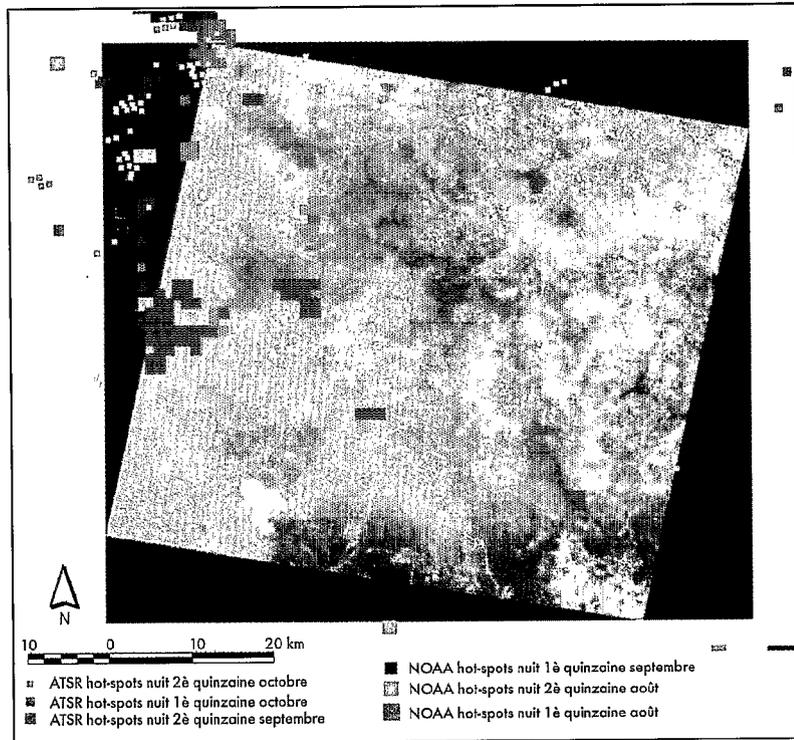
Le capteur TOMS à bord des satellites NOAA fournit des données sur la distribution et la densité des aérosols de l'atmosphère. Les données peuvent être utilisées pour estimer les fumées provenant de feux de végétation (HSU *et al.*, 1996). Le GSFC aux USA traite quotidiennement ces données TOMS et les restitue sous forme d'images indiquant la répartition des aérosols de la haute atmosphère et par conséquent des fumées sous-jacentes (carte 1, p. 5). Nous avons téléchargé quotidiennement ces images du 3 septembre jusqu'à la mi-novembre. Les fumées s'étendaient sur Sumatra et Kalimantan au début de septembre, et se sont développées en superficie et densité jusqu'à la dernière semaine de ce même mois. Les émissions de fumées dans ces deux régions baissaient au début du mois d'octobre, avec des pics d'activité renouvelés pendant la troisième semaine d'octobre et la première semaine de novembre avant de disparaître vers le 11 novembre. On observe un délai de trois ou quatre jours entre la disparition des « hot-spots » et l'élimination des fumées. En Irian Jaya, les fumées ont commencé seulement au début de septembre, avec des pics d'activité dans les seconde et qua-

trième semaines de septembre, la troisième semaine d'octobre et les première et deuxième semaines de novembre.

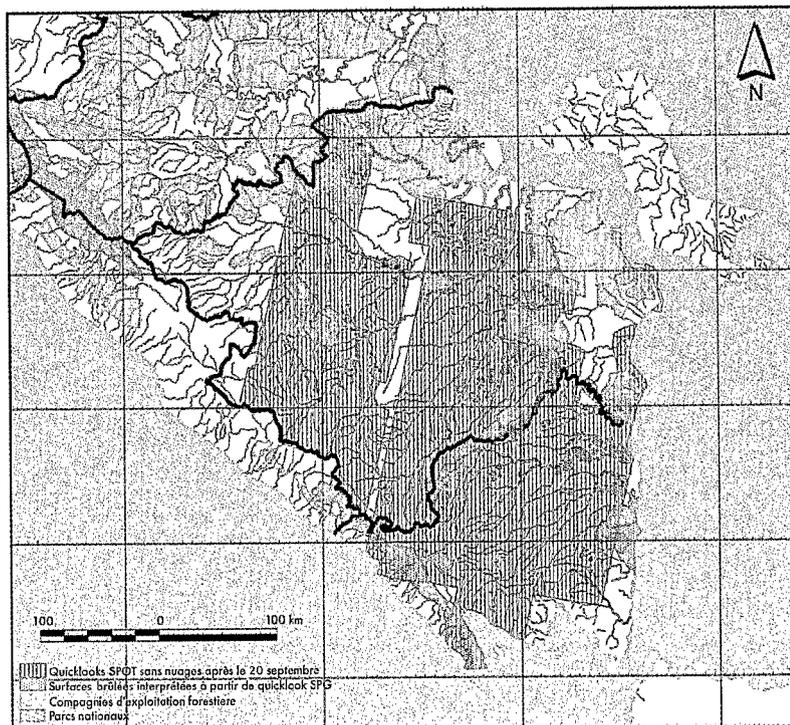
La séquence d'images TOMS montre qu'un changement significatif de la direction moyenne des vents orientés sud-est à est fin septembre a considérablement réduit le volume total des fumées sur Singapour et la Malaisie. Bien que les feux aient continué à Sumatra, Kalimantan et Irian Jaya jusqu'au début de novembre, les vents d'est restringaient alors la pollution de l'air à l'Indonésie. La pollution dans certaines régions de Kalimantan et Sumatra a du reste été extrêmement forte durant cette période, alors que le gouvernement refusait l'aide médicale internationale. La pollution atmosphérique résultant des feux d'Irian Jaya a été par contre peu remarquée par la communauté internationale, la plupart des fumées se dissipant sur la mer avant d'atteindre les grandes agglomérations.

TYPES DE VÉGÉTATION ET SUPERFICIES BRÛLÉES

Des « quicklooks » SPOT téléchargés au Centre de Télédétection et de Traitement d'images (CRISP) de l'université nationale de Singapour ont été utilisés pour une estimation rapide des superficies brûlées. Ces « quicklooks » sont des images du satellite SPOT dont l'information est dégradée à une résolution effective de 120 m (carte 5, p. 12). Les coordonnées de ces images sont également fournies sur le site Internet, permettant un géo-référencement rapide. 150 images « quicklooks » SPOT XS acquises durant septembre



Carte 5. Image quicklook SPOT du 27 septembre au sud de Sumatra. Superposition des données « hot-spots » de nuit avec les aires brûlées qui apparaissent en vert foncé.
Quicklook SPOT image of 27 September of southern Sumatra. Overlay of nocturnal « hot-spots » data with burnt areas which are shown in dark green.



Carte 6. Etendues des aires brûlées pendant le mois de septembre 1997 dans le sud de Sumatra et Lampung, interprétées à l'aide d'images quicklook SPOT.
Extent of burnt areas during the month of September 1997 in southern Sumatra and Lampung, interpreted with the help of quicklook SPOT images.

et octobre ont été téléchargées et géoréférencées. Elles couvraient essentiellement le sud de Sumatra, surtout les provinces de Sumatra-Sud et Lampung, mais également certaines parties de Kalimantan et Sulawesi.

Ces images géo-référencées étaient ensuite améliorées de façon à mettre en valeur les zones les plus sombres, sensées représenter les surfaces brûlées. Pendant la saison humide, de grandes zones de réflectance basse peuvent indiquer certains types marécageux, mais la saison sèche particulièrement sévère de cette année laissait planer peu de doute quant à la présence d'eau dans la partie méridionale de Sumatra. L'interprétation de ces surfaces brûlées était également vali-

dée par la superposition simultanée des localisations des hot-spots obtenues pour les dates précédant l'acquisition de ces images SPOT. Seules les superficies les plus sombres correspondant également aux données hot-spots d'août et de septembre étaient ainsi acceptées comme surfaces brûlées. Le périmètre de ces zones était finalement digitalisé directement sur l'écran de l'ordinateur, et les fichiers vecteur exportés dans un Système d'Information Géographique (S.I.G.).

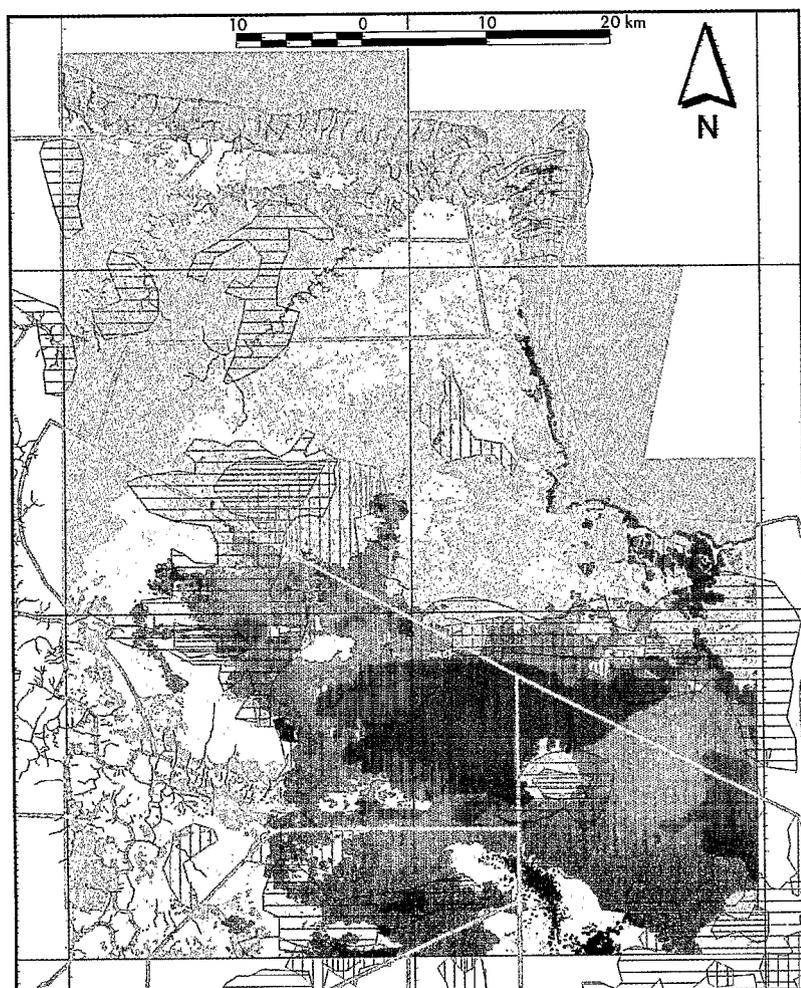
Pour Sumatra, les images « quicklook » SPOT acquises entre le 17 septembre et le 11 octobre couvraient environ 70 % des provinces de Sumatra Selatan et Lampung. La superficie totale des 590 aires brûlées dans les zones non couvertes

de nuages est de 690 000 hectares (carte 6). Extrapolée à l'ensemble des provinces du Sud-Sumatra et de Lampung, la superficie totale brûlée est estimée à environ un million d'hectares pour ces deux provinces seules. Comme la densité moyenne de « hot-spots » dans la région couverte par les quicklooks SPOT est du même ordre de grandeur que la densité des hot-spots dans le reste des deux provinces, cette extrapolation paraît justifiée.

Pour comprendre la nature de ce qui a réellement brûlé, il est nécessaire d'obtenir des informations sur la végétation existante avant le passage du feu, par exemple à partir d'images haute résolution récentes (Landsat TM ou SPOT) et de les combiner avec les données concernant

DÉVELOPPEMENT DES SIGLES UTILISÉS DANS L'ARTICLE

1. NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration.
2. SPOT, Système Probatoire d'Observation de la Terre, résolution de 20 x 20 m en mode multispectral (3 canaux).
3. LANDSAT TM, Thematic Mapper, résolution de 30 x 30 m, mode multispectral (7 canaux).
4. « Hot-spot », « point chaud » estimé à partir des données de température de surface mesurées à l'aide des instruments AVHRR des satellites NOAA ou ATSR des satellites ERS.
5. AVHRR, Advance Very High Resolution Radiometer, radiomètre à bord des satellites NOAA donnant, entre autres, des informations sur les températures de surface.
6. ATSR, Along Track Scanning Radiometer : son radiomètre IRR (InfraRed Radiometer), plus précis que AVHRR, mesure également des températures de surface.
7. Pixel, « picture element », la plus petite unité de surface identifiée par l'instrument (exemple SPOT quicklook, 120 x 120 m).
8. EU-FFCP, European Union Forest Fire Prevention and Control Project, basé à Palembang, Sumatra.
9. JICA, Japan International Cooperation Agency.
10. GTZ, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Agence allemande de Coopération Technique.
11. DMSP, Defense Meteorological Satellite Program.
12. DOLA, Department of Land Administration, Perth, Australia.
13. TOMS, Total Ozone Mapping Spectrometer.
14. NASA, National Aeronautics and Space Administration.
15. TCHK, Tata Guna Hutan Kesepakatan, consensus national sur l'allocation et l'utilisation des terres.



- [Pattern] Feux de longue durée octobre (ATSR)
- [Pattern] Nombreux petits feux octobre (ATSR)
- [Pattern] Feux de longue durée septembre (AVHRR)
- [Pattern] Nombreux petits feux septembre (AVHRR)
- [Pattern] Compagnies forestières
- Utilisation du sol :
- [Pattern] Forêt dense sur tourbe
- [Pattern] Forêt dense exploitée sur tourbe
- [Pattern] Forêt dégradée
- [Pattern] Forêt très dégradée
- [Pattern] Recrû forestier
- [Pattern] Savane herbacée

- [Pattern] Savane arborée
- [Pattern] Savane buissonnante
- [Pattern] Forêt marécageuse
- [Pattern] Mangrove
- [Pattern] Mangrove - nipah
- [Pattern] Mangrove buissonnante
- [Pattern] Savane buissonnante côtière
- [Pattern] Savane herbacée marécageuse
- [Pattern] Transmigration
- [Pattern] Village
- [Pattern] Sable
- [Pattern] Eau

le statut officiel des terres, appelé TGHK¹⁵ en Indonésie. Une image Landsat TM de 1996 était disponible pour la zone étudiée, couvrant environ 30 % de la superficie des surfaces brûlées interprétées sur les quicklooks SPOT. Une indication des proportions des différents types d'occupation du sol brûlé en 1997 est donnée dans le tableau II et sur la carte 7. De façon générale, plus de 65 % des surfaces brûlées correspondaient à des terres agricoles sur terrain bien drainé (végétation secondaire, plantations, agriculture), environ 30 % étaient situées dans les zones de tourbières (forêts marécageuses secondaires et secondarisées), et moins de 10 % correspondaient à des incendies de forêts drainées, dont seulement 3 % de forêts primaires. Les feux ont en effet peu touché la forêt primaire des sols drainés. Lorsque le feu y a

Carte 7. Localisation des feux de septembre à octobre 1997, superposée aux types d'utilisation des sols interprétés et classés à partir d'une image Landsat TM de 1996 dans les zones marécageuses de l'est de la province du sud de Sumatra (région de Papangan).
Location of fires in September and October 1997 overlaid on land-use types interpreted and classified based on a 1996 Landsat TM image in the eastern marshlands of the province of South Sumatra (Papangan region).

TABLE II
SURFACES (%) DE CLASSES DE VÉGÉTATION BRÛLÉES
DANS LA PROVINCE DE SUMATRA-SUD

Forêts primaires dégradées	Forêts exploitées de marécages	Végétation secondaire buissonnante	Végétation buissonnante de marécages	Savanes herbacées	Plantations	Agriculture
3	31	25	7	16	6	12

pénétré, il a généralement endommagé le sous-bois, plus rarement la canopée.

Sur l'ensemble de Sumatra et Kalimantan, il est apparu enfin que les acteurs principaux des feux étaient avant tout les grandes compagnies de plantations industrielles. Dès la fin septembre, 176 d'entre elles étaient officiellement dénoncées dans la presse (Magazine D & R, 27 septembre 1997).

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Cette étude a montré comment des données en temps réel, en provenance d'une large gamme de satellites opérationnels, pouvaient être utilisées pour le suivi de feux importants, tels que ceux survenus en 1997 en Indonésie. L'intégration au sein d'un Système d'Information Géographique des données « hot-spots » avec d'autres données permet de mettre en évidence rapidement les feux qui ont le plus d'impact sur l'environnement. Les images « quicklooks » numériques, surtout celles correspondant aux images SPOT multispectrales, se sont avérées très utiles pour l'évaluation rapide des aires brûlées. Dans une

région où le flux d'informations est souvent limité et lent, la présente étude a aussi démontré la valeur d'Internet dans la dissémination rapide d'informations relatives à un désastre écologique majeur et international.

Cette étude doit être approfondie, mais on peut d'ores et déjà estimer que la surface totale concernée par les feux entre août et novembre 1997 en Indonésie excède les trois millions hectares. La plupart des feux observés par satellite étaient essentiellement associés aux pratiques agricoles et aux opérations de conversion pour les plantations industrielles, avec moins de 20 % de forêts touchées, dont très peu de forêts primaires. La plupart des fumées, probablement plus de 90 %, provenaient de feux de longue durée qui avaient pris dans la végétation secondaire et les forêts dégradées sur tourbe. Les foyers principaux concernaient la partie méridionale de Sumatra et de Kalimantan, bien que des feux sérieux aient été repérés également en Irian Jaya.

Des précisions supplémentaires doivent maintenant être apportées sur les types de végétation brûlés et les activités humaines correspondantes. Il faudrait notamment poursuivre et approfondir cette étude dans certaines régions sensibles de Sumatra et Kalimantan, en carto-

graphiant les surfaces brûlées à l'aide d'imagerie satellitaire haute résolution et en évaluant les types d'occupation des sols avant août 1997. Il est prévu d'effectuer aussi des tests supplémentaires sur l'emploi des images NOAA-AVHRR elles-mêmes pour évaluer les aires brûlées à une échelle régionale, validées à l'aide d'études plus fines menées sur certaines zones ; il faudrait aussi améliorer la communication entre les diverses stations NOAA-AVHRR en Indonésie ainsi que les méthodes d'extraction des « hot-spots » standardisées. Enfin, une station NOAA supplémentaire dans la partie orientale de l'Indonésie devrait remédier au manque actuel d'informations sur cette zone. □

Remerciements : Nous tenons à remercier le personnel des stations de réception NOAA de la JICA à Bogor (M. Ueda), celui du Projet européen « Forest Fire Prevention and Control » à Palembang (M. Anderson) et de la GTZ à Samarinda.

► Yves LAUMONIER
Christopher LEGG
EU-Forest Inventory
and Monitoring
Project (FIMP)

INTAG Ministry of Forestry
Mangala Wanabakti Block 4, floor 5th
PO Box 7612
DJAKARTA 10076 Indonésie

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BERTAULT J.-G., 1991.
Quand la forêt tropicale s'enflamme. Bois et Forêt des Tropiques 230 : 5-14.
- CHUNG Y. S., LE H. V., 1984.
Detection of the forest fire smoke plumes by satellite imagery. Atmospheric Environment 18 : 2143-2151.
- FLASSE S. P., CECCATO P., 1996.
A contextual algorithm for AVHRR fire detection. Int. J. Remote Sensing 17 : 419-424.
- HSU N. C., HERMAN J. R., BHARTHIA P. K., SEFTOR C. J., *et al.*, 1966.
Detection of biomass burning smoke from TOMS measurements. Geophys. Res. Lett. 23 : 745-648.
- JUSTICE C., DOWTY P. (éd.), 1994.
IGBP-DIS satellite fire detection algorithm. Workshop technical report, IGBP-DIS working paper n° 9, 88 p.
- KENNEDY P. J., BELWARD A. S., GRÉGOIRE J. M., 1994.
An improved approach to fire monitoring in West Africa using AVHRR data. Int. J. Remote Sensing, vol. 15, n° 11, p. 2235-2255.
- LEE T. F., TAG P. M., 1990.
Improved detection of hot-spots using the AVHRR 3.7 micron channel. Bull. Amer. Meteorolog. Soc., vol. 71, N° 12, p. 1722-1730.
- LEIGHTON M., WIRAWAN N., 1986.
Catastrophic drought and fire in Borneo tropical rainforest associated with the 1982-1983 El Niño Southern Oscillation event. *In* : Tropical rain forests and the world atmosphere, AAAS Symposium 101, Westbury Press, Boulder, USA.
- LENNERTZ R., PANZERK. F., 1983.
Preliminary assessment of the drought and forest fire damage in Kalimantan Timur (Unpubl.), Report to the Transmigration Areas Development Project (TAD), German Agency for International Cooperation (GTZ).
- MALINGREAU J. P., STEPHENS G., FELLOWS L., 1985.
Remote sensing of forest fires : Kalimantan and North Borneo in 1982-83. Ambio, vol. 14, n° 6, p. 314-321.
- MALINGREAU J. P., JONES S. H., DWYER E., PINNOCK S., 1996.
Regional vegetation fire patterns in South and South-East Asia. A satellite based assessment. Conference on Transboundary Pollution and the Sustainability of Tropical Forests. Asean Institute of Forest Management. Bull. Amer. Meteorolog. Soc., vol. 71, n° 12, p. 1722-1730.

DONNÉES INFORMATIQUES

- Australian Center for Remote Sensing. Digital catalogue, online Internet, URL : <http://acs.auslig.gov.au/intro.html/>
- Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing. The University of Singapore, online Internet, URL : <http://www.crisp.nus.sg/>
- DULL C. W., 1997.
Indonesian Fire Maps, online Internet, URL : <http://www.fs.fed.us/eng/indofire/>
- Earth Watching. Eurimage-ESA/ESRIN, online Internet, URL : <http://earth1.esrin.esa.it/ew/>
- Meteorological Service Singapore, Monitoring of widespread smoke haze and forest fires in the region, online Internet, URL : <http://www.gov.sg/metsin/hazed.html>
- National Geophysical Data Center Online Services (NOAA Defense Meteorological Satellite Program, DMSP), online Internet, URL : <http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/dmsp/dmsp.html/>
- Satellite Remote Sensing Services, DOLA, online Internet, URL : <http://www.rss.dola.wa.gov.au/>
- The Satellite Active Archive, SAA-NOAA, online Internet, URL : <http://www.saa.noaa.gov/data-available.html>
- The TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) home page, online Internet, URL : <http://jwocky.gsfc.nasa.gov/>

R É S U M É

LE SUIVI DES FEUX DE 1997 EN INDONÉSIE
Apports d'Internet et de la télédétection à une situation d'urgence

L'Indonésie a connu en 1997 une nouvelle période de sécheresse qui a donné lieu à des feux particulièrement importants. L'étendue et la nature, la répartition et l'évolution de ces incendies ont été suivis grâce à des imageries satellitaires et produits dérivés, mais également sur le réseau Internet.

La répartition des feux dans l'espace et leur évolution dans le temps ont été analysées en utilisant essentiellement les données « hot-spots » dérivées des données thermiques fournies par les capteurs AVHRR des satellites NOAA et ATSR du satellite ERS-2.

Il ressort de cette étude que la majeure partie de la végétation brûlée n'est pas constituée de forêts, mais de végétation buissonnante secondaire, de savanes herbacées et de terres agricoles. Les foyers les plus persistants et l'épaisse fumée qui a recouvert une bonne partie de l'Indonésie et des pays voisins, pendant plusieurs mois, sont dus à des feux situés à la lisière des forêts marécageuses exploitées sur tourbes. Peu d'incendies se sont déclarés en forêt primaire, à l'exception de ceux qui provenaient de la conversion des terres forestières en zones agricoles et plantations industrielles.

Mots-clés : Incendie. Télédétection. Internet. Végétation. Indonésie.

A B S T R A C T

MONITORING THE 1997 FIRES IN INDONESIA
Contributions made by the Internet and remote sensing to an emergency situation

Indonesia underwent a new period of drought in 1997, which gave rise to particularly widespread fires. The extent, nature, distribution and development of these fires were all monitored by satellite pictures and derivative products, as well as on the Internet web.

The distribution of the fires in space and their development in time were analysed essentially by using hot-spot data deriving from the thermal data supplied by the AVHRR sensors on NOAA satellites and ATSR sensors on the ERS-2 satellite.

What emerges from this study is that the bulk of the vegetation burnt was not represented by forests, but by secondary bushy vegetation, grassy savannahs and farmland. The most persistent fires and the dense smoke which covered much of Indonesia and neighbouring countries for several months were caused by fires located at the edge of swamp forests from which peat is extracted. Few fires occurred in primary forest, except for those started by the conversion of forested land to farming areas and industrial plantations.

Key words : Fires. Remote sensing. Internet. Vegetation. Indonesia.

R E S U M E N

SEGUIMIENTO DE LOS INCENDIOS DE 1997 EN INDONESIA
Contribuciones de Internet y de la teledetección en una situación de urgencia

Durante 1997 en Indonesia se vivió un nuevo periodo de sequía que produjo importantes incendios. Se efectuó el seguimiento de la amplitud, naturaleza, distribución y evolución de dichos incendios con la utilización de imágenes obtenidas vía satélite y una serie de productos derivados, pero también con la red Internet. La distribución espacial de los fuegos y su evolución temporal se analizaron utilizando sobre todo los datos « hot-spots », derivados de datos térmicos proporcionados por los captadores AVHRR de los satélites NOAA y ATSR del satélite ERS-2.

De este estudio se deduce que la mayor parte de la vegetación quemada no está constituida por bosques sino por matorral secundario, llanuras de herbáceas y tierras agrícolas. Los focos más persistentes y la densa humareda que cubrió gran parte de Indonesia y de los países vecinos están originados por focos situados en los lindes de selvas pantanosas explotadas sobre turbas. En el bosque primario los incendios fueron escasos, a excepción de los procedentes de la transformación de las tierras forestales en zonas agrícolas y plantaciones industriales.

Palabras clave : Incendios. Teledetección. Internet. Vegetación. Indonesia.