



École Nationale de la Météorologie
Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
Systèmes Physiques de l'Environnement, Université de Corte
Centre National d'Études Spatiales

Encadrantes : S. RICCI¹ et M. ROCHOUX^{1,2}

¹ CERFACS/URA1875, Toulouse, France

² École Centrale de Paris, Châtenay-Malabry, France

CERFACS Technical Report

Clément DOCHE, METEO FRANCE/ENM
21 Décembre 2012

Vers l'assimilation de données pour la simulation des feux de forêts à l'échelle régionale

Étude tutorée
Année scolaire 2012-2013

Sommaire

Présentation	2
1 Données de géolocalisation de fronts de flammes	3
1.1 Contexte	3
1.2 PLEIADES-1A, imagerie optique satellitaire à très haute résolution	3
1.3 Le SERTIT, service de traitement d'images	4
1.4 Le dispositif LiveFire	5
1.5 La cellule REX66	6
1.6 Les spectromètres spatiaux MODIS et MERIS	6
1.7 La mission Suomi-NPP	7
1.8 Les interféromètres spatiaux IASI et AIRS	8
1.9 Le diffusiomètre spatial SMOS	9
1.10 Les drones	9
2 Un simulateur de propagation d'incendies, ForeFire	10
2.1 Installation en vue d'une utilisation simple	10
2.2 Installation en vue d'une communication avec le coupleur de code <code>Open-PALM</code> . .	11
2.3 Utilisation simple de ForeFire	12
2.4 Utilisation de ForeFire depuis l'exécutable <code>palm_main</code>	14
2.5 Analyse de la performance de ForeFire	14
Perspectives	15

Présentation

Le travail présenté dans ce rapport a été produit lors d'une étude tutorée du premier semestre de la troisième année du cycle de formation d'Ingénieur des Travaux de la Météorologie de l'École Nationale de la Météorologie (ENM). Cette étude a été réalisée au Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) au sein de l'équipe "*Global Change*", sous l'encadrement de S. Ricci, chercheuse, et de M. Rochoux, doctorante dans le domaine de la combustion et de la modélisation-assimilation de données pour la prévision des feux de forêts (propagation de l'interface "front de flamme"). Ce dernier aspect est un enjeu fondamental de sécurité des biens et des personnes, puisque le Sud de la France subit des dommages matériels et humains conséquents chaque année. Dans ce contexte, l'étude tutorée s'est articulée autour de deux objectifs. Le premier concerne la recherche de données de géopositionnement des fronts de flammes afin de corriger les paramètres de modèles de propagation lors d'un cycle d'assimilation et ainsi améliorer la prévision de l'évolution de ces fronts. Le second objectif concerne la prise en main d'un modèle de propagation de feux de forêts réaliste, ForeFire, développé par le SPE (Systèmes Physiques de l'Environnement) de l'université de Corte, dont J.-B. Filippi a communiqué le code source au CERFACS. À terme, ce code sera utilisé par le CERFACS et couplé au coupleur de code **Open-PALM** afin de lui donner la capacité de communiquer avec un code d'assimilation de données basé sur la technique du filtre de Kalman. Ce dernier aspect constitue l'objectif du projet de modélisation proposé par le CERFACS aux élèves de deuxième année du cycle de formation ingénieur de l'ENM.

L'objectif de ce rapport est d'une part de recenser les principales informations concernant les données d'observations spatiales, aéroportées et in-situ de géolocalisation de fronts de feux de forêts de grande échelle. Ces informations ont fait l'objet d'un travail de recherche et de communication avec les organismes potentiellement fournisseurs de telles données tels que le CNES (Centre National des Études Spatiales), le SERTIT (SErvice Régional de Traitement d'Image et de Télédétection) et iTolosa (entreprise toulousaine de recherche et développement dans les domaines des technologies de l'information, de la communication web, du 3D temps réel et de l'image de synthèse). D'autre part, ce rapport présente le code de propagation de fronts actifs ForeFire développé au SPE. Ce code a fait l'objet d'un travail préliminaire permettant de lui donner la capacité de communiquer avec le coupleur de code **Open-PALM**.

Partie 1

Données de géolocalisation de fronts de flammes

1.1 Contexte

Les feux de forêts font l'objet de consensus internationaux au travers de projets de recherche et développement d'outils d'aide à la décision. Destinés aux acteurs nationaux chargés de la sécurité des biens et des personnes, ces outils ont pour objectif d'informer les utilisateurs de l'ampleur, de l'évolution et du comportement de zones actives incendiaires. Le projet Risk-EOS est un projet du GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*, programme européen de surveillance de la Terre), co-financé par l'ESA (*European Spatial Agency*) et ASTRIUM, consiste par exemple en un réseau de services européens de géoinformations pour la surveillance des risques naturels tels que les inondations et les incendies de forêts. Ces services sont déclinés à l'échelle européenne, nationale ou régionale, selon l'ampleur du risque. Les informations traitées par ces services proviennent de simulations (modèles) et de l'observation par satellite.

Dans le cadre des feux de forêts, un service de cartographie en temps-réel des zones brûlées a été créé dans le but d'aider les acteurs concernés. Après acquisition en urgence d'images satellites SPOT pour des feux impactant des surfaces d'au moins cinq hectares, ce service aboutit à la livraison dans les 72 heures de cartes de contours des zones actives d'un incendie par comparaison de deux images satellitaires (acquises avant et pendant l'incendie). Ces cartes sont produites à l'aide du logiciel Overland. Des métadonnées biophysiques (eau, sols, végétation), importantes car contrôlant la vitesse de propagation des flammes, sont aussi fournies *via* ce service.

Un site internet, dont l'adresse est fournie ci-dessous, est consacré au projet Risk-EOS.

<http://www.riskeos.com>

1.2 PLEIADES-1A, imagerie optique satellitaire à très haute résolution

La mission spatiale PLEIADES-1A, lancée le 17 Décembre 2011, est développée par le CNES afin de mieux répondre aux enjeux de civils (cartographie, urbanisme, hydrologie, géophysique, etc) et militaires européens. Elle consiste en une constellation de deux satellites imageurs à très haute résolution spatiale travaillant dans le canal bleu (visible). La résolution spatiale au nadir est de 70 cm et la capacité de temps de revisite est quotidienne en tout point du globe (orbite héliosynchrone). Le système de production d'image orthorectifiée et de communication des données permet d'obtenir une image dans un délai de 30 minutes dans les situations critiques,

et ce, sur un domaine de $20\text{km} \times 20\text{km}$. La capacité d'acquisition maximale par jour est de 1 000 000 km². Il est aussi possible de maximiser les acquisitions sur une zone donnée, ce qui est particulièrement intéressant lorsqu'on veut suivre au mieux un feu de forêt.

Un échange avec F. Masson, chef de projet SPOT au CNES, et C. Tinel, travaillant dans le service "Analyse et Produits Image" du CNES, a abouti sur la possibilité de coopérer avec le CNES *via* un programme de recherche dans le cadre de la recette thématique "utilisateurs Pléiades", phase finale du programme préparatoire à l'utilisation des images Pléiades. Un contact avec S. Hosford, de la direction "Prospective et Stratégie de Programmes (équipe "Terre, Environnement et Climat") au CNES, permettra par la suite de formaliser cette coopération.

Une acquisition de très bonne qualité du feu du Perthus, proche de la Joncqueria (frontière franco-espagnole), a été réalisée par l'instrument PLEIADES-1A le 24 Juillet 2012. Cependant, il n'existe pas d'archives historiques des images PLEIADES permettant de connaître l'ensemble des feux imités par l'instrument optique.

Un partenariat entre le CNES et l'École des Mines d'Alès concerne la mise en œuvre de la méthodologie de traitement automatique des données acquises par l'imageur PLEIADES-1A. Le CERFACS peut contacter C. Tinel afin d'obtenir plus d'informations sur les tenants et les aboutissants de ce travail en collaboration.

Afin de mieux caractériser la topographie d'une région donnée, l'imagerie optique fournie par PLEIADES pourrait être complétée à l'aide de données issues des Modèles Numériques de Terrain (MNT) et de données de l'Institut Géographique National (IGN).

Contacts :

francoise.masson@cnes.fr
claire.tinel@cnes.fr
steven.hosford@cnes.fr



Image PLEIADES des feux du Colorado du 17 Juin 2012 (©CNES).

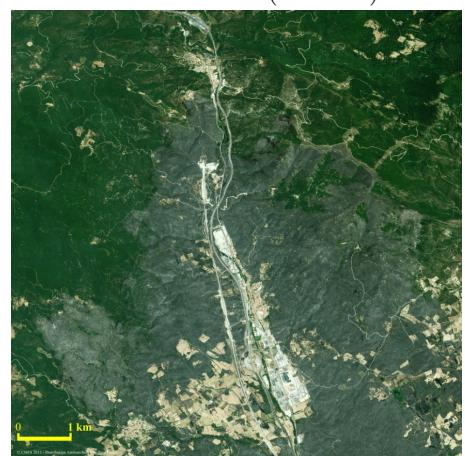


Image PLEIADES de la zone brûlée par le feu du Perthus du 24 Juillet 2012 (©Astrium).

1.3 Le SERTIT, service de traitement d'images

Le SERTIT (SErvice Régional de Traitement d'Image et de Télédétection) est un organisme opérationnel basé à Strasbourg ayant pour mission de mettre en forme toute information issue des réseaux d'observations de télédétection. L'une des thématiques développées par le SERTIT est le traitement spécifique et la mise à disposition d'images décrivant l'état d'un incendie de forêt (contour de la zone brûlée, géolocalisation des zones actives de feux).

Le processus de la chaîne de traitement, faisant suite à la réception des données satellites deux à huit heures après leur acquisition, peut être résumé en cinq étapes :

1. réception de données satellitaires sur les canaux allant du jaune jusqu'au proche infrarouge (SPOT1, DMC, BEIJING1), les canaux bleus à haute résolution (PLEIADES-1A, QUICK

- BIRD, IKONOS, GEOEYE) et les canaux infrarouges (LANDSAT, SPOT4-5) ;
2. mise en géométrie (orthorectification) ;
 3. phase de traitement (extraction de la zone brûlée, de la zone active) ;
 4. validation ;
 5. mise à disposition d'un produit cartographique. La certification ISO constraint le SERTIT à fournir les produits issus de la chaîne de traitement en moins de six heures.

Un contact avec H. Yesou, travaillant au SERTIT, a été établi. Le SERTIT est disposé à collaborer sous n'importe quelle forme (ANR, FP7, etc) avec le CERFACS. De plus, en travaillant dans le cadre de la Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures, de projets européens tels que SAFER (*Services and Applications For Emergency Response*) et/ou pour le compte de la Sécurité Civile, le SERTIT dispose d'ores et déjà de cartographies d'urgence précises pour des cas de fronts de feux de forêts avec des suivis sur plusieurs jours (tel que le feu de la Réunion de 2011, figure ci-contre). La description des feux du massif des Maures (Var), ayant eu lieu en 2003, est aussi rendue disponible par le SERTIT. Le jeu des modèles de propagation de feux sur de tels cas permettrait de tester leur capacité à reproduire le déroulement des incendies.

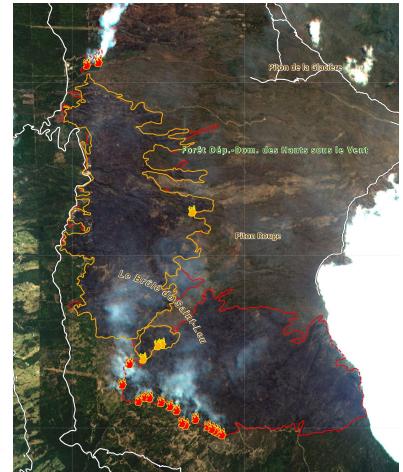


Image traitée des feux de la Réunion de 2011 (©SERTIT).

Contact :

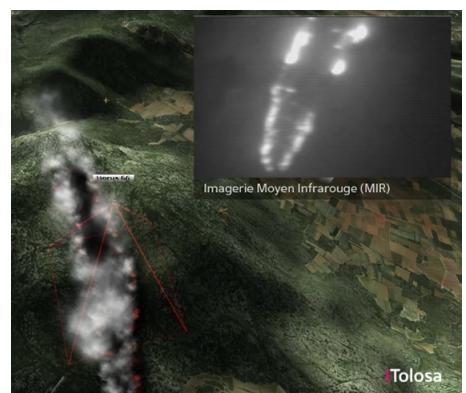
herve.yesou@sertit1.u-strasbg.fr

Le SERTIT dispose d'un site internet consultable à l'adresse suivante :

http://sertit.u-strasbg.fr/SITE_RMS/RMS/RMS_accueil_2012.html

1.4 Le dispositif LiveFire

LiveFire est un dispositif de géolocalisation automatisée et en temps réel d'acquisitions aéroportées d'images prises dans le moyen infrarouge (MIR), domaine spectral permettant de mieux discréminer les zones actives d'un feu que dans le domaine spectral de l'infrarouge. Ce dispositif est né en 2008 de la collaboration entre le CNRS (Centre National des Recherches Scientifiques) et le SDIS 66 (Service Départemental d'Incendie et de Secours des Pyrénées Orientales). L'entreprise iTolosa est chargée de développer la chaîne de traitement complète ainsi que les aspects matériels et logiciels, depuis l'acquisition d'images jusqu'à leur transmission au sol, incluant le traitement et le géoréférencement.



Principe d'une acquisition LiveFire dans le moyen infrarouge (©iTolosa).

L'acquisition des images MIR se déroulant en conditions de vol relativement difficiles (turbulence induite par la convection à la verticale d'un feu), l'erreur de mesure sur la position du front de flammes peut valoir jusqu'à 30 mètres.

N. Merlet, directeur de la société iTolosa, ainsi que P. Combrette, doctorante au CNES et particulièrement attachée au bon déroulement du dispositif LiveFire, ont démontré leur volonté de coopérer avec le CERFACS lors d'échanges mails et d'une réunion d'information. En effet, des données de positions de fronts de feux de forêts ayant eu lieu dans les Pyrénées Orientales issues du dispositif LiveFire seront prochainement communiquées au CERFACS.

Contacts :

nm@itolosa.fr

pauline.crombette@cnes.fr

1.5 La cellule REX66

La cellule REX66 (Retour d'EXpérience sur les incendies de forêts dans les Pyrénées Orientales) est une démarche née d'une collaboration entre le service forestier de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Pyrénées Orientales et le Service Départemental d'Incendie et de Secours, soutenue par la préfecture de défense Sud (Délégation à la Protection de la Forêt Méditerranéenne DPFM). Cette démarche vise à étudier en temps réel le comportement des incendies de forêts et à tirer des enseignements sur l'utilisation des équipements, la gestion des effectifs de sapeurs pompiers et de leurs déplacements au cours d'une intervention.

Une équipe au sol suit l'évolution d'un feu à l'aide d'un véhicule tout terrain équipé d'instruments de mesures météorologiques (température, humidité, vent à 10 mètres).

À chaque arrêt, la position approximative du front de flammes est dessinée sur une carte lorsque cela est possible (visibilité réduite par les nuages, la végétation). Les mesures météorologiques sont aussi annotées. Ce dispositif permet de connaître les positions intermédiaires des fronts de flammes, ce qui est particulièrement utile à fournir au schéma d'assimilation de données pour des rejeux de modèles (validation).

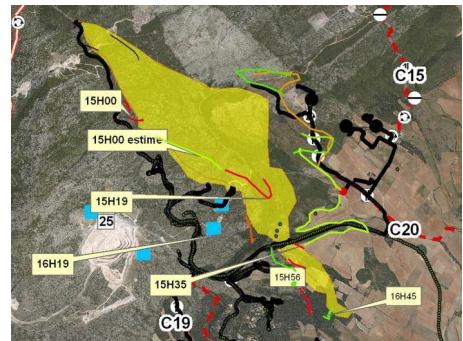
V. Guillemat, du Syndicat des Propriétaires Forestiers des Pyrénées Orientales intégrant l'équipe au sol du REX66, ainsi que P. Crombette, intégrant l'équipe aérienne du REX66, sont les deux personnes à contacter pour formaliser une collaboration à propos des données de ce dispositif.

Contact :

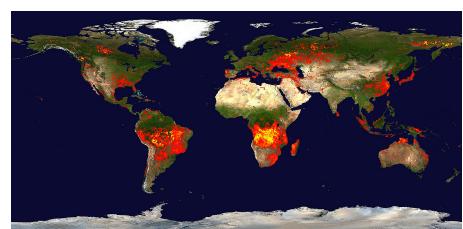
vincent.guillemat@foretpriveefrancaise.com

1.6 Les spectromètres spatiaux MODIS et MERIS

Le spectromètre MODIS (*M*ODerate *r*esolution *I*maging *S*pectroradiometer) est un instrument passif développé par la NASA et embarqué à la fois sur les satellites Terra (orbite héliosynchrone choisie de sorte à favoriser l'observation des surfaces continentales de jour) et Aqua (orbite héliosynchrone choisie de sorte à favoriser l'observation des surfaces océaniques de jour). Lancé en Décembre 1999, le satellite Terra a permis l'observation de feux de forêts à l'aide



Synthèse du REX66 lors du feu de Vinagrau (09/08/2011).



Carte mondiale de synthèse MODIS de la localisation des feux de forêts pour la période du 30 Juillet au 8 Août 2010.

des capteurs ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), MISR (*Multi-angle Imaging Spectroradiometer*) et MODIS.

Suivant le canal utilisé, la résolution spatiale de MODIS varie de $250 \times 250m^2$ pour les canaux B3 à B7 des micro-ondes jusqu'à $1000 \times 1000m^2$. Une production particulière de données, *MODIS Rapid Response System*, permet aux autorités de suivre l'état et le comportement d'incendies de grande échelle en temps réel. Un site internet est consacré aux produits de feux MODIS, consultable à l'adresse suivante :

<http://modis-fire.umd.edu/index.html>.



Acquisition de l'instrument MERIS lors de feux d'Australie de 2009

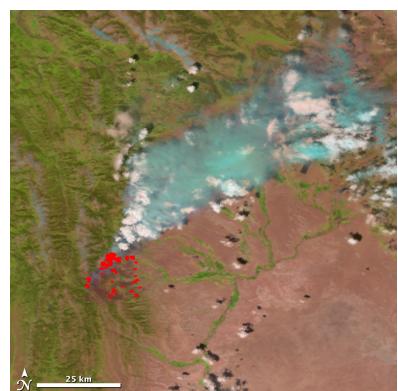
Référence :

Giglio, L., Csiszar, I., Justice, C.O. 2006. *Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua MODIS sensors*. Journal of Geophysical Research - Biogeosciences, Vol 111, G02016, doi :10.1029/2005JG000142.

Le spectromètre à résolution spectrale moyenne MERIS est l'équivalent européen de MODIS, embarqué sur ENVISAT et acquérant des images dans le domaine spectral solaire. La résolution spatiale, sur les surfaces continentales, est de $260 \times 300m^2$, et la largeur de fauchée est de 1150 km. Le temps nécessaire afin que MERIS ait couvert la totalité du globe est de trois jours. Cette résolution spatio-temporelle permet d'avoir une information supplémentaire de qualité pour caractériser l'évolution de la position de la zone active d'un feu de forêt ayant lieu à l'échelle régionale. Toutefois, de tels instruments ne pourront être utilisés pour des feux de petite échelle.

1.7 La mission Suomi-NPP

La mission spatiale Suomi-NPP, développée par la NASA et lancée en 2011, consiste en un satellite d'observation de la Terre de nouvelle génération ayant une orbite polaire héliosynchrone. Ce satellite transporte à son bord un capteur de type radiomètre, VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*), capable d'acquérir des images dans 22 canaux du visible et de l'infrarouge avec une précision fine de 750 mètres au nadir. Ce capteur permet de détecter les phénomènes de feux et d'illuminations à la surface avec une assez bonne résolution pour pouvoir localiser les feux de forêts (les lumières émises par les bateaux en pleine mer sont aussi détectées par cet instrument). Le temps de revisite de cet instrument est semblable aux instruments MODIS et MERIS décrits précédemment.



Acquisition de l'instrument VIIRS lors de feux de Wyoming du 1^{er} Juillet 2012. Les foyers rouges représentent les zones actives des feux.

1.8 Les interféromètres spatiaux IASI et AIRS

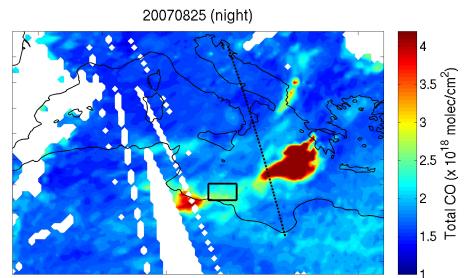
L'interféromètre IASI (*Infrared Atmospheric Spectrometer Interferometer*) est un capteur spatial embarqué à bord du satellite européen MetOP-A. Il est utilisé pour sonder l'atmosphère au-dessus d'un point du globe deux fois par jour (orbite héliosynchrone, passage à 9h et 21h locales) avec une résolution spectrale très fine (0.25cm^{-1}) et une résolution spatiale moyenne (1 km sur la verticale, 12 km sur l'horizontale au nadir). Dans l'infrarouge, sa résolution spectrale lui permet de produire des profils de température, d'humidité et de vingt-six gaz absorbants différents tels que l'ozone, le méthane, le composé CH₂O ou le monoxyde de carbone (etc) par inversion de l'équation de transfert radiatif. Lorsque les conditions de mesures sont optimales (pas de nuages, atmosphère claire), IASI est capable de mesurer la température des surfaces continentales, ce qui peut être intéressant pour des cas de feux de grande échelle (les feux de petite à moyenne échelle ne peuvent être détectés par IASI car sa résolution spatiale ne le permet pas). De plus, l'inversion de gaz carboniques tels que le monoxyde de carbone, émis par la combustion de biomasse, constitue une information supplémentaire pour la détection et la localisation d'un grand feu. Cependant, la mesure du radical OH n'est pas possible avec l'instrument IASI. Cet élément à très courte durée de vie est fortement émis à proximité des flammes lors de la combustion de biomasses végétales, ce qui aurait rendu sa mesure intéressante dans le cadre de l'assimilation de données pour la prévision de la propagation des feux forestiers.

Toutefois, un front de flamme ne peut être géolocalisé par IASI avec suffisamment de précision pour faire de ce type de données une source pour l'assimilation de données en temps réel. En revanche, les données IASI peuvent être utilisées pour valider les modèles de propagation de feux (surfaces brûlées, quantité de biomasse brûlée, etc). Un contact avec C. Larigauderie, responsable du projet IASI au CNES, ainsi qu'avec C. Mari, travaillant sur les données IASI à l'Observatoire Midi-Pyrénées, a été initié. Par la suite, pour plus d'informations sur les produits de données IASI, le CERFACS pourra se renseigner auprès de scientifiques tels que C. Clerbaux et M. Georges, du LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales), ainsi que S. Turquety du LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique).

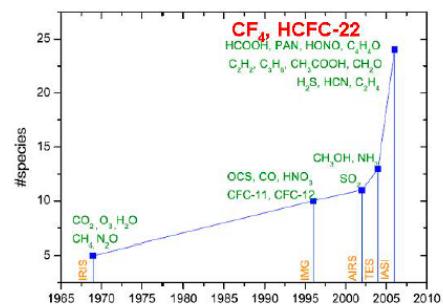
L'interféromètre AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*) est l'équivalent américain de IASI, embarqué à bord du satellite AQUA. Les caractéristiques techniques de cet instrument sont relativement semblables à celles de IASI.

Contacts IASI :

carole.larigauderie@cnes.fr
celine.mari@aero.obs-mip.fr
carole.daniel@cnes.fr



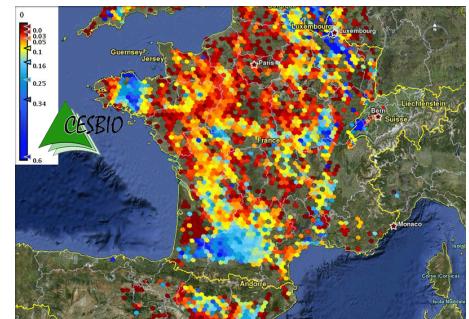
Acquisition de l'instrument IASI (monoxyde de carbone) lors de feux de Grèce de 2007.



Évolution du nombre d'espèces chimiques mesuré par interférométrie spatiale au cours du temps.

1.9 Le diffusiomètre spatial SMOS

Le diffusiomètre SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) est un instrument embarqué à bord du satellite ENVISAT, développé par le CNES et ayant pour but de fournir des cartes d'humidité de surface des sols et de salinité de surface des océans. Les variables mesurées sont donc relatives aux échanges sol-végétation-atmosphère, à l'état d'humidité des sols et de la végétation. L'humidité ayant un grand rôle au sein des paramètres des modèles de propagation de flammes, ces données sont intéressantes à prendre en compte au moins pour la mise en données.



Acquisition de l'instrument SMOS (humidité des sols) lors de la sécheresse de 2010.

1.10 Les drones

Les drones sont des aéronefs commandés à distance par un utilisateur. Leur arrivée récente dans la science ouvre de grandes perspectives, notamment en ce qui concerne les mesures météorologiques, hydrologiques, urbanistes, etc. Le laboratoire DRONE de l'ENAC (École Nationale de l'Aviation Civile) développe actuellement un système complet, depuis la mesure à bord d'un micro-drone équipé en capteurs, jusqu'à la transmission des données au sol. Pour l'assimilation de données de feux de grande échelle, l'opportunité serait d'équiper des micro-drones de caméras miniaturisées acquérant des images dans le moyen infra-rouge et de les faire voler au-dessus d'un feu de forêt pour suivre l'évolution du front de flamme. Selon C. Ronfle-Nadaud, responsable du programme DRONES à l'ENAC, les mauvaises conditions de vol régnant au-dessus de la colonne convective induite par les flammes seraient trop endommageables pour de tels appareils. De plus, des aspects de procédures opérationnelles pourraient restreindre cette possibilité. En effet, durant un feu, les pilotes d'aéronefs de la sécurité civile, tels que les Canadairs, sont parfois dans l'obligation de réservier l'espace aérien pour des raisons de sécurité.

Ce type de données pourra donc être utilisé pour valider l'étendue des surfaces brûlées simulées par les modèles de propagation des feux.



Exemple de drone civil disponible dans le commerce.

Contact ENAC :

catherine.ronfle-nadaud@enac.fr

Partie 2

Un simulateur de propagation d'incendies, ForeFire

Développé par le SPE (Systèmes Physiques de l'Environnement) de l'Université de Corte, ForeFire est à la fois une interface de programmation (*API*), une librairie et un interpréteur dont les codes sources sont écrits en **C++**. Le but de ce code est de simuler l'évolution de fronts actifs (de feux, de laves) *via* le calcul d'une vitesse-modèle de propagation (*rate of spread ROS*). ForeFire a été conçu de sorte à ce qu'il soit utilisé simplement par lignes de commandes (interpréteur en synthax **Python**), couplé à d'autres codes et étendu par des modèles de propagation et d'émission (simulation de panaches) définis par l'utilisateur.

Le contenu de la version la plus récente et la plus complète de ForeFire disponible au CERFACS se trouve dans "/home/globc/doche/Modèles/forefire.0.beta1/". Le dossier "src" contient les codes **C++** et les fichiers permettant l'installation de ForeFire. Le dossier "examples" contient des fichiers de mise en données et de simulation de ForeFire pour des cas de feux théoriques simples. Le dossier "documentation" contient le guide d'utilisation de ForeFire rédigé en anglais.

Contact :

filippi@univ-corse.fr

2.1 Installation en vue d'une utilisation simple

L'installation basique de ForeFire en vue d'une utilisation directe requiert une librairie NetCDF V3 ou plus récente, un compilateur **C++** (il s'agit dans notre cas du compilateur **GNU g++**) et l'application Python **SCons** servant à construire la librairie et l'exécutable. Le fichier de configuration **SConstruct**, situé dans le dossier **src** est à modifier selon la machine afin de rediriger vers les bons headers, les bonnes librairies et les bons binaires. Sur la machine **Veleta** du CERFACS, le fichier **Sconstruct** est comme suit :

```
env = Environment(CPPPATH=['/usr/include','/usr/local/include',
    '/usr/include/xulrunner-sdk-1.9.1/system_wrappers'], CCFLAGS=['-Wall', '-g2',
    '-femit-class-debug-always', '-O0', '-m64', '-fmessage-length=0', '-D_JNI_IMPLEMENTATION'])
env.SharedLibrary('ForeFire', Glob('*.*'), LIBS=['netcdf_c++', 'netcdf'],
    LIBPATH=['/opt/cdat/Externals/NetCDF/include'])
env.Program('ForeFireExe', Glob('*.*'), LIBS=['netcdf_c++', 'netcdf'],
    LIBPATH=['/opt/cdat/Externals/NetCDF/include'])
```

Enfin, la compilation, la création de la librairie **libForeFire.so** et la construction de l'exécutable **ForeFireExe** se font *via* la commande "**scons**" (attention, la commande s'exécute depuis le dossier "**src**").

2.2 Installation en vue d'une communication avec le coupleur de code Open-PALM

Afin de créer une librairie ForeFire capable d'être prise en charge par Open-PALM, un `Makefile` a été conçu. Une configuration spéciale doit être au préalable mise en œuvre dans le fichier `cshrc_priv` en y recopiant les lignes suivantes :

```
setenv PALMHOME /home/palm/USERS/ricci/PALM_MP_4.1/PALM_MP/linux64r4mpich2_gnu441
setenv PREPALMMPDIR /home/palm/USERS/ricci/PALM_MP_4.1/PrePALM_MP
setenv PALMROOT $PALMHOME
set path=(/usr/lib64/mpich2/bin . $path)
setenv LD_LIBRARY_PATH /usr/lib64/mpich2/lib:$LD_LIBRARY_PATH
```

Le `Makefile` utilisé pour générer la librairie ForeFire utilisée ensuite par Open-PALM est comme suit :

```
CC=g++
CCFLAGS=-c -Wall -g2 -femit-class-debug-always -O0 -m64 -fmessage-length=0
-D_JNI_IMPLEMENTATION
CCFLAGSOS=-c -Wall -g2 -femit-class-debug-always -O0 -m64 -fmessage-length=0
-D_JNI_IMPLEMENTATION -FPIC
CPPPATH=-I/usr/include -I/usr/local/include/
-I/usr/include/xulrunner-sdk-1.9.1/system_wrappers/
-I/home/palm/USERS/ricci/PALM_MP_4.1/PALM_MP/linux64r4mpich2_gnu441/include/
LDFLAGS=-I/usr/include/xulrunners-sdk-1.9.1/system_wrappers/
LIBS=-I/opt/cdat/Externals/NetCDF/include/ -lnetcdf_c++ -lnetcdf
SRC=$(wildcard *.cpp)
OBJ=$(SRC:.cpp=.o)
OBJOS=$(SRC:.cpp=.os)

all : libForeFire.a,libForeFire.so
%.o : %.cpp
    $(CC) -o $@ $(CCFLAGS) $(CPPPATH) $(LDFLAGS) $<
%.os : %.cpp
    $(CC) -o $@ $(CCFLAGSOS) $(CPPPATH) $(LDFLAGS) $<
libForeFire.a : $(OBJ)
    ar -rv $@ $(OBJ)
libForeFire.so : $(OBJOS)
    $(CC) -o $@ -shared $(OBJOS) $(LIBS) $<
depend :
    makedepend -I. $(SRC)
clean :
    \rm -f *.o *.os *.log *.a *.so
```

Ce `Makefile` se trouve dans le dossier "src_PALM" et permet de générer la librairie "libForeFire.so" via la commande `make`. Cette librairie est ensuite appelée depuis une unité PALM afin de lancer ForeFire via un exécutable PALM appelé `palm_main`. Une modification du code source "`CommandShell.cpp`" contenant la fonction `main` a dû être opérée (cette fonction est transférée au code source de l'unité PALM qui gère l'appel à la librairie ForeFire).

Le code source de l'unité PALM gérant l'appel à la librairie ForeFire "libForeFire.so" se nomme "unit-ForeFire.cpp" et se trouve dans le dossier "PALM". Elle est écrite en C++ et est construite ainsi :

```
/*PALM_UNIT -name forefire\
    -functions {C++ forefire_PALM}\
    -object_files {unitForeFire.o ../src/libForeFire.so}\
    -comment {commentary}
*/
#include "../src/CommandShell.h"
using namespace std;
```

```

extern "C" int forefire_PALM(int argc, char* argv[]){
    using namespace libforefire;
    CommandShell FFShell;
    FFShell.startShell(argc, argv);
    return 0;
}

```

Pour générer l'exécutable de cette unité, le fichier "unitForeFire.cpp" doit être compilé *via* un **Makefile**. Ce dernier doit respecter la configuration décrite dans le fichier **Make.include**. Lors de la génération des fichiers de service PALM, sous PrePALM, l'utilisateur est invité à laisser décocher la case **Make.include** afin d'éviter d'effacer le fichier **Make.include**. Le fichier **Make.include** doit nécessairement contenir ces lignes :

```

PALMHOME = /home/palm/USERS/ricci/PALM_MP_4.1/PALM_MP/linux64r4mpich2_gnu441
CC = mpicc
CCFLAGS =
LCCFLAGS =
CCEXTLIB = -lgfortran -m64 -O2 -fPIC -Wl,-z,noexecstack
-I/usr/include/mpich2-x86_64 -L/usr/lib64/mpich2/lib
-L/usr/lib64/mpich2/lib-lpthread -lrt
SOFLAGS = -shared -fpic
LIBS = -lnetcdf_c++ -lnetcdf

```

La commande **make** permet enfin de générer l'exécutable **palm_main**. La section 2.4 présente une aide à l'utilisation de ForeFire depuis cet exécutable.

2.3 Utilisation simple de ForeFire

Cette section a pour objectif de présenter une aide à l'utilisation de ForeFire dans sa configuration simple (voir la section 2.1 pour l'installation). Un premier mode de fonctionnement de ForeFire est l'interpréteur de commande. Dans un terminal, l'utilisateur doit se situer dans le dossier "**src**" et lancer la commande d'exécution "**./ForeFireExe**". Suite à cette commande, un **shell** s'affiche, celui de ForeFire dont la syntaxe est en Python. La commande **help[]** permet dans ce **shell** **ForeFire** d'afficher les commandes disponibles ainsi que leur description écrite en anglais.

Pour configurer une simulation, ces commandes peuvent être écrites dans un fichier de configuration Python. Ce fichier peut être utilisé *via* la commande **include["cheminVersFichierConfiguration"]** dans le cas où l'utilisateur veut lancer une simulation ForeFire depuis l'interface de commande. L'utilisateur peut aussi exécuter directement la commande **./ForeFireExe -i cheminVersFichierConfiguration** depuis le dossier "**src**", l'option **-i** permet en effet de spécifier un fichier d'entrée.

L'exemple situé dans le dossier "**examples/01_Isotropic/**" contient un fichier de configuration, **circle.ff**, qui concerne une simulation simple et théorique d'un front de feu se propageant isotropiquement sur une surface plane simple (sans propriété particulière de combustible, de topographie, de vent, etc). Le fichier **circle.ff** contient les lignes suivantes :

```

setParameters[caseDirectory=/home/globc/doche/Modèles/forefire.0.beta1/examples/01_Isotropic/;
    fireOutputDirectory=ForeFire/]
setParameter[outputsUpdate=15]
setParameters[perimeterResolution=3;spatialIncrement=0.5]
setParameter[propagationModel=Iso;Iso.speed=1]
FireDomain[sw=(-1000.,-1000.,0.);ne=(1000.,1000.,0.);t=0.]
    FireFront[t=0.]
        FireNode[loc=(-10,-10,0.);vel=(0.,0.,0.);t=0.]
        FireNode[loc=(-10,10,0.);vel=(0.,0.,0.);t=0.]
        FireNode[loc=(10,10,0.);vel=(0.,0.,0.);t=0.]
        FireNode[loc=(10,-10,0.);vel=(0.,0.,0.);t=0.]
step[dt=100s]
print[]
save[]

```

Les paramètres de simulation "**caseDirectory**" et "**fireOutputDirectory**" permettent de spécifier respectivement le dossier de travail, dans lequel est stocké le fichier de configuration de la simulation, et le dossier

dans lequel sont stockés les fichiers de sortie de simulation. Il est préférable de noter le chemin absolu du dossier de travail dans le paramètre `caseDirectory`. Pour les autres dossiers, il n'est plus nécessaire d'indiquer leur chemin absolu, mais plutôt leur chemin relatif à partir du dossier de travail.

Le paramètre `outputsUpdate` permet à l'utilisateur de spécifier la fréquence d'écriture de fichiers de sortie Python dont le contenu est l'état du front actif.

La valeur du paramètre **perimeterResolution** fixe la distance maximale en mètres séparant deux noeuds constituant les points du front actif. Durant la simulation, chaque noeud évolue dans le domaine et, si la distance entre deux noeuds dépasse la valeur de ce paramètre, un noeud est créé pour ainsi réduire cette distance. Le paramètre **spatialIncrement** permet quant à lui de fixer la distance minimale, en mètres, que doit parcourir le front en un pas de temps pour être considéré comme actif. D'autres paramètres, tels que la puissance rayonnée par le front (en $W.m^{-2}$), permettent de caractériser l'aspect actif ou non du front. Le rapport entre le paramètre **perimeterResolution** et le paramètre **spatialIncrement** constitue la condition de stabilité du modèle de propagation ForeFire.

Le paramètre `propagationModel` permet à l'utilisateur de choisir le modèle de propagation de front, suivant le cas dans lequel l'utilisateur désire simuler (coulée de lave, feu de forêt, etc). Dans cet exemple, le modèle de propagation isotrope est choisi. Le paramètre `Iso.speed`, plus généralement "`nomdumodèle`".`speed`, permet de forcer la valeur de la vitesse du front actif.

La commande `FireDomain[]` permet de créer un domaine de simulation rectangulaire dans un repère cartésien. L'utilisateur doit préciser sa taille *via* les coordonnées en mètres du coin situé au Sud-Ouest du domaine et les coordonnées du coin situé au Nord-Est du domaine (coordonnées dans un espace à trois dimensions). L'utilisateur peut également préciser à quel instant correspond la création de ce domaine de simulation (ici, le domaine est créé à l'instant $t = 0s$).

La commande `FireFront[]` permet ensuite à l'utilisateur d'initialiser la position d'un front actif à un instant donné (ici, au même moment que la création du domaine de simulation). La commande associée `FireNode[]` permet à l'utilisateur d'indiquer la position et la vitesse de chaque nœud constituant ce front initial.

La commande `step()` permet à l'utilisateur d'avancer la simulation au temps souhaité (ici, 100 secondes après l'initialisation du domaine et du front).

L'exemple situé dans le dossier "`examples/03_Canyon/01_forefire/`" est plus complet que le précédent. En effet, une mise en donnée de la topographie, du vent, des modèles de flux de chaleur et de vapeur, et des paramètres décrivant le fuel, est contenue dans le fichier NetCDF "`canyon.nc`". Ce fichier permet d'affecter ces valeurs de données sur une grille de discréétisation du domaine de simulation en $n_x \times n_y \times n_z$ cellules. Cette grille de discréétisation peut être choisie de sorte à correspondre à la grille de discréétisation d'un autre modèle couplé à ForeFire (modèle de vent, de pollution atmosphérique, etc). Cette mise en donnée n'est donc pas en lien avec la résolution spatiale du modèle ForeFire, mais sert à forcer le comportement de ForeFire en chacune des mailles de la grille de discréétisation. Pour affecter la valeur de tous les paramètres de fuel en chacune des mailles de la grille de discréétisation, un fichier Python appelé ici "`fuel.ff`", permet d'assigner un indice de valeur entière à une série de valeurs réelles correspondant aux paramètres de fuel. La valeur de cet indice est ensuite affectée aux cellules de discréétisation selon les types de fuels que comporte le domaine de simulation. Le fichier "`fuel.ff`" est comme suit pour l'exemple traité dans ce paragraphe :

Le fichier contenant les commandes Python de la simulation est appelé "FireSimulation.ff" et contient les lignes suivantes :

```

setParameter[caseDirectory=/home/globc/doche/Modèles/forefire.0.beta1/examples/
    03_Canyon/01_forefire/]
setParameter[fireOutputDirectory=Outputs/;outputsUpdate=15]
setParameter[NetCDFfile=canyon.nc;fuelsTableFile=fuels.ff;fluxNetCDFfile=canyon.nc]
setParameter[propagationModel=BalbiUnsteady;spatialIncrement=0.15;perimeterResolution=0.5]
FireDomain[sw=(0.,0.,0.);ne=(640.,320.,0.);t=0.]
    FireFront[t=15]
        FireNode[loc=(296,130,0);vel=(-0.5,-0.5,0);t=15]
        FireNode[loc=(296,190,0);vel=(-0.5,0.5,0);t=15]

```

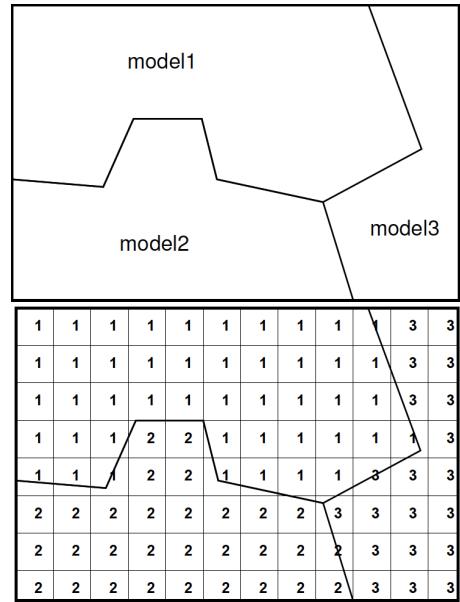
```

FireNode[loc=(304,190,0);vel=(0.5,0.5,0);t=15]
FireNode[loc=(304,130,0);vel=(0.5,-0.5,0);t=15]
step[dt=150s]
print []
save []

```

Le paramètre `NetCDFfile` permet à l'utilisateur de spécifier le nom du fichier d'entrée de mise en donnée `NetCDF`. Le paramètre `fuelsTableFile` permet à l'utilisateur de spécifier le nom du fichier Python associant des indices aux valeurs des paramètres de fuels. Le paramètre `fluxNetCDFfile` permet à l'utilisateur de spécifier le nom de fichier d'entrée `NetCDF` contenant l'indexation des modèles de flux utilisés pour chacune des mailles de la grille de discréétisation. En effet, l'utilisateur peut définir des sous-domaines contenant différents types de surfaces (végétalisées, urbaines, etc) et ainsi affecter différents modèles de flux suivant les propriétés des sous-domaines. La figure ci-dessous schématisé l'utilisation de sous-domaines avec l'indexation des différents modèles de flux (chaque indice correspond à un certain modèle de flux).

Le fichier de sortie `NetCDF` généré par la commande `save[]` contient le temps d'arrivée du front pour chacune des mailles de la grille de discréétisation, identique à la grille de discréétisation donnée au fichier `NetCDF` de mise en donnée du modèle.



2.4 Utilisation de ForeFire depuis l'exécutable `palm_main`

Cette section présente une aide à l'utilisation de ForeFire depuis l'exécutable `palm_main`. En exécutant la commande `./palm_main` depuis le dossier PALM, l'utilisateur voit apparaître l'interface de commandes `shell` identique à celle décrite dans la section précédente pour une utilisation simple de ForeFire. Pour spécifier un fichier d'entrée (configuration d'une simulation), l'utilisateur peut soit exécuter la commande `./palm_main -i cheminVersFichierConfiguration`, soit écrire le chemin du fichier d'entrée précédé de l'option `-i` dans le fichier de service `main_forefire.args`, puis exécuter la commande `./palm_main`.

2.5 Analyse de la performance de ForeFire

Afin de comparer les simulations ForeFire aux observations et ainsi analyser l'erreur modèle, des indices de score ont été développés par le SPE de l'Université de Corte. Des cas d'évaluation de l'erreur modèle sont disponibles à l'adresse internet suivante :

<http://forefire.univ-corse.fr/FireCases/>

La comparaison des résultats de simulations ForeFire aux observations ne pouvant pas être synthétisée en un seul indice, deux indices de score ont été développés :

- l'indice "*Arrival Time Agreement*" met l'accent sur le temps d'arrivée simulé et observé du front de flammes ;
- l'indice "*Shape Agreement*" met l'accent sur la forme simulée et observée du front de flammes.

Ces indices de score sont sensibles à la qualité de la mise en données du modèle ForeFire (topographie, vents, humidité, description de la végétation, etc).

Une librairie Python et Java, développé par le SPE de l'Université de Corte, permet de comparer la position des fronts de flammes simulés et observés et est accessible sur le lien internet suivant :

<http://sourceforge.net/projects/pyfirescore/>

Les références ci-dessous peuvent être consultées pour plus d'informations sur l'analyse de la performance de ForeFire :

- Filippi, Mallet, Nader. *Forest Fire evaluation methods for use in the FireScore tool*, 2010.
- Finney, M. A. (2000). Efforts at Comparing Simulated and Observed Fire Growth Patterns. Technical Report INT-95066-RJVA, U.S Department of Agriculture, Forest Service.
- Fujioka, F. M. (2002). A new method for the analysis of fire spread modeling errors. *Int. J. Wildland Fire*, 11(4) :193-203.

Perspectives

L'étude tutorée, dont ce rapport technique présente les détails, constitue un travail préliminaire dans un cadre de recherche et de développement d'outils de modélisation et d'assimilation de données pour la prévision de la propagation d'un feu de forêt. Deux objectifs ont été initier durant cette étude. Le CERFACS continuera de les traiter, notamment *via* le projet de modélisation attribué à un groupe d'élèves de deuxième année de formation d'ingénieur de l'École Nationale de la Météorologie.

Ces objectifs concernent pour le premier une recherche d'informations concernant des données de géolocalisation de zones actives de feux de forêts d'échelle régionale. De nombreux contacts ont été établis avec des organismes d'importance tels que le CNES, le SERTIT, iTolosa... Des échanges avec ces organismes ont notamment débouché sur des projets de recherche en collaboration permettant ainsi au CERFACS de disposer à l'avenir de données de qualité afin de valider les schémas d'assimilation de données ainsi que les modèles de propagation de feux de forêts. Ces échanges doivent être entretenus dans les prochains mois afin de conclure et formaliser ces projets de recherche.

Le second objectif concerne quant à lui le couplage d'un code de propagation de feux de forêts développé au SPE de l'Université de Corte au coupleur de code **Open-PALM**. Ce travail permettra à terme de tester le schéma d'assimilation de données, basé sur la technique du filtre de Kalman, sur ce code de propagation.