

# REGIME D'APPUI AUX PME POUR L'INNOVATION DUALE – RAPID

-----

## DOCUMENT DE DESCRIPTION DU PROJET

<b>Acronyme du projet</b>	PréViBOSS
<b>Nom complet du projet</b>	PREvisibilité à courte échéance de la variabilité de la VISibilité dans le cycle de vie du Brouillard, à partir de données d'Observation Sol et Satellite

<b>Début envisagé des travaux</b>	Juin 2010	<b>Durée des travaux</b>	36 mois
-----------------------------------	-----------	--------------------------	---------

<b>Société porteuse du projet</b>	
<b>Nom</b>	HYGEOS
<b>SIREN</b>	43905147500036

<b>Porteur et partenaires éventuels</b>	<b>Date</b>	<b>Signature</b>
<b>Porteur: HYGEOS</b>		
<b>CNRS - IPSL/LMD (FR636)</b>		
<b>CNRS – GAME (URA 1357)</b>		

# 0. Présentation synthétique du projet

## Introduction:

Le brouillard nuit directement à des activités majeures de nos sociétés comme le transport et la surveillance à distance, en réduisant sévèrement la visibilité atmosphérique, sans qu'on puisse aujourd'hui prévoir avec certitude la distribution spatiale et la variabilité temporelle du changement de visibilité. Le brouillard est également un facteur essentiel de la qualité de l'air et du climat en modifiant les propriétés particulières de la couche atmosphérique de surface. La complexité, la diversité et les échelles fines des processus en jeu rendent incertains par les modèles classiques de prévision numérique météorologique, non seulement le diagnostic mais aussi la prévision des épisodes de brouillard. Les développements récents ont éclairé la nécessité de prendre en compte les observations pour améliorer la prévision du brouillard. Le projet consiste à étudier la faisabilité de la prévision, à courte échéance et à l'échelle locale, en se basant sur un dispositif expérimental adapté, de la variabilité de la visibilité dans le cycle de vie du brouillard, incluant l'impact des panaches d'aérosols de pollution urbaine et aussi de la brume. Une méthode statistique est appliquée à une base de données très détaillée pour sélectionner le jeu de paramètres mesurés le plus pertinent pour la détection et pour la prévision, en fonction de diverses options techniques et des conditions atmosphériques variées.

## Objectifs du projet :

**L'objectif du projet soumis dans le cadre du dispositif RAPID est d'améliorer le diagnostic sur les distributions spatiale et temporelle de la visibilité à la surface, ainsi que la prévision de la variabilité de cette visibilité dans le cycle de vie des brouillards.** L'étude consiste à optimiser l'exploitation des mesures issues d'un dispositif expérimental très sophistiqué installé sur plateforme terrestre, pour isoler les paramètres les plus pertinents à décrire les processus en jeu dans le cycle de vie du brouillard. Un dispositif expérimental optimal sera alors identifié pour décrire et prévoir le changement de visibilité dans le cycle de vie du brouillard et pour différentes conditions atmosphériques. Mais comme il est aussi utile de se préparer au changement de visibilité sur tout théâtre d'opération, même quand la mesure recommandée n'est pas disponible, l'apport de l'observation satellitaire et des résultats de modélisation numérique sera évalué comme complément de la base de donnée issue de l'observation depuis la surface. Alors, la fiabilité sur le diagnostic et la prévision sera étudiée quand le dispositif expérimental au sol ne peut être optimal. L'objectif est décliné selon 4 axes:

- 1) Etendre une base de données d'observation, depuis le sol et par satellite, des propriétés de l'atmosphère à la surface et sur la colonne atmosphérique, et des propriétés microphysiques et optiques des aérosols, décrivant les processus en jeu dans le cycle de vie du brouillard;
- 2) Quantifier l'apport de l'observation satellitaire pour le diagnostic sur le cycle de vie du brouillard, et sa prévision à courte échéance;
- 3) Identifier les jeux de paramètres observés, au sol et par satellite, ayant une capacité descriptive ou prédictive de la variabilité de visibilité dans le cycle de vie du brouillard, en fonction de conditions atmosphériques et choix technologiques variés, et définir les dispositifs expérimentaux associés;
- 4) Evaluer la probabilité d'occurrence du brouillard sur quelques heures, et sa fiabilité, en fonction de divers choix technologiques et des conditions atmosphériques variées.

## Résultats escomptés :

- 1) Une climatologie des événements de visibilité réduite (due aux panaches d'aérosols, à la brume, et aux brouillards) en région parisienne, déduite de la base de données générée par ce projet;
- 2) Quantification de la pertinence de l'observation satellitaire géostationnaire pour le diagnostic sur le cycle de vie du brouillard;
- 3) Identification des paramètres clé descriptifs et prédictifs de la variabilité de la visibilité dans le cycle de vie du brouillard et du dispositif expérimental associé;
- 4) Une paramétrisation de la probabilité d'occurrence de l'événement brouillard, sur quelques heures, en fonction de différents jeux de prédicteurs et par des conditions atmosphériques variées, accompagnée de sa fiabilité.

## Déroulement général du projet :

La première étape consistera à générer la **base de données expérimentale dédiée à l'observation des processus en jeu dans le cycle de vie du brouillard**. Nous allons profiter de l'infrastructure offerte par le Site d'Expérimentation de l'Institut Pierre-Simon Laplace (SIRTA) où est déjà opéré un dispositif instrumental sophistiqué dédié à l'observation de l'atmosphère. Le dispositif sera complété par des instruments destinés à mieux sonder les propriétés des aérosols et du brouillard. La climatologie du brouillard pourra alors être estimée à partir de cette base de données, qui sera ensuite complétée des données d'observation de la mission satellite METEOSAT Second Generation (MSG) et du réseau météorologique de Météo France. En deuxième étape nous nous appuierons sur les données sol pour **évaluer la pertinence de la détection par satellite des événements de visibilité réduite au niveau de la surface**.

Dans la troisième étape, nous appliquerons une méthode statistique pour identifier les jeux de paramètres clé ayant une capacité descriptive et prédictive du changement de visibilité dans le cycle de vie du brouillard, sur quelques heures et à l'échelle locale. Nous évaluerons les apports de la mesure de terrain et de l'observation satellite, au diagnostic et à la prévision des brouillards (visibilité < 1000 m, humidité relative > 99%). Les événements de visibilité réduite (visibilité < 5000 m) dus à des aérosols hydratés formant la brume, quand l'humidité relative est élevée, seront également considérés comme ils constituent une phase du cycle de vie de certains brouillards. Nous montrerons l'importance de la mesure des propriétés des aérosols pour décrire et prévoir le brouillard

La quatrième étape consistera à développer une méthode permettant de définir des niveaux de probabilité d'occurrence des événements de formation et de dissipation du brouillard sur le SIRTA. Nous testerons également la fiabilité de la méthode quand le jeu de données disponible n'est pas optimal, mais est fourni par des dispositifs expérimentaux plus répandus: station météorologique, observation satellite, modélisation numérique. Cela permettra en outre de confronter la méthode à des conditions atmosphériques non observées sur le SIRTA. La validation de la méthode sera opérée par les mesures réalisées de manière continue au SIRTA.

Des discussions prévues avec des collègues de Météo France / Direction de la Prévision (DP) qui empruntent une démarche parallèle à la nôtre en appliquant une méthode statistique à des données issues de simulations numériques auront pour but de: identifier ensemble les prédicteurs les plus pertinents; compléter les mesures par des champs de paramètres simulés; comparer nos résultats avec des prévisions numériques météorologiques. Le détail du déroulement du projet est présenté en section 8.

## Contexte (voir annexe pour la bibliographie):

Le phénomène du brouillard est étudié à cause de l'impact avéré et direct de la réduction de visibilité sur des activités majeures de nos sociétés, comme le déplacement et la surveillance [Gultepe *et al.*, 2007]. L'intensification des activités de transport maritime, aérien et terrestre s'accompagne du besoin renforcé de prévoir avec précision dans l'espace et dans le temps son apparition, son développement, son intensité et sa dissipation. Cependant la mise en œuvre de solutions doit tenir compte des profonds bouleversements qui marquent notre environnement. En effet l'extension et la densification des agglomérations urbaines, accompagnées de l'augmentation des besoins en carburants, affectent la qualité de l'air, le changement du climat, et l'utilisation des sols, qui sont eux-mêmes des paramètres liés au brouillard. Par exemple, Vautard *et al.* [2009] estiment qu'une amélioration de la qualité de l'air en Europe a entraîné une diminution de la fréquence des brouillards, avec pour conséquence une amplification du réchauffement climatique.

De nombreuses mesures de terrain ont été réalisées pour décrire les mécanismes en jeu dans le brouillard. Dès les années 60, les granulométries des particules étaient mesurées pour établir les relations entre les aérosols et la microstructure du brouillard [Eldridge, 1966]. Des événements de brouillard ont été documentés dans les années 80 et 90 par des campagnes se focalisant sur l'observation de certains processus dans certaines conditions atmosphériques: aux Pays Bas [Musson-Genon, 1987]; sur la côte Est des Etats-Unis [Fitzjarrald and Lala, 1989]; à Lille [Guedalia and Bergot, 1994; Bergot and Guedalia, 1996]; sur la vallée du Po en Italie [Fuzzi *et al.*, 1992 and 1998]. Les campagnes de mesure de la décennie suivante se sont efforcées de combiner sur le long terme l'observation in-situ et la télédétection pour décrire l'ensemble des processus physiques en jeu dans le cycle de vie du brouillard, incluant le rôle des aérosols. C'est le cas des campagnes réalisées au Canada en environnement continental (hiver 2005-2006) et maritime (étés 2006 et 2007) [Gultepe *et al.*, 2009], et de la campagne ParisFog réalisée en environnement péri-urbain au Sud de Paris [Bergot *et al.*, 2008; Haeffelin *et al.*, in press 2010], qui a été accueillie sur l'infrastructure pérenne du SIRTA qui exerce une surveillance continue et routinière de l'atmosphère.

L'acquisition de données pendant une saison entière pendant ParisFog permet de fournir une première ébauche de la climatologie du brouillard sur le plateau de Saclay: 150 heures de brouillard et 500 heures de brume sont observées pendant l'hiver 2006-2007, distribuées sur respectivement 37 et 109 jours [Bergot *et al.*, 2008; Haeffelin

*et al.*, in press 2010]. Ainsi, plus d'un jour sur deux de la saison automne-hiver est témoin d'un événement de brume ou de brouillard sur le SIRTa. L'analyse des mesures a permis d'évaluer l'implication des aérosols d'origine urbaine et du processus de condensation de l'eau dans l'extinction atmosphérique du rayonnement visible [Elias *et al.*, 2009]. Aussi, les processus en jeu dans le cycle de vie d'un brouillard radiatif ont été décrits, en termes de visibilité, d'impact radiatif, de concentration particulaire, de conditions thermodynamiques, et de dynamique atmosphérique [Elias *et al.*, 2009]. Le transport de pollution urbaine et la brume font partie du cycle de vie du brouillard comme les gouttelettes de brouillard se forment à partir d'aérosols hydratés de la brume, qui elle-même se forme dans un panache d'aérosols d'origine urbaine [Elias *et al.*, 2009], ainsi, alors que le brouillard dure 10 heures, le cycle de vie du brouillard s'étend sur environ 22 heures. La base de données a aussi été utilisée pour montrer l'impact des caractéristiques aérosols sur le cycle de vie du brouillard [Rangognio *et al.*, 2009]. Dans ce projet nous associons le CNRS-GAME (Unité associé CNRS-Météo France) comme partenaire pour leur expertise sur la mesure in situ des propriétés microphysiques des aérosols et des gouttelettes de brouillard, qui a déjà opéré sur le SIRTa à l'occasion des campagnes de mesures ParisFog et MEGAPOLI (<http://megapoli.lisa.univ-paris12.fr/>).

De manière complémentaire aux campagnes de mesures intensives, le réseau météorologique permet de dessiner une climatologie du brouillard en rendant compte de sa variabilité spatiale [Tardif and Rasmussen, 2007], et l'observation par satellite présente l'intérêt majeur d'offrir une couverture spatiale quasi totale du globe. Les données de METEOSAT Second Generation (MSG) [Schmetz *et al.*, 2002], opérationnel depuis début 2004, sont traitées dans le cadre du projet EUMETSAT/SAF Nowcasting pour offrir une typologie de la couverture nuageuse [MF/DP/CMS, 2009a]. Il est difficile de différencier brouillards et stratus bas avec un instrument qui survole la scène, comme la base de la formation nuageuse ne peut être observée. Brouillards et stratus bas sont alors joints dans une classe unique nommée Very Low Clouds (VLC), qui a été estimée fiable [MF/DP/CMS, 2009b]. Cependant les travaux de validation ne traitent pas spécifiquement du brouillard, séparément des stratus bas. La synergie sol-spatial peut être préférée pour garantir à la fois la précision sur les événements atmosphériques de surface et leur distribution spatiale. Ainsi le projet CARIBOU (Cartographie des Analyses du Risque de Brume et brOUillard, Météo France), associe le produit SAF Nowcasting et les mesures d'humidité relative et de radar, afin de produire une estimation probabiliste du risque de brume ou brouillard. Cependant pour la sécurité des transports les besoins sont de connaître la valeur de la visibilité avec une précision de l'ordre de quelques centaines de mètres. L'observation spatiale peut aussi être exploitée pour repérer les panaches d'aérosols qui ont le potentiel d'influencer les formations nuageuses, par ce qui est appelé l'effet indirect des aérosols [Lohmann and Feichter, 2005]. Une méthode prometteuse a été conçue à HYGEOS [Jolivet *et al.*, 2008] pour déduire de MSG la distribution spatiale à haute résolution temporelle de l'épaisseur optique des aérosols.

Deux modes d'acquisition ont été exposés: les campagnes de mesures sont essentielles pour mieux comprendre les processus physiques et améliorer la modélisation des phénomènes, et la mesure de routine est complémentaire pour décrire la climatologie des événements et valider les résultats de modélisation. ParisFog se situe à l'intersection de ces deux modes d'acquisition comme des mesures très détaillées ont été réalisées pendant une saison entière du brouillard. La même démarche est retenue pour ce projet dans le but de prolonger cette base de données. Plusieurs approches méthodologiques peuvent être adoptées pour traiter une telle base de données. Par exemple, un modèle de prévision numérique forcé par l'assimilation de données météorologiques et radiatives, acquises en routine sur un site unique, est la méthode adoptée par Météo France pour améliorer la prévision locale du brouillard à courte échéance. C'est le système Cobel-Isba [Bergot *et al.*, 2005; Bergot, 2007] opérationnel depuis 2005 sur l'aéroport Charles de Gaulle. Comme l'ensemble original de mesures sur le SIRTa permet d'explorer l'apport de processus non encore modélisés pour la prévision du brouillard, nous choisissons la méthode statistique.

Les méthodes statistiques offrent l'avantage d'une démarche exploratoire comme la connaissance physique 'a priori' n'est pas indispensable [Panofsky and Brier, 1958; Wilks, 1995]. La Direction de la Prévision (DP) de Météo France mène des travaux sur la prévision du brouillard par une méthode statistique, utilisant principalement les données issues de la modélisation numérique (ARPEGE, CEPMMT) et des réseaux météorologiques [Scherzinger, 2007]. Cependant Vislocky and Fritsch [1997] montrent que la performance est supérieure quand seuls des paramètres observés sont utilisés comme prédictors. L'action COST-722 conclut que les mesures antécédentes de visibilité et d'humidité sont les meilleurs prédictors, et que l'information sur la concentration particulaire peut améliorer les résultats [Scherzinger, 2007]. De plus Vislocky and Fritsch [1997] suggèrent que l'addition de données satellite devrait encore améliorer les résultats de prévision. Nous suivons dans notre projet ces recommandations et nous avons convenu avec Météo France /DP de partager nos expertises réciproques sur l'identification de prédictors originaux et la complémentarité de données issues de la modélisation et de l'observation. La méthode Generalised Additive Model (GAM) [Hastie and Tibshirani, 1990] est choisie car elle est 'data driven' c'est-à-dire que les relations, même non linéaires, entre les paramètres prédictors et prédicands ne sont pas imposées a priori. De plus la méthode permet de quantifier l'apport de chaque prédictor. Des collègues du LSCE ont souhaité apporter leur expertise sur cette méthode GAM [Vrac *et al.*, 2007].

# 1. Qualité de l'innovation et progrès par rapport à l'état de l'art

**Enjeux:** Le brouillard est source de perturbations dans les activités de transport à cause de: 1) la chute de la visibilité atmosphérique; et 2) la difficulté de prévoir les différentes phases du cycle de vie du brouillard (formation, développement, dissipation) de manière précise dans l'espace et dans le temps. En outre, l'impact des particules atmosphériques (de l'aérosol aux gouttelettes de nuages et brouillards) sur le champ radiatif (visible et infra rouge) concerne l'intérêt défense pour les activités de reconnaissance, mais aussi de guidage et de navigation sur les scènes d'opération. Enfin le brouillard intervient dans le cycle de vie de l'aérosol qui est un facteur essentiel du changement du climat et de l'impact de la pollution urbaine sur la santé. La problématique liée aux moyens de diagnostic et de prévision des événements de visibilité réduite (aérosols, brume, brouillard) est présentée en énumérant les points durs scientifiques et techniques sous forme de 4 questions qui sont commentées.

**1) Comment améliorer la prévision ?** Les modèles de prévision numérique du temps sont capables d'estimer si les conditions sont favorables au brouillard et les prévisionnistes peuvent estimer la probabilité d'occurrence du brouillard sur une période typiquement d'une demi journée et sur un domaine de l'ordre de 100x100 km<sup>2</sup>. Une meilleure précision et des échelles de temps et d'espace plus fines nécessitent l'exploitation d'expériences de terrain pour améliorer la modélisation numérique.

**2) Quel est l'apport de l'observation ?** Les mesures de terrain fédérées sur une station unique permettent d'évaluer avec précision les degrés d'implication des divers processus en jeu, et d'en suivre leur évolution temporelle. Les mesures permettent de décrire les propriétés dynamiques, radiatives, et thermodynamiques de la couche atmosphérique de surface, ainsi que les propriétés microphysiques et chimiques des aérosols et des gouttelettes, à de fines résolutions verticale et temporelle, et sur le long terme.

**3) Quelle stratégie d'observation ?** La synergie sol-spatial permet de combler le déficit de représentativité spatiale de la plateforme terrestre et aussi de valider les produits issus de l'observation satellitaire. La résolution temporelle de l'ordre de quelques dizaines de minutes étant un critère majeur concernant le brouillard, les données de la mission METEOSAT sont les plus aptes à compléter la base de données du SIRTA pour l'étude du brouillard. Elles offrent de plus la couverture des deux continents européen et africain. La mesure de données météorologiques en réseau est également un complément important des mesures de station

**4) Comment exploiter la base de données ?** La méthode statistique n'a pas encore été appliquée à cette base de données alors qu'elle permet de prendre en compte les relations non linéaires entre les paramètres décrivant les processus en jeu dans le cycle de vie du brouillard, et de les hiérarchiser en termes de capacités descriptives et prédictives. La méthode statistique va offrir des éléments de réponse à deux interrogations: quelles informations extraire d'une base de données très détaillée, et comment les rendre accessible à un utilisateur non expert.

## Aspects innovants:

1) Profiter d'un moyen unique et pérenne d'observation détaillée et simultanée des processus microphysiques, radiatifs et dynamiques de l'atmosphère, pour l'étude du brouillard en zone affectée par la pollution urbaine: l'observatoire SIRTA de l'IPSL rassemble des moyens de télédétection et des capteurs in-situ d'une dizaine de laboratoires français; il sera complété par des observations de la mission METEOSAT et des données du réseau météorologique;

2) Exploiter l'observation satellitaire pour détecter des événements de visibilité réduite exclusivement au niveau de la surface;

3) Utiliser des méthodes statistiques (méthodes additives généralisées) pour optimiser l'exploitation de la base de données la plus détaillée, afin d'en extraire l'information la plus pertinente, et d'explorer l'impact de processus non encore considérés dans la modélisation numérique.

## Retombées scientifiques et techniques:

1) Création d'un cadre technique et scientifique unique en France pour l'étude expérimentale des processus physiques en jeu dans le brouillard: équipes composées d'experts en observation depuis le sol (HYGEOS, CNRS-IPSL, CNRS-GAME), à partir de l'espace (HYGEOS, CNRS-IPSL), en modélisation numérique (CNRS-IPSL, Météo France) et en méthodes statistiques (CNRS-IPSL, Météo France).

2) Définition d'un système expérimental opérationnel pour la prévisibilité locale du cycle de vie du brouillard, composé de 1) mesures sol, 2) mesures spatiales, et 3) la chaîne de traitement algorithmique adaptée.

## 2. Adéquation avec les orientations technologiques de la défense

Les résultats attendus du projet sont en bon accord avec les besoins thématiques et les objectifs exprimés dans le plan de Politique et Objectifs Scientifiques (POS) de la DGA et trouvent également leur place dans la liste des capacités technologiques (Plan stratégique de recherche et technologie de défense et de sécurité, PS R&T) préparée par la DGA.

### POS

En ce qui concerne le POS, la thématique de recherche sur le brouillard est un des axes principaux du domaine 9 (Environnement et Géosciences), et concerne directement l'axe prioritaire de ce domaine que sont les aérosols. L'accent est mis sur (i) le cycle « formation, développement, dissipation » du brouillard, (ii) l'étude des processus physiques (dynamiques, radiatifs, ...) par l'observation depuis l'espace et (iii) la prévisibilité de tels types d'événements (occurrence et statistiques). Plus généralement, les efforts doivent être déployés en faveur à la fois de mesures in situ et depuis l'espace, et de méthodes de calcul rapides de traitement des données, pour intégration dans des systèmes et des codes opérationnels (prévision à court et moyen terme), avec des retombées pour la modélisation de processus physiques. Le projet s'intègre donc dans une thématique plus générale qui est la connaissance du milieu pour une adaptabilité maximale des prévisions opérationnelles (repérage et navigation, guidage, mobilité).

### PS

Les thématiques développées dans notre projet répondent ainsi à des préoccupations répertoriées dans les deux axes R&T « Prévision météorologique » et « propriétés radiatives et transmissives de l'environnement atmosphérique et rayonnement de fonds naturel », pour les technologies déterminantes suivantes (PS R&T, DGA 2009):

- Prévision météorologique à moyen terme et immédiate
- Modélisation à moyenne échelle et dans les basses couches
- Modélisation des brumes et des brouillards
- Télédétection de paramètres météorologiques depuis le sol et depuis l'espace
- Propagation des UV, visible, IR, EM, lasers

### Liens DGA

Le projet ne fait pas suite à un PEA. Toutefois, la MRIS et la DT sont en relation avec le CNRS-IPSL/LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique) dans le cadre des « Projet Ecole »: convention Ecole Polytechnique – DGA, projet LMD suivi par Pierre Hugué (DGA/DT). En particulier le porteur du projet a été chargé de l'analyse de la base de données de la campagne ParisFog dédiée aux processus physiques en jeu dans le cycle de vie du brouillard, sous un contrat de travail au CNRS-IPSL/LMD, financé par la convention.

Nous avons pris contact avec Mme Elisabeth Gibert-Brunet, responsable du Domaine « Environnement et Géosciences » de la DGA/MRIS, à l'occasion de la soumission de ce projet au dispositif REI. Le sujet d'étude a été reçu favorablement, il a néanmoins été jugé nécessaire de nous laisser répondre à des demandes de précision requises par des rapporteurs scientifiques indépendants. Suite aux remarques faites, nous avons complété notre projet sur les aspects « modélisation et statistiques » et « extension géographique ».

D'autre part, une feuille de route R&D en météorologie pour les Armées a été préparée par la DGA, le SHOM et Météo-France au cours de l'année 2004. Elle a pu être présentée à la commission Météo-Défense et aux Etats Majors pour critique et mise à jour au cours du premier trimestre 2005. Les documents de référence, à la date du 31 août 2005 sont : (i) la Feuille de Route de réf DGA n° AA/04/176975/DGA/DSP/STTC/DT/EN ; (ii) la présentation powerpoint faite aux JEMHO du 9/06/2005.

La Feuille de Route R&D décrit les thèmes de R&D prioritaires pour la défense parmi lesquels on trouve les études sur le brouillard, et en particulier les applications satellitaires (MSG) dans les études sur le brouillard et les nuages bas. Ces études ont été intégrées en 2009 dans un plan d'actions à dominante recherche.

## 3. Valorisation du projet

### 3.1. Caractère stratégique du projet pour les partenaires

(Décrire en quoi le projet est stratégique dans les objectifs et les orientations des partenaires impliqués)

(1 page maximum)

L'intérêt commun des 3 partenaires principaux est de démontrer leur expertise sur le sujet des processus en jeu dans le brouillard, et conjointement de définir un cadre technique et scientifique unique en France pour l'étude de l'influence de la pollution urbaine sur le cycle de vie du brouillard. Le projet de trois ans fournira des résultats qui pourraient déboucher sur des applications opérationnelles pour améliorer la prévisibilité du brouillard, et initiera une surveillance sur le long terme des caractéristiques particulières à la surface sur le SIRTA, dans un contexte de changement climatique et d'influences anthropiques sur la qualité de l'air. Les intérêts stratégiques spécifiques à chaque partenaire sont décrits ci-dessous.

Il s'agira pour HYGEOs de la première collaboration avec des unités de recherche majeures du CNRS (IPSL et GAME) dans leur domaine de compétences (observation des propriétés de l'atmosphère depuis l'espace), créant un fort potentiel pour de futures collaborations. En outre, ce sera l'occasion de diversifier ses thématiques d'application et de tester une méthode complémentaire d'analyse de bases de données. HYGEOs appliquera ses propres outils à un nouvel objet d'étude, qui est le brouillard et les événements particuliers au niveau de la surface. L'association avec l'observation depuis une plateforme terrestre permettra de sonder les propriétés de la couche atmosphérique de surface en s'appuyant sur l'observation satellitaire. La base de données du SIRTA permet de plus de valider les produits satellitaires.

Le projet permet à HYGEOs d'acquérir la maîtrise de nouveaux outils (analyse de bases de données issues de l'observation depuis la surface et méthode statistique) et de développer une nouvelle branche d'activités au sein du groupe.

- Le CNRS est engagé dans la recherche sur les processus physiques dans l'atmosphère. Pour cela, il met notamment en œuvre l'observatoire atmosphérique SIRTA. Le projet est stratégique pour les unités du CNRS impliquées car il va permettre de :
- Accroître leurs expertises sur la physique de l'atmosphère à travers l'analyse des nouvelles observations.
- Quantifier par des méthodes statistiques les apports individuels et combinés de mesures in-situ, mais également de mesures satellitaires.
- Renforcer les collaborations entre les unités IPSL/LMD et GAME du CNRS, et par ce moyen, la collaboration CNRS – Météo-France sur les processus physiques associés au brouillard.
- Etendre le domaine de valorisation des recherches CNRS vers des secteurs plus opérationnels à travers la collaboration avec la société HYGEOs.

## 3.2. Perspectives d'application civile et militaire

(Donner les marchés potentiels visés et décrire le positionnement ou l'évolution des partenaires du projet dans ces marchés : atouts et faiblesses des acteurs au regard des marchés visés. Décrire les applications potentielles défense. Enoncer les risques pesant sur la valorisation du projet)

(2 pages maximum)

### Marché visé:

Le projet proposé est tout à fait dual. Les domaines d'application visés, tant civils que militaires, sont d'abord l'aéronautique (civile et militaire) et le spatial. Mais d'autres secteurs pourraient être aussi concernés. Ainsi l'étude contribue aux « systèmes C3R (commandement, contrôle, communications, renseignement) [...] qui permettent l'acquisition, le traitement et l'exploitation de l'information. Le Livre blanc leur fait une place importante au travers des priorités qu'il place sur les fonctions connaissance et anticipation, en matière de guerre en réseau et d'interopérabilité tant interalliée que civilo-militaire, ainsi qu'en matière d'informations géophysiques. » (PS R&T, DGA 2009). Le projet s'applique aux trois domaines couverts par les systèmes C3R, c'est-à-dire la surveillance (visibilité au niveau de la surface), la planification et la décision du commandement stratégique, opératif ou tactique (par un système de prévision immédiate du brouillard), et les données d'environnement (particulaire, radiatif, ...). Le marché visé concerne à la fois les applications météorologiques civiles, en étroite collaboration avec Météo France, ainsi que le traditionnel marché des études techniques pour les agences spatiales telles EUMETSAT, par exemple pour la validation, l'amélioration et la valorisation du produit brouillard de METEOSAT.

### Atouts:

Les principaux atouts des acteurs sont leur complémentarité vis-à-vis des techniques envisagées et leurs expertises reconnues dans leurs domaines de compétence respectifs. L'expertise sera rassemblée pour le sondage expérimental depuis la surface et depuis l'espace, la constitution de la base de données, son exploitation par une méthode statistique, l'interprétation des résultats dans un contexte d'influence humaine sur le climat et la qualité de l'air. HYGEOSS a pour vocation de faire le pont entre applications, standards industriels et laboratoires de recherches. A l'occasion HYGEOSS se comporte également comme laboratoire privé en développant notamment des activités de recherche académique aboutissant à des publications ou encadrements de thèses CIFRE. De plus HYGEOSS travaille en étroite collaboration depuis sa création avec les agences spatiales, autour du développement ou de la validation de produits géophysiques à partir de l'observation satellitaire. HYGEOSS possède les compétences d'analyse des données de MSG: étalonnage radiométrique en vol [Jolivet et al., 2009], détection des sédiments en suspension dans les eaux côtières de la mer du Nord [Neukermans et al., 2009]. HYGEOSS est également développeur d'un produit aérosol aux dessus des terres émergées à partir de MSG pour le compte du Climate Monitoring SAF d'EUMETSAT et du CNES [Jolivet et al., 2008]. De façon générale, l'expertise principale d'HYGEOSS concerne le transfert radiatif dans le système océan-atmosphère et son application à l'analyse des observations spatiales de l'atmosphère, la biosphère continentale et l'océan.

### Applications Défense :

Le projet va permettre d'exploiter des paramètres observés décrivant les processus en jeu dans le cycle de vie du brouillard pas encore intégrés dans les modèles numériques. Selon le degré d'implication de ces paramètres dans la fiabilité des prévisions, qui sera évalué par la méthode proposée, les utilisateurs pourront étudier l'intégration de la modélisation de ces paramètres originaux dans les modèles numériques actuels. Il faut ajouter que:

- le projet allie à la fois mesures sur le terrain et données satellitaires pour la détection du brouillard par imagerie spatiale ;
- le projet permettra l'identification de paramètres nécessaires et suffisants (restriction du nombre de paramètres et donc de mesures) pour une prévision optimale par rapport aux autres modèles d'aide à la décision.

**Risques:**

Les risques sont à la fois techniques (acquisition des données de terrain, faiblesse des épisodes de brouillard sur la durée de l'étude, ...) et non techniques car ils sont inhérents au caractère recherche du projet (même dans sa phase d'interprétation des données et de modélisation). Les performances de la modélisation qui seront réellement atteintes seront toutefois largement supérieures à celles que l'on obtient actuellement, mais cette amélioration n'est pas quantifiable précisément pour le moment. Nous énumérons ici les résultats escomptés selon trois niveaux de succès.

**Succès partiel:**

- Base de données complète
- Validation du produit brouillard METEOSAT.
- Hiérarchisation des paramètres in situ et satellites à mesurer

**Succès nominal:**

- Paramètres mesurés suffisants et modèles statistiques performant, nos scores de prédiction sur le plan local sont supérieurs à l'état de l'art, mais pas pour tous les types de brouillard rencontrés

**Succès total:**

- Les scores de prédiction sont supérieurs à l'état de l'art pour tous les types de brouillard rencontrés
- Perspectives d'amélioration du produit brouillard à partir de METEOSAT

### **3.3. Perspectives d'industrialisation, de normalisation et de brevets**

(Décrire les perspectives identifiées en termes d'industrialisation, de contribution à la normalisation, de brevet et de diffusion des résultats des travaux)

(1 page maximum)

Les perspectives d'industrialisation sont la mise au point d'un service opérationnel de prévision de la visibilité. Il sera avant tout protégé par le savoir faire et les connaissances acquises durant l'étude. Il sera nécessaire cependant de passer par une autre phase amont avec un prototype sur une zone pilote. Nous n'envisageons cependant pas de brevets. Un autre débouché industriel est la mise au point d'un algorithme avancé pour EUMETSAT afin de fournir un produit brouillard amélioré à partir des données de la mission METEOSAT Second Generation, y compris de la nouvelle mission METEOSAT Third Generation à venir en 2015.

Des chercheurs associés aux principaux partenaires ont exprimé leur intérêt à exploiter les résultats en participant comme co-auteurs à des publications scientifiques, sur des sujets comme l'évolution de l'occurrence du brouillard dans le contexte d'un environnement changeant (changement climatique, urbanisation, qualité de l'air). Les travaux seront présentés à plusieurs conférences, dont la conférence SPIE, qui se positionne à l'intersection entre les monde de la recherche et de l'entreprise.

D'autres perspectives sont aussi créées comme le développement instrumental de la station de mesures du SIRT, avec des instruments commerciaux ou des prototypes de laboratoire, et comme l'amélioration des prévisions de brouillard par les modèles météorologiques numériques. A l'issue du projet, des recommandations seront énoncées pour perfectionner l'équipement instrumental des stations existantes pour une meilleure prévision locale et à courte échéance du brouillard. En l'absence d'un tel dispositif optimal, les résultats de l'étude pourront néanmoins aider à la mise en œuvre opérationnelle de la détection du brouillard, quelque soit le dispositif expérimental disponible, en tirant le meilleur profit de l'observation satellitaire et de la modélisation numérique de champs 3D de paramètres météorologiques.

## 4. Incitativité de l'aide

(Expliquer en quoi l'aide apportée au projet est un facteur accélérant les travaux ou encourageant un démarrage de la réalisation de travaux. Expliquer l'effort global sur la R&D des partenaires)

(1 page maximum)

Les données d'observation et les méthodologies développées dans les laboratoires ont besoin d'être exploitées pour fournir des produits utilisables par la communauté la plus large d'utilisateurs, comprenant des non spécialistes. La collaboration va initier une prise en main des données du SIRTA par HYGEOs. Pour cela une collaboration étroite entre organisme de recherche et société d'étude est primordiale. Les partenaires sont deux unités de recherche du CNRS et le porteur du projet est une société d'ingénierie. La collaboration est assurée par le financement d'un CDI pour embaucher un chercheur qui a précédemment réalisé des missions d'étude au CNRS-IPSL et au CNRS-GAME, acquérant la maîtrise de la base de données du SIRTA concernant le brouillard, et qui possède une expertise sur les processus en jeu dans le cycle de vie du brouillard, ainsi que sur les propriétés microphysiques et optiques des aérosols. HYGEOs va pouvoir se positionner sur des applications météorologiques de l'observation satellitaire, et gagner la maîtrise d'outils d'analyse de données acquises depuis la surface.

L'aide demandée est tout à fait nécessaire au démarrage du projet du côté d'HYGEOs, le projet étant la condition sine qua non pour aller vers les applications.

## 5. Retombées économiques

(Expliquer quelles seront les retombées potentielles dues au projet en termes d'emploi (accroissement, maintien de compétences), d'investissement (renforcement de sites industriels), de structuration d'une filière ou d'anticipation de mutations industrielles) ou de localisation des emplois.

(1 page maximum)

HYGEOS est une structure de recherche et de développement qui assure sa pérennité en proposant continuellement des produits perfectionnés et des études innovantes. Plus de 35% de son CA couvre des activités de R&D et quasiment tout son CA recouvre des études clients pour lesquelles la part de recherche et d'innovation est très importante. Outre l'embauche en CDI d'un nouvel ingénieur de recherche sur cette thématique, on peut considérer qu'il est primordial pour le maintien de la société de prospecter sur un nouveau secteur d'application, pour ouvrir un nouveau marché de clientèle et offrir l'opportunité de collaboration avec un nouveau centre de compétences. Un CDD sera aussi créé à hauteur d'un an de financement.

Les capacités instrumentales ainsi que l'exploitation des données issues du SIRTAs seront toutes deux renforcées, créant de meilleures perspectives d'utilisation de ces données par des non experts (entreprises, collectivités, ...).

## 6. Pertinence et qualité du partenariat

### 6.1. Complémentarité

Le projet permet de fédérer les expertises technique et scientifique autour des thématiques de l'observation des processus dans le cycle de vie du brouillard et de la prévisibilité du changement de visibilité dû aux particules de la couche atmosphérique de surface, des aérosols aux gouttelettes de brouillard. Le projet va exploiter les compétences acquises sur le traitement de la base de données du SIRTa en stabilisant l'emploi de Thierry Elias, porteur de ce projet, qui a travaillé à l'IPSL/LMD à l'occasion de la campagne ParisFog (actuellement en CDD à l'IPSL/LSCE sous contrat CEA) et qui rejoindra HYGEOS grâce au financement de ce projet. La maîtrise de la base de données (SIRTa + METEOSAT) sera partagée entre les équipes technique et scientifique de l'IPSL/LMD, du CNRS-GAME et de HYGEOS [Elias *et al.*, International Radiation Symposium 2008, Elias *et al.*, 2009]. De plus HYGEOS possède une longue expérience du traitement des données d'observation par satellite [Ramon and Santer, 2001; Jolivet and Feijt, 2005; Santer *et al.*, 2005; Jolivet *et al.*, 2007; Elias *et al.*, 2008] et en particulier de celles provenant de la mission METEOSAT Second Generation pour la couleur de l'eau [Jolivet *et al.*, 2006] mais aussi pour la surveillance des panaches d'aérosols [Jolivet *et al.*, 2008]. Associée au savoir-faire sur la mesure de terrain [Elias *et al.*, 2006; Elias *et al.*, 2009], il peut alors être garanti une évaluation détaillée de la pertinence du produit 'brouillard' fourni par MSG, et une estimation du potentiel de ces données à contribuer à l'étude du phénomène de brouillard. Enfin l'expertise existe à l'IPSL (LMD et LSCE) sur les méthodes statistiques [Vrac *et al.*, 2007; Salameh *et al.*, 2008]. La complémentarité entre observation et modélisation numérique sera évaluée grâce à la collaboration avec Météo France / DP. Principaux participants et collaborateurs extérieurs sont présentés dans le Tableau 2, avec leurs champs de compétences. Voir l'annexe pour la bibliographie.

Tableau 2. Principaux participants et collaborateurs extérieurs sur le projet.

	<i>Affiliation</i>	<i>Participants/ collaborateurs</i>	<i>Champs de compétences</i>
Principaux participants	HYGEOS	Thierry Elias Didier Ramon	Microphysique et optique des particules Transfert radiatif dans l'atmosphère Télédétection passive sol et spatiale Observation in situ
	CNRS-IPSL/LMD	Jean Charles Dupont Martial Haeffelin Florian Lapouge Yohann Morille Christophe Pietras	Transfert radiatif dans l'atmosphère Nuages et brouillard Télédétection active et passive Traitement du signal Mise en œuvre instrumentale et expérimentale
	CNRS-GAME	Laurent Gomes Frédéric Brunet	Propriétés microphysiques des nuages, brouillard et aérosols Observation in situ
Collaborateurs extérieurs	CNRS-IPSL/LSCE	Mathieu Vrac Pascal Yiou	Dynamique atmosphérique Climat Méthodes statistiques
	Météo France / DP	Gwenaëlle Hello Harold Petithomme	Méthodes statistiques Prédicteurs brouillard
	CNRS-LMD	Philippe Drobinski Thomas Dubos	Micro-météorologie Fluides turbulents Stabilité hydrodynamique Modélisation numérique

### 6.2. Accord

Il est prévu de mettre en place une convention de collaboration entre HYGOES et le CNRS relative au travail proposé dans l'étude soumise au dispositif RAPID. L'accord portera notamment sur l'engagement des parties à ne pas divulguer les connaissances antérieures appartenant à l'autre partie. Les connaissances antérieures de chaque partie resteront leurs propriétés respectives. L'accord portera également sur les modalités de communication et d'exploitation des résultats et savoir-faire issus de l'étude. Les résultats et savoir-faire issus de l'étude, mais dont le coût est pris en charge par une des parties, seront la propriété de cette partie. Les résultats et savoir-faire issus de l'étude et co-financés par les deux parties seront la propriété conjointe des parties.

## 7. Cohérence du projet

(Montrer la cohérence des différentes parties du projet, et l'adéquation du calendrier et du budget avec les objectifs, après avoir rappelé succinctement les objectifs visés et les moyens de les mesurer.)

(1 page maximum)

Les objectifs sont rappelés :

- 1) Etendre une base de données d'observation, depuis le sol et par satellite, des propriétés de l'atmosphère à la surface et sur la colonne atmosphérique, et des propriétés microphysiques et optiques des aérosols, décrivant les processus en jeu dans le cycle de vie du brouillard;
- 2) Quantifier l'apport de l'observation satellitaire pour le diagnostic sur le cycle de vie du brouillard, et sa prévision à court terme;
- 3) Identifier les jeux de paramètres observés, au sol et par satellite, ayant une capacité descriptive ou prédictive de la variabilité de visibilité dans le cycle de vie du brouillard, en fonction de conditions atmosphériques et choix technologiques variés, et définir les dispositifs expérimentaux associés;
- 4) Evaluer la probabilité d'occurrence du brouillard sur quelques heures, et sa fiabilité, en fonction de divers choix technologiques et des conditions atmosphériques variées.

Les deux premières actions concernent directement les deux premiers objectifs, alors que les deux objectifs suivants sont atteints par chacune des actions 3, 4, 5 qui sont l'application de la même méthode sur différents jeux de données provenant de la base de données constituée par les actions 1 et 2. Le calendrier est proposé dans la Figure 1.

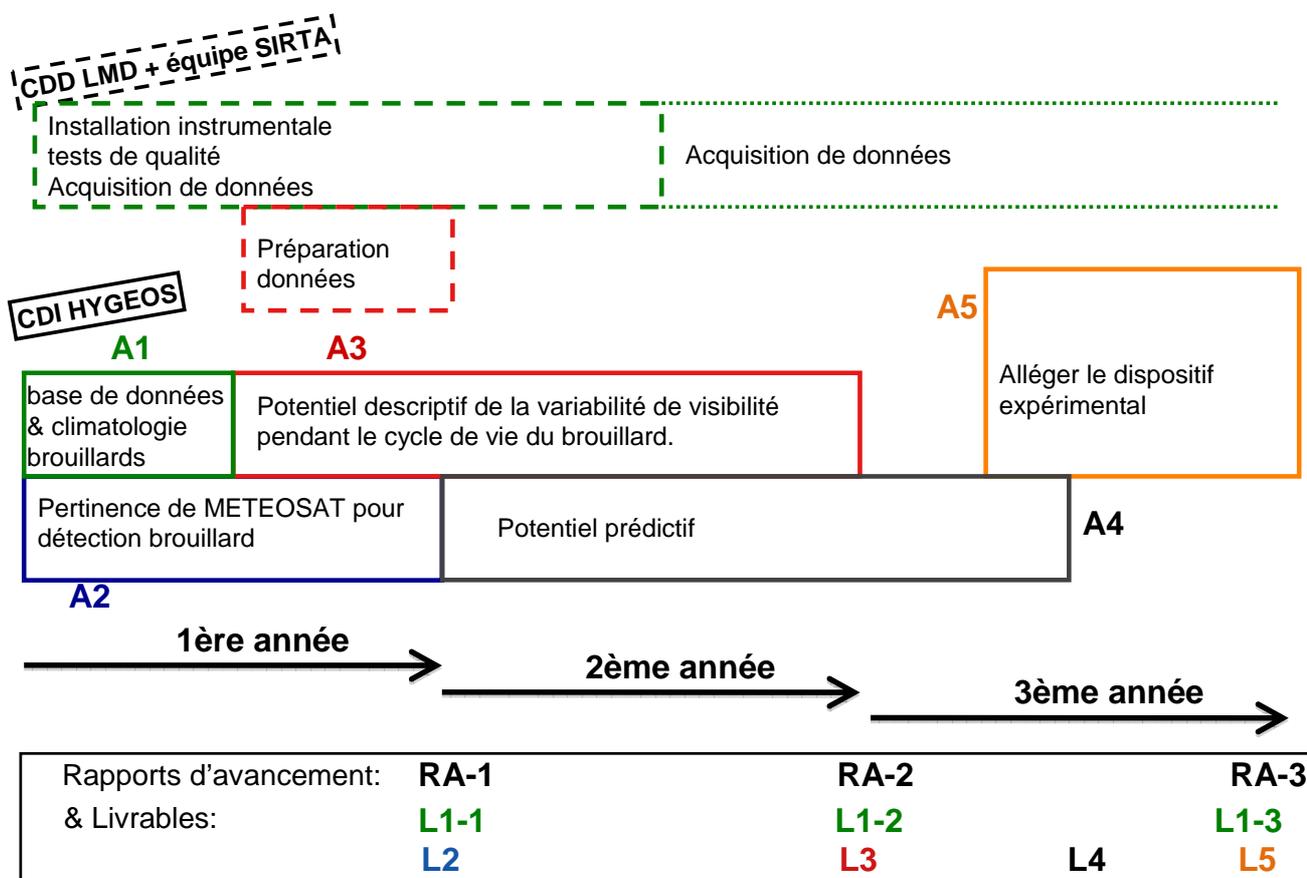


Figure 1. Programme de travail du projet PréViBOSS : 5 actions A1, ... ; Livrables correspondantes L1, ...

## 8. Contenu détaillé des travaux envisagés

(Présenter le détail du contenu des travaux sous forme de « fiches de lots » (ou équivalent), les responsabilités de chaque partenaire, le prix du lot, le déroulement et le phasage des lots de travaux, l'identification de points éventuels d'arrêt du projet. Donner aussi la liste des sous-traitants auxquels chaque partenaire fera appel et des travaux qui leur seront confiés.)

Il a été montré que le cycle de vie du brouillard s'étend au-delà des heures de brouillard, et qu'il inclut les processus de transport et d'hydratation qui affectent les conditions particulières, des aérosols secs (de pollution ou d'origine maritime et continentale) aux gouttelettes de brouillard en passant par les aérosols hydratés de la brume. Ainsi, pour atteindre l'objectif de mieux comprendre le cycle de vie du brouillard et son impact sur la visibilité atmosphérique, les objets d'étude concernent tous les événements de visibilité réduite à la surface, comprenant les panaches d'aérosols et la brume, comme ils font partie du cycle de vie du brouillard.

### Actions et livrables associés, Version de base et Option

#### **Action A1. Sonder les processus physiques en jeu dans le cycle de vie du brouillard**

Responsable: CNRS-IPSL, partenaires: HYGEOS et CNRS-GAME, collaborations avec Météo France et EUMETSAT respectivement pour la fourniture des données du réseau météorologique et satellite

Objectif: L'objectif de cette action est de réaliser une description expérimentale détaillée des processus en jeu sur tout le cycle de vie du brouillard. L'impact de divers processus sur les conditions atmosphériques sera suivi à une grande résolution temporelle grâce à l'instrumentation pérenne du SIRTA (Tableau 1) complétée des instruments désignés ci-dessous et prêtés par le CNRS-GAME (Tableau 1): bilan radiatif de la couche atmosphérique de surface et transmission optique du rayonnement visible, propriétés optiques et microphysiques des particules, dynamique atmosphérique dont la turbulence et le transport de particules et de vapeur d'eau, condensation de la vapeur d'eau sur les aérosols, changement des conditions thermodynamiques de la couche atmosphérique de surface ... Une base de données multi-paramètres et pluri-annuelle documentant les événements de visibilité réduite sera générée, qui sera traitée pour produire une climatologie des événements turbides causés par les aérosols, la brume, et le brouillard en région parisienne.

Perspectives: Fédération des compétences expérimentales pour la mesure des processus atmosphériques en jeu dans le cycle de vie du brouillard, dans un environnement changeant (changement climatique, urbanisation, qualité de l'air).

Protocole: L'observatoire SIRTA est le plus approprié pour supporter cette activité par le caractère pérenne de l'acquisition instrumentale qui y est opérée, sur un mode opérationnel et routinier. L'expertise acquise lors de la campagne de mesures ParisFog menée sur le SIRTA, en collaboration avec le CNRS-GAME et le CEREAS, nous permet d'identifier l'équipement complémentaire utile à ce projet, défini ci-dessous. La base de données sera encore étendue en y intégrant les données issues de l'observation par le satellite METEOSAT Second Generation (MSG) et aussi par des mesures réalisées par le réseau météorologique de Météo France. Les données de MSG seront téléchargées, et l'accès aux données du réseau météorologique sera traité avec Météo France.

L'installation des nouveaux instruments sur le SIRTA sera suivie par une surveillance de leur fonctionnement et par leur maintenance. Les signaux mesurés sur le SIRTA seront traités pour obtenir des produits géophysiques dont la qualité sera assurée en opérant des intercomparaisons et des tests de fermeture. Les données seront ensuite intégrées dans la base de données du SIRTA. Les événements de visibilité réduite mesurés sur plusieurs années seront classés en fonction de divers paramètres: fréquence, durée, intensité, nature, conditions météorologiques, sur les modèles de Tardif [2008] et du rapport 2007-2008 de la convention Ecole Polytechnique – DGA [Elias *et al.*, 2008].

La couverture temporelle de la base de données sera variable selon le jeu de données considéré: paramètres météorologiques du réseau de Météo France sur plus d'une décennie, observation satellite par MSG opérationnelle depuis début 2004, et sondage exhaustif de l'atmosphère pendant plusieurs saisons sur le SIRTA. De plus le réseau météorologique et l'instrument satellitaire permettent d'étendre la couverture spatiale de l'observation et de couvrir différentes zones géographiques.

### Dispositif expérimental à acquérir:

1. Un visibilimètre pour une climatologie des événements de visibilité réduite à partir de la série temporelle des mesures de visibilité (extinction du rayonnement visible): heures d'apparition et de dissipation des brumes et brouillards, degré d'opacité du brouillard, évolution temporelle.
2. Un instrument de mesure in situ du contenu en eau liquide (Gerber-PVM-100) pour caractériser la couche de surface du brouillard. Les résultats de la campagne de mesures ParisFog indiquent qu'il est important de mesurer la distribution en taille des particules sur une gamme étendue. Comme plusieurs instruments sont nécessaires pour balayer des aérosols sub-micrométriques aux gouttelettes super- micrométriques, il est important d'inter étalonner les différents instruments. Le CNRS-GAME installera trois compteurs de particules sur le SIRTA, le SMPS dédié aux aérosols sub-micrométriques, le Fog Monitor (DMT-FM100) dédié aux gouttelettes de brouillard et le WELAS-2000 (Tableau 1) réalisant la jonction entre les deux précédents. Le compteur d'aérosols sub-micrométriques permet de repérer le transport de pollution urbaine comme cause de la chute de visibilité en conditions non encore saturées d'humidité, et d'évaluer l'apport en noyaux de condensation, en tenant compte des mesures par le compteur de noyaux de condensation nuageuse (DMT-CCNC-100) aussi installé par le CNRS-GAME. Le compteur de particules super-micrométriques (FM100) utilisé en conditions ambiantes permet de suivre les caractéristiques microphysiques de la condensation de l'eau sur les particules, et de quantifier son impact sur la visibilité, le bilan radiatif et le dépôt. Avec le visibilimètre, ces 6 instruments permettent de réaliser des études de fermeture en toutes conditions atmosphériques, pour s'assurer de la fiabilité de la restitution des propriétés microphysiques et optiques des aérosols au niveau de la couche atmosphérique de surface.
3. La mesure de l'eau liquide intégrée sur la colonne atmosphérique, pour des couches à très faible contenu, typique des brouillards, à partir du radiomètre micro-onde à 30 GHz (Tableau 1) est entachée d'une incertitude qui approche 50%, ce qui n'empêche pas son exploitation, mais limite considérablement la précision des études de fermeture. Pour réduire cette incertitude à 20%, il faut intégrer un canal Infra Rouge. Connaissant les propriétés des particules à la surface, le contenu intégré sur la colonne fournit une indication sur le profil vertical: épaisseur de la couche de brouillard et présence de nuage au dessus du brouillard.

### Planning:

T0 à T0+12 mois: installation des instruments (visibilimètre, puis radiomètres, puis granulomètres); tests de qualité; et téléchargement des données complémentaires (MSG + réseau météo);

T0+12 à T0+36 mois: acquisition des données en mode routine; interprétation de la base de données en termes d'occurrences d'aérosols à la surface, de brume et de brouillard.

### Livrables:

**L1-1 à T0+12 mois, L1-2 à T0+24 mois, L1-3 à T0+36 mois.** Documentation sur la base de données du SIRTA (données routinières et données spécifiques financées dans le cadre du projet REI), et climatologie des aérosols, de la brume et du brouillard sur le SIRTA.

Nombre de UO: 3 (CDI HYGEOS) + 3 (CDD CNRS-IPSL/LMD) + 6 (CDD CNRS-GAME).

## **A2. Détecter le brouillard depuis l'espace (MSG): évaluer l'apport du produit EUMETSAT**

Responsable: HYGEOS, partenaire: IPSL/LMD

Objectif: pour spatialiser l'information sur l'état de l'atmosphère et dans la perspective d'exporter sur un autre lieu les résultats de notre étude, il est important de s'appuyer sur l'observation spatiale. Il est d'abord nécessaire de vérifier la fiabilité du traitement de la mesure spatiale, pour identifier la présence de brouillard, en s'appuyant sur les mesures de visibilité et d'humidité relative du réseau météorologique. La documentation précise et détaillée des conditions de surface délivrée par les mesures de la plateforme SIRTA servira pour expliquer les incohérences révélées entre l'observation sol et l'observation satellite.

Protocole: La typologie nuageuse délivrée par le projet 'Nowcasting SAF' de EUMETSAT, et issue du traitement de l'observation par METEOSAT Second Generation (MSG), sera comparée aux preuves de terrain. Les données de flux radiatif descendant (visible et infra rouge) renseignent sur la présence d'une couverture nuageuse au dessus du site, et les données de visibilité et d'humidité relative sur la présence de brouillard au sol. Les données du réseau météorologique seront alors exploitées dans un premier temps, sur plusieurs régions et sur une série temporelle étendue jusqu'à la durée de fonctionnement de MSG. Alors que la typologie du SAF Nowcasting confond la présence de brouillard et de stratus bas par une classe unique 'Very Low Cloud' (VLC), nous nous focalisons uniquement sur la détection de brouillard par MSG. Chaque fois que l'alerte VLC sera enclenchée, nous utiliserons la capacité de détection du brouillard depuis le sol pour le distinguer du stratus bas. La proportion de brouillards sur toutes les alertes VLC pourra alors être estimée. Et à chaque fois que le brouillard est détecté depuis la surface, nous vérifions l'aptitude de la méthode SAF Nowcasting à pointer sur la classe VLC (ce qui peut ne pas être le cas si, par exemple, un nuage haut s'interpose entre brouillard et satellite). Nous obtiendrons alors le score de détection du brouillard par la méthode SAF Nowcasting. Dans un second temps, les données du SIRTA seront utilisées pour expliquer les alertes en échec, c'est-à-dire brouillard non détecté ou VLC enclenché sans brouillard ni stratus bas, en s'appuyant en particulier sur le sondage de la structure verticale de l'atmosphère exercée depuis plusieurs années.

Planning:

T0+6 mois à T0+18 mois: comparaison du produit VLC de EUMETSAT et des preuves de terrain.

Livrables:

**L2 à T0+12 mois.** L'apport de l'observation par METEOSAT et du protocole EUMETSAT au diagnostic à la surface, concernant les brouillards. Scores de détection simultanée (sol et spatial) et inventaire des désaccords et de leurs causes.

Nombre de UO: 6 (CDI HYGEOS).

### **A3. Diagnostic de la visibilité à partir d'un dispositif expérimental: identifier les paramètres les plus pertinents pour décrire la visibilité qui varie dans le cycle de vie du brouillard**

Responsable: HYGEOS, partenaire: CNRS-IPSL/LMD, collaborateurs extérieurs: CNRS-IPSL/LSCE pour expertise en méthode statistique et Météo France / DP pour l'identification des prédicteurs

Objectif: Identifier parmi les mesures, les paramètres les plus pertinents à décrire les processus qui pilotent le cycle de vie du brouillard, et à fournir le niveau de visibilité (au même instant) pendant le cycle de vie du brouillard, des conditions claires aux conditions turbides (de plus de 5000 m à quelques centaines de mètres de visibilité). Comme les aérosols participent aux conditions de formation du brouillard, ils seront considérés comme des composantes du cycle de vie du brouillard. Cette tâche permettra d'identifier les dispositifs expérimentaux, indispensable et optimal, pour estimer la visibilité avec une probabilité satisfaisante, et la paramétrisation associée faisant le lien entre paramètres mesurés et visibilité au même instant.

Perspectives: utiliser la paramétrisation pour 1) prévoir l'évolution de la visibilité à court terme, à condition que l'évolution temporelle des paramètres les plus pertinents puisse être connue (par modélisation numérique par exemple) ; 2) évaluer l'impact du changement climatique et de la qualité de l'air sur l'occurrence du brouillard.

Protocole: La base de données constituée en tâche A1 est exploitée en appliquant la méthode statistique GAM à différents jeux de données. La méthode GAM décrit des relations non linéaires entre des paramètres connus (les prédicteurs) et le paramètre recherché (le prédicteur), ici la visibilité. La méthode indique le poids avec lequel chacun des paramètres mesurés participe à estimer la visibilité au même instant. Ainsi un jeu de paramètres les plus pertinents à estimer la visibilité est sélectionné parmi le jeu de données d'entrée. Comme les prédicteurs et le prédicteur sont définis au même instant, les paramètres identifiés par la méthode sont définis comme descriptifs, pour différencier des paramètres prédictifs de la tâche suivante (A4), ainsi nous opérons ici un diagnostic du changement de visibilité.

Le jeu de données d'apprentissage de la méthode couvre 3 saisons de brouillard: base de données ParisFog (2006-2007), grossie de la base de données de la campagne de mesures MEGAPOLI (2009-2010), et des mesures réalisées pendant l'année 2 du projet. Selon les résultats de la campagne ParisFog (section 6.2), il est alors attendu de disposer de plus de 400 heures de brouillard et de plus de 1500 heures de brume. Les mesures MSG correspondantes seront additionnées, ainsi que celles du réseau météorologique sol pour tenir compte de la spatialisation de l'information.

La méthode GAM sera appliquée à la base de données la plus complète, composée des données SIRTA, des données MSG et de celles du réseau météorologique, pour paramétrer les relations empiriques entre les prédicteurs et la visibilité, tous mesurés au même instant. Les niveaux de visibilité estimée serviront à définir la cause de la chute de visibilité: panache d'aérosols, brume et brouillard. Le protocole sera appliqué dans des conditions atmosphériques variées et pour des brouillards de différents types (radiatif, affaissement de stratus, ...). Le jeu de paramètres les plus pertinents est alors identifié, ainsi que le dispositif expérimental associé. Celui-ci est désigné comme optimal pour produire la visibilité quand elle n'est pas directement mesurée.

Puis le jeu de données d'entrée est dégradé (en termes de nombre de paramètres) pour représenter la diversité des configurations instrumentales des stations existantes dans les aéroports et constituant le réseau météorologique. Des nouveaux jeux de paramètres sont alors identifiés. Les prédicteurs sont identifiés quand un jeu de données provient d'instruments typiques de stations existantes. La fiabilité est estimée et comparée au résultat optimal. Il est ainsi mis en valeur l'apport des mesures des propriétés microphysiques et optiques des aérosols et de turbulence atmosphérique réalisées sur le SIRTA. L'apport de la synergie sol-spatial dans l'observation est évalué en ajoutant les données de MSG.

Il faut préciser que les données satellite ici injectées ne sont pas le produit de typologie nuageuse de EUMETSAT mais plutôt les mesures de luminance. La mesure brute de luminance est préférée en tant que prédicteur au produit VLC pour deux raisons: 1) d'après les résultats de la tâche T2, la relation 'présence de brouillard' – 'VLC détecté' n'est pas univoque, ce qui crée une incertitude sur le produit VLC qui serait amplifiée par l'analyse statistique et perturberait le résultat; 2) La mesure brute est sensible non seulement à la présence de brouillards mais aussi à tous les autres nuages ainsi qu'aux aérosols, alors que le produit VLC est d'ordre binaire (détecté ou non détecté). La méthode GAM nous indiquera comment mettre à profit l'information contenue dans la donnée satellitaire pour notre étude de l'influence du cycle de vie du brouillard sur la visibilité.

La validation de la méthode reposera sur un jeu de données indépendant, acquis pendant une 4<sup>e</sup> saison lors de l'année 3 du projet. Les diagnostics de la visibilité seront comparés aux mesures de visibilité, pour un maximum de conditions variées. Le niveau d'incertitude des résultats sera alors estimé, en fonction de la situation: événement (panache d'aérosols, brume, brouillard), type de brouillard, saison.

Planning:

T0+6 mois à T0+18 mois: application de la méthode statistique à la base de données complète.

T0+18 mois à T0+30 mois: validation

Livrables:

**L3-1 à T0+24 mois.** Identification des paramètres les plus pertinents à décrire la variabilité de la visibilité pendant le cycle de vie du brouillard, pour différents dispositifs expérimentaux, ainsi que la paramétrisation associée qui relie ces paramètres à la visibilité, et la fiabilité.

Nombre de UO: 9 (CDI HYGEOS) + 3 (CDD CNRS-IPSL/LMD).

#### **A4. Prédire l'évolution de la visibilité**

Responsable: HYGEOS, partenaire: CNRS-IPSL/LMD, collaborateurs extérieurs: CNRS-IPSL/LSCE pour l'expertise en méthode statistique et Météo France / DP pour l'identification des prédicteurs et la modélisation numérique.

Objectif: Etudier la capacité des mesures décrivant l'état de l'atmosphère à différentes échelles spatiales, à améliorer la prévision de l'évolution de la visibilité. Parmi les mesures, les paramètres les plus pertinents en terme de prévision de la variabilité de la visibilité seront identifiés. Le niveau de probabilité sur le changement de visibilité sera estimé. La prévision du changement de visibilité servira à prévoir la phase du cycle de vie du brouillard.

Perspectives: recommandations sur l'équipement des stations existantes pour améliorer la prévision locale et à courte échéance du brouillard.

Protocole: Le protocole de cette tâche s'inspire fortement de celui de la tâche précédente T3. L'identification des meilleurs prédicteurs suit la même procédure et s'appuie sur la même base de données. Cependant, le prédictant n'est plus la visibilité à l'instant présent mais l'évolution de la visibilité sur quelques heures. Quand la visibilité projetée franchira un seuil, nous pourrons prévoir l'apparition ou la dissipation de la brume (seuil à 5000 m de visibilité) ou du brouillard (seuil de 500 à 1000 m de visibilité). Les paramètres clés prédictifs seront identifiés et seront hiérarchisés en leur attribuant un poids exprimant leur pouvoir de prévisibilité du changement de visibilité. Une attention particulière sera portée sur l'apport de l'évolution temporelle mesurée et passée des paramètres à prédire l'évolution temporelle future. Des relations d'équivalence seront établies entre les prédicteurs et le niveau de probabilité d'occurrence de l'événement sur une échéance de quelques heures, en fonction de plusieurs combinaisons de données.

La validation de la méthode reposera sur les données de la 4<sup>e</sup> saison acquises lors de l'année 3 du projet. Les estimations de la visibilité à partir des paramètres seront comparées à la visibilité mesurée quelques heures plus tard, pour un maximum de conditions variées. Le niveau d'incertitude des résultats sera alors estimé, en fonction du type de brouillard et de la saison. Une comparaison sera aussi réalisée avec des sorties de modélisation météorologique numérique pour quantifier l'apport de notre approche, en collaborant avec Météo France / DP.

Planning:

T0+12 mois à T0+30 mois: application de la méthode statistique sur la base de données complète pour estimer la variation de visibilité sur quelques heures; et validation.

Livrables:

**L4 à T0+30 mois.** Scores et incertitudes sur les estimations de probabilité d'occurrence du phénomène brouillard.

Nombre de UO: 9 (CDI HYGEOS).

## **A5. Transposition à d'autres conditions atmosphériques et différentes options technologiques**

Responsable: HYGEOS, partenaire: CNRS-IPSL/LMD, collaborateurs extérieurs: CNRS-IPSL/LSCE pour expertise en méthode statistique et Météo France / DP pour l'identification des prédicteurs et la modélisation numérique.

Objectif: Il est étudié la pertinence de remplacer certaines données acquises expérimentalement par des simulations numériques, dans le but d'alléger le dispositif expérimental nécessaire à la production des prédicteurs, en gardant une fiabilité satisfaisante sur la description et la prévision du changement de visibilité, dans un objectif à long terme d'un dispositif expérimental allégé pour des applications à d'autres zones géographiques. L'apport de l'observation satellite et de la modélisation numérique est ainsi mis en valeur dans le but d'alléger le dispositif expérimental, par rapport à la configuration optimale qui a été définie en T3 et T4. Nous pourrions reproduire les conditions technologiques existantes d'observation en aéroports ou en stations météorologiques pour y tester la fiabilité de la méthode développée en A3 et A4. Il sera ainsi donné l'opportunité de tester la méthode pour des conditions atmosphériques plus variées. Il sera aussi permis d'étudier l'apport de la modélisation dans la spatialisation des processus et des conditions à méso échelle, difficile à atteindre par la mesure avec une bonne résolution spatiale.

Perspectives: mise en œuvre opérationnelle de la détection du brouillard sur différents sites en fonction du dispositif expérimental disponible.

Protocole: La base de données définie en A1 provient uniquement de l'observation, depuis le sol et depuis satellite. Nous lui ajoutons des champs 3D de simulations météorologiques par modélisation numérique, avec l'aide des collègues de Météo France / DP. La méthode GAM est appliquée à ce jeu de données pour définir un nouveau jeu de prédicteurs qui serait moins dépendant de l'observation sol que le jeu de prédicteurs défini en A3 et A4. Parmi la base de données d'observation (A1) seront sélectionnées les données correspondant à des dispositifs expérimentaux existants dans les aéroports et sur les stations météorologiques. La fiabilité sur la description et la prévision du changement de visibilité sera définie dans ces conditions, en comparant avec des mesures de visibilité.

Planning:

T0+24 mois à T0+36 mois: inclusion des simulations numériques dans la base de données A1; application de la méthode GAM; définition de jeux de prédicteurs; application dans les conditions des dispositifs expérimentaux existants; validation en comparant avec des mesures de visibilité.

Livrables:

**L5 à T0+36 mois.** Scores de fiabilité de la méthode quand les sorties de modélisation numérique remplacent des paramètres observés et dans les conditions de dispositifs expérimentaux existants sur les stations météorologiques et dans les aéroports.

Nombre de UO: 9 (CDI HYGEOS).

### **Rapports d'avancement:**

Rapport fourni annuellement (**T0+12 mois, +24 mois, +36 mois**) sur l'état d'avancement des travaux dans chacune des tâches.

Tableau 1: Instruments de télédétection et de sondage in situ déployés au SIRTA qui serviront le projet. Les instruments sondant les propriétés microscopiques des particules y seront installés par le CNRM pour ce projet.

Type	Thématique	Instrument	Objets d'étude	Labo
Lidars	Distribution verticale des couches atmosphériques : aérosols, brume et base des nuages	Lidar rétro-diffusion	Profil vertical de l'extinction par les aérosols et la brume (visibilité) de 2 à 15 km	LMD
		Lidar rétro-diffusion	Profil vertical de l'extinction par les aérosols et la brume de 2 à 8 km	LMD
Radars	Dynamique atmosphérique en ciel clair et en conditions de brouillard	Radar millimétrique Doppler 95 GHz	Vitesse verticale et TKE sur 0-15 km	LATMOS
		Radar bande X Doppler	Profil vertical du vent et TKE sur 0-1 km	LATMOS
Sodars	Dynamique atmosphérique	Sodar Remtech PA-2 : profil de vent (0-1 km)	Profil vertical du vent et TKE sur 0-1 km	CEREA
Radiomètres	Bilan radiatif et les forçages radiatifs	Radiomètre micro-onde HATPRO (20-30 + 50-60 GHz)	Contenu intégré en vapeur d'eau	LMD
		GPS (Réseau RGP IGN)	Contenu intégré en vapeur d'eau	LMD/IGN
		Photomètre (Réseau PHOTONS)	Propriétés optiques des aérosols intégrées sur la colonne atmosphérique	LOA
		Pyranomètre / Pyrgéomètre (Réseau BSRN)	Bilan radiatif à la surface	LMD
Sondeurs in situ	Conditions météorologiques	Station météo	Température, pression, humidité, vent, précipitation de la couche atmosphérique de surface	LMD
		Sondes dans le sol	Température, humidité	LMD
	Dynamique atmosphér.	Anémomètres soniques	Flux turbulents	LMD/CEREA
	Propriétés des particules atmosphériques	TSI SMPS	Aérosols de diamètre de 0.01 à 0.50 $\mu\text{m}$	CNRM
		PALAS WELAS-2000	Particules de diamètre compris entre 0.39 et 42 $\mu\text{m}$	CNRM
		Fog Monitor DMT FM100	Particules de diamètre compris entre 2 et 50 $\mu\text{m}$	CNRM
		DMT CCNC-100	Fraction de noyaux de condensation parmi aérosols	CNRM

## Annexe : bibliographie

- Bergot T., Modélisation du brouillard à l'aide d'un modèle 1D forcé par des champs à méso-échelle : application à la prévision. Thèse de l'université Paul Sabatier – Toulouse., 1993.
- Bergot T. and D. Guédalia, Evaluation de la qualité de la prévision du brouillard par un modèle numérique, *La Météorologie*, **14**, 27-35, 1996.
- Bergot, T., D. Carrer, J. Noilhan and P. Bougeault, Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds: a feasibility study, *Wea and Forecasting*, **20**, 627-646, 2005.
- Bergot, T., Quality assessment of the Cobel-Isba Numerical forecast system of fog and low clouds, *Pure appl. Geophys.*, **164**, 1265-1282, 2007.
- Cermak, J., and J. Bendix, A novel approach to fog/low stratus detection using Meteosat 8 data, *Atmos. Res.*, **87**, 279-292, 2008.
- Craddock, J.M. and D. L. Pritchard, *Forecasting the formation of radiation fog - a preliminary approach*. Met. Res. Pap. 624, United Kingdom Meteorological Office, 1951.
- Dupont J.-C., M. Haeffelin, P. Drobinski, and T. Besnard, 2008 : Parametric model to estimate clear-sky longwave irradiance at the surface based on vertical distribution of humidity and temperature. *J. Geophys. Res.*, **113**, D07203, doi:10.1029/2007JD009046.
- Dupont, J.C, M. Haeffelin, Y. Morille, V. Noël, P. Keckhut, D. Winker, J. Comstock, P. Chervet, A. Roblin, Macrophysical and optical properties of midlatitude high-altitude clouds from 4 ground-based lidars and collocated CALIOP observations. *J. Geophys. Res.* In press 2010.
- Eldridge R. G., Haze and fog distributions, *J. Atmos. Sci.*, **23**, 605-613, 1966.
- Elias, T., A. M. Silva, N. Belo, S. Pereira, P. Formenti, G. Helas, and F. Wagner, Aerosol extinction in a remote continental region of the Iberian peninsula during summer, *J. Geophys. Res.*, **111**, D14204, doi:10.1029/2005JD00, 2006.
- Elias, T., and J. L. Roujean, Estimation of the aerosol radiative forcing at ground level, over land, and in cloudless atmosphere, from METEOSAT-7 observation: method and first results, *Atmos. Chem. Phys.*, **8**, 625-636, 2008.
- Elias T., M. Haeffelin, P. Drobinski, L. Gomes, J. Rangognio, T. Bergot, P. Chazette, J.-C. Raut, and M. Colomb, Extinction of Light during the Fog Life Cycle: a Result from the ParisFog Experiment, International Radiation Symposium 2008, Foz do Iguacu, Brasil, 3-8 August 2008.
- Elias, T., M. Haeffelin, T. Dubos, P. Drobinski, and Clément Fesquet, Projet de recherche DGA sur l'observation et la modélisation atmosphérique, Convention 2007-2008, DGA - Ecole-Polytechnique/LMD, Rapport final, 2008.
- Elias, T., M. Haeffelin, P. Drobinski, L. Gomes, J. Rangognio, T. Bergot, P. Chazette, J.-C. Raut, and M. Colomb, Particulate contribution to extinction of visible radiation: pollution, haze, and fog, *Atm. Res.*, **92**, 443-454, doi:10.1016/j.atmosres.2009.01.006, 2009.
- Fitzjarrald, D. R., and G. G. Lala, Hudson Valley Fog Environments. *J. Appl. Meteor.*, **28**, 1303-1328, 1989.
- Fuzzi, S., Facchini M.C., Orsi G., Lind J.A., Wobrock W., Kessel M., Maser, R., Jaeschke W., Enderle K.H., Arends B.G., Berner, A., Solly A., Kruisz C., Reischl G., Pahl S., Kaminski U., Winkler P., Ogren J.A., Noone K.J., Hallberg, A., Fierlinger-Oberlinninger H., Puxbaum H., Marzorati A., Hansson H.-C., Wiedensohler A., Svenningsson I.B., Martinsson B.G., Schell D., and Georgii H.W., The Po Valley Fog Experiment 1989. An Overview, *Tellus*, **44B**, 448-468, 1992.
- Fuzzi, S., P. Laj, L. Ricci, Orsi G., Heintzenberg J., Wendisch M., Yuskiewicz B., Mertes S., Orsini D., Schwanz M., Wiedensohler A., Stratmann F., Berg O. H., Swietlicki E., Frank G., Martinsson B. G., Günther A., Dierssen J. P., Schell D., Jaeschke W., Berner A., Dusek U., Galamboš Z., Kruisz C., Mesfin N. S., Wobrock W., Arends B., and B. H. Ten, Overview of the Po Valley fog experiment 1994 (CHEMDROP), *Contr. Atmos. Phys.*, **71**, 3-19, 1998.
- Guédalia, D., and T. Bergot, Numerical forecasting of radiation fog. Part II: a comparison of model simulations and several observed fog events, *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1231-1246, 1994.
- Gultepe, I., M. D. Müller, and Z. Boybeyi, A new warmfog parameterization scheme for numerical weather prediction models, *J. Appl. Meteor.*, **45**, 1469-1480, 2006.
- Gultepe, I., R. Tardif, S. C. Michaelides, J. Cermak, A. Bott, J. Bendix, M. D. Müller, M. Pagowski, B. K. Hansen, G. P. Ellrod, W. Jacobs, G. Toth, and S. G. Cober, Fog research: A review of past achievements and future perspectives, *Pure Appl. Geophys.*, **164**, 1121-1159, 2007.
- Gultepe, I., G. Pearson, J. A. Milbrandt, B. Hansen, S. Platnick, P. Taylor, M. Gordon, J. P. Oakley and S. G. Cober, The fog remote sensing and modelling (FRAM) field project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 342-359, 2009.
- Haeffelin, M., L. Barthès, O. Bock, C. Boitel, S. Bony, D. Bouniol, H. Chepfer, M. Chiriaco, J. Cuesta, J. Delanoë, P. Drobinski, J.-L. Dufresne, C. Flamant, M. Grall, A. Hodzic, F. Hourdin, F. Lapouge, Y. Lemaître, A. Mathieu, Y. Morille, C. Naud, V. Noël, B. O'Hirok, J. Pelon, C. Pietras, A. Protat, B. Romand, G. Scialom, R. Vautard,

- 2005: SARTA, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research.” *Annales Geophysicae*, **23**, pp 253-275.
- Haeffelin, M., T. Bergot, T. Elias, R. Tardif, D. Carrer, P. Chazette, M. Colomb, P. Drobinski, E. Dupont, J-C. Dupont, L. Gomes, L. Musson-Genon, C. Pietras, A. Plana-Fattori, A. Protat, J. Rangognio, J-C. Raut, S. Rémy, D. Richard, J. Sciare, and X. Zhang, PARISFOG, shedding new light on fog physical processes. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* In press 2010.
- Hastie, T. J. and Tibshirani, R. J., *Generalized Additive Models*. Chapman & Hall/CRC, 1990.
- Jolivet D. and A. J. Feijt, Quantification of the accuracy of liquid water path fields derived from NOAA 16 AVHRR over three ground stations using microwave radiometers. *J. of Geophys. Res.*, **110**, D11, D11204.1-D11204.7, 2005.
- Jolivet D, D. Ramon, J. Riedi and R. Roebeling, Aerosol retrieval from METEOSAT-8, CM-SAF VS activity report, Deutsche Wetterdienst publications, 2006.
- Jolivet D., D. Ramon, P.-Y. Deschamps, F. Steinmetz, B. Fougnie and P. Henry, How the ocean color product quality is limited by atmospheric correction, Proc. « Envisat Symposium 2007 », Montreux, Switzerland, 23-27 April 2007 (ESA SP-636, July 2007).
- Jolivet D., D. Ramon, E. Bernard, P.-Y. Deschamps, J. Riedi, J.-M. Nicolas and O. Hagolle, (2008) , Aerosol monitoring over land using MSG/SEVIRI. *Proc. « 2008 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference »*, Darmstad, Germany, 8-12 September 2008.
- Jolivet D., J.-M. Nicolas, E. Bernard, P.-Y. Deschamps and D. Ramon, In flight calibration of SEVIRI solar channels on board MSG platforms, « 2009 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference », Bath, United Kingdom, 21-25 September 2009.
- Lohmann, U. and J. Feichter, Global indirect aerosol effects: a review, *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 715-737, 2005.
- Musson-Genon, L, Numerical simulation of a fog event with one-dimensional boundary layer model, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 592-607, 1987.
- MF/DP/CMS, Algorithm Theoretical Basis Document for “Cloud Products” (CMA-PGE01 v2.0, CT-PGE02 v1.5 & CTTH-PGE03 v2.0), SAF/NWC/CDOP/MFL/SCI/ATBD/01, Issue 2, Rev. 0, 2009a.
- MF/DP/CMS, Validation Report for “Cloud Products” (CMA-PGE01 v2.0, CT-PGE02 v1.5 & CTTH-PGE03 v2.0), SAF/NWC/CDOP/MFL/SCI/VR/03, Issue 1, Rev. 0, 2009b.
- Nakanishi N., Large Eddy simulation of radiation fog. *Bound. Layer Meteorol.*, **94**, 462-493, 2000.
- Neukermans, G., K. Ruddick, E. Bernard, D. Ramon, B. Nechad, P. Y. Deschamps, Mapping total suspended matter from geostationary satellites: a feasibility study with SEVIRI in the Southern North Sea, *Optics Express*, **17**, Issue 16, 14029-14052, 2009.
- Panofsky, H.A. and G. W. Brier, *Some Applications of Statistics to Meteorology*. The Pennsylvania State University, 224 pp, 1958.
- Rangognio, J., P. Tulet, T. Bergot, L. Gomes, O. Thouron, and M. Leriche, Influence of aerosols on the formation and development of radiation fog, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **9**, 17963-18019, 2009.
- Ramon, D., and R. Santer, Operational Remote Sensing of Aerosols over Land to Account for Directional Effects, *Appl. Opt.*, **40**, 3060-3075, 2001.
- Rossow, W. B., and R.A. Schiffer, ISCCP cloud data products, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **72**, 2-20, 1991.
- Saunders, W. E., A method of forecasting the temperature of fog formation, *Meteorol. Mag.*, **79**, 213-219, 1950.
- Santer, R., F. Zagolski, J. Fischer, D. Ramon and P. Dubuisson, Uncertainties in radiative transfer computations: Consequences on the MERIS products over land, *International Journal of Remote Sensing*, **26**, 20, 4597-4626, 2005.
- Scherzinger, Methodology for the Selection of Predictors, WG3, COST Action 722 Final report, 2007.
- Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota, S., Ratier, A., An introduction to Meteosat Second Generation (MSG), *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **83**, 977-992, 2002.
- Tardif, R. The impact of vertical resolution in the explicit numerical forecasting of radiation fog: A case study, *Pure Appl. Geophys.*, **164**, 1221-1240, doi:10.1007/s00024-007-0216-5, 2007.
- Tardif, R. and R. M. Rasmussen, Event-based climatology of fog in the New York City region. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **46**, 1141-1167, 2007.
- Tardif, R., Classification des évènements de brouillard observés pendant la campagne Paris-Fog, colloque AMA 2008.
- Vautard, R., P. Yiou and G. J. van Oldenborgh, Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years, *Nature Geosc.*, **2**, 115-119, doi:10.1038/ngeo414, 2009.
- Vislocky, R.L. and J. M. Fritsch, An automated, observations-based system for short-term prediction of ceiling and visibility, *Weather And Forecasting*, **12** (1), 31-43, 1997.
- Vrac, M., P. Marbaix, D. Paillard, and P. Naveau. Non-linear statistical downscaling of present and LGM precipitation and temperatures over Europe, *Climate of the Past*, **3**, 669-682, 2007.
- Wilks, D.S., *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press, 467 pp, 1995.