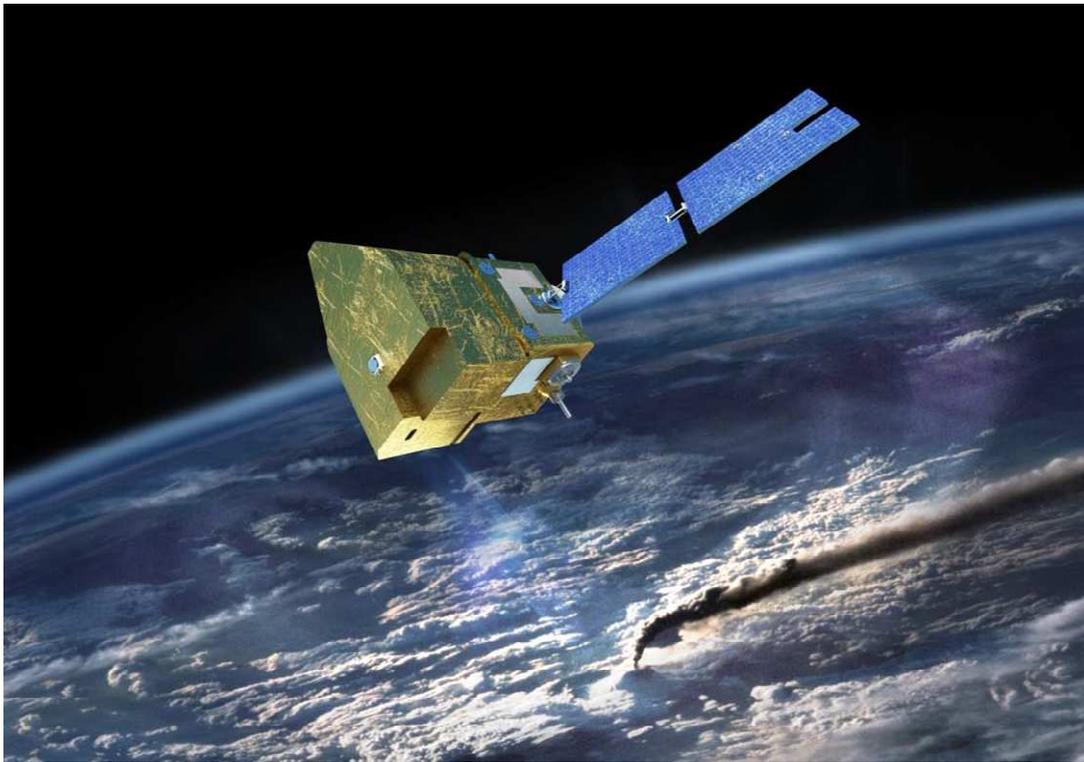


Rapport au Commissaire Général à l'Investissement

Contre-expertise de l'évaluation socio-économique  
du  
**Projet Microcarb**



Michel COURTOIS, Vincent MARCUS

17 novembre 2015

## Préambule

Le Commissariat général à l'investissement (CGI) a mené depuis septembre 2012 et à la demande du Premier ministre une réflexion sur les projets d'investissement public et leur évaluation. La démarche conduite dans le cas des infrastructures de transport sous le régime de l'instruction-cadre de 2005 a d'ailleurs servi de référence dans cette réflexion qui avait une vocation plus large que le secteur des transports.

Entre temps, l'article 17 de la loi de programmation des finances publiques du 31 décembre 2012<sup>1</sup> est venu instaurer l'obligation d'évaluation socio-économique des projets d'investissements (sans seuil), et sa contre-expertise indépendante et préalable au-delà d'un certain niveau de financement public. Son décret d'application, le [décret 2013-1211 relatif à la procédure d'évaluation des investissements publics](#) précise en particulier le cahier des charges du dossier d'évaluation socio-économique à constituer, le seuil au-delà duquel la contre-expertise est obligatoire, et les modalités de son organisation.

C'est en respectant toutes les règles prévues dans ce décret d'application (compétences, déclaration d'intérêt, délais) que le CGI a fait réaliser cette contre-expertise indépendante.

Ce rapport a été établi à partir des documents fournis par le CNES, des compléments de documentation et des réponses apportées lors des auditions aux questions des experts (cf. annexe). Il ne saurait être reproché à ce rapport de ne pas tenir compte d'éléments qui n'auraient pas été communiqués à ses auteurs.

---

<sup>1</sup> La [loi n°2012-1558 du 31 décembre 2012 de programmation des finances publiques pour les années 2012 à 2017](#) dispose dans son article 17 que :

Les projets d'investissements civils financés par l'Etat, ses établissements publics, les établissements publics de santé ou les structures de coopération sanitaire font l'objet d'une évaluation socio-économique préalable.

Lorsque le montant total du projet et la part de financement apportée par ces personnes excèdent des seuils fixés par décret, cette évaluation est soumise à une contre-expertise indépendante préalable.

Le Gouvernement transmet au Parlement les évaluations et les contre-expertises mentionnées au premier alinéa.

Les conditions d'application du présent article sont prévues par décret. »

## Déroulement de la contre-expertise

Le Commissariat Général à l'Investissement (CGI), après avoir obtenu les pièces nécessaires (CV, déclaration d'intérêt relative au projet, engagement de confidentialité et d'impartialité), nous a communiqué le dossier préparé par le CNES. Le CGI nous a également indiqué que le CNES souhaitait un retour rapide de contre-expertise, ce qui amenait à travailler dans un calendrier très serré (1 mois, durée minimale d'une contre-expertise).

Après une première présentation du projet par le CNES, nous avons souhaité obtenir des informations complémentaires et organiser des auditions pour aider à mettre en perspective les nombreuses informations mises à notre disposition.

Le CGI a donc organisé des auditions (liste jointe en annexe) auxquelles le CNES était convié, et a assisté à ces réunions pour veiller à notre indépendance et prendre connaissance du dossier avant de formuler son propre avis.

La rédaction de ce rapport s'est faite en temps limité, mais avec un fort souci de pédagogie, s'agissant du premier rapport de contre-expertise sur un dossier spatial.

Merci aux équipes que nous avons rencontrées et à la bonne volonté des personnes ayant permis cette évaluation fort intéressante.

## Sommaire

<b>Préambule</b> .....	<b>2</b>
<b>Déroulement de la contre-expertise</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Contexte général et enjeux</b> .....	<b>6</b>
1.1. Changements climatiques et négociations internationales .....	6
1.2. Améliorer les connaissances scientifiques sur les interactions entre l'atmosphère, la biosphère et les océans.....	6
1.3. Se doter d'outils de mesure crédible des émissions de CO <sub>2</sub> pour mieux contrôler les émissions anthropiques.....	8
<b>2. Etat des lieux et perspectives de la mesure des émissions de CO<sub>2</sub></b> .....	<b>10</b>
2.1. Outils actuellement disponibles.....	10
Mesures à partir du sol.....	10
Mesures à partir de l'espace .....	10
2.2. Absence de l'Europe dans l'observation satellitaire des émissions de CO <sub>2</sub> .....	11
2.3. Réflexion de la Commission pour la mise en place d'un système de contrôle européen des émissions de CO <sub>2</sub> .....	12
2.4. Les réponses des Etats-membres.....	12
<b>3. Le projet contre-expertisé</b> .....	<b>14</b>
3.1. Les objectifs du projet Microcarb.....	14
Améliorer de 50 % la mesure des flux de CO <sub>2</sub> échangés entre la surface terrestre et l'atmosphère. ....	14
Fournir des mesures de concentration de CO <sub>2</sub> avec une précision de 1 ppm.....	14
Assurer une continuité avec les mesures effectués par le satellite OCO-2.....	15
Préparer la poursuite de ces acquisitions dans le cadre d'un futur système opérationnel avec des satellites récurrents, ceci étant facilité par le faible encombrement de l'instrument .....	15
3.2 Principe de la mesure instrumentale, description de l'instrument.....	15
3.3. Le satellite Microcarb .....	19
<b>4. Evaluation technique approfondie du projet Microcarb</b> .....	<b>22</b>
4.1. Méthode.....	22
4.2. Performance de mesure et de modélisation.....	22
4.3. Crédibilité de l'atteinte des objectifs .....	22
4.5. Analyse de risques, planning/coût et maturité du projet.....	23
Planning.....	23
Coût à achèvement.....	24
4.6. Maturité du design .....	24

4.7. Maturité des technologies.....	25
4.8. Positionnement du projet par rapport aux autres projets de même nature .....	25
<b>5. Evaluation socio-économique du projet Microcarb .....</b>	<b>26</b>
5.1. Analyse Coût-efficacité.....	26
Coût des mesures satellitaires pour améliorer la précision des prédictions des flux de surface de CO <sub>2</sub> .....	26
Coût des mesures avec usage des données au sol pour le même objectif scientifique .....	26
5.2. Analyse Coûts-Bénéfices .....	27
Bénéfices scientifiques.....	27
Bénéfices à travers des actions futures de réduction des émissions de CO <sub>2</sub> .....	28
Bénéfices industriels directs.....	28
Bénéfices industriels indirects/induits.....	29
Bénéfices politiques .....	30
Synthèse .....	31
Encadré méthodologique .....	32
<b>6. Conclusion.....</b>	<b>34</b>
<b>Annexe 1 : Liste des institutions auditionnées.....</b>	<b>36</b>
<b>Annexe : Liste des documents examinés.....</b>	<b>37</b>
<b>Synthèse .....</b>	<b>40</b>

## **1. Contexte général et enjeux**

### **1.1. Changements climatiques et négociations internationales**

Les rapports successifs du GIEC<sup>2</sup> ont clairement établi le lien causal entre l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre (GES), notamment le CO<sub>2</sub>, et le réchauffement climatique global observé. Cette augmentation des GES implique une augmentation de la température globale de l'atmosphère et des modifications du fonctionnement de l'ensemble de la régulation climatique, (précipitations, amplitude des phénomènes cycloniques, élévation du niveau des mers provoqué par l'accroissement de la température des océans et la fonte des parties glacées des calottes polaires et de la banquise).

Cet effet entraîne de plus un réchauffement du permafrost qui peut à son tour provoquer un afflux de méthane dans l'atmosphère contribuant à renforcer l'accroissement de la température de l'atmosphère. De plus cette évolution entraîne une modification des circulations océaniques qui contribue à la régulation actuelle des températures et précipitations.

Environ 50 % du CO<sub>2</sub> émis par les phénomènes naturels et d'origine anthropique est absorbé par les océans. La hausse des émissions d'origine anthropiques (aujourd'hui 2 ppm/ an sur environ 400 ppm), provoque leur acidification et une évolution des possibilités de calcifications de certains planctons, ainsi que la mort des coraux, avec pour conséquences la destruction de la biodiversité de ces milieux.

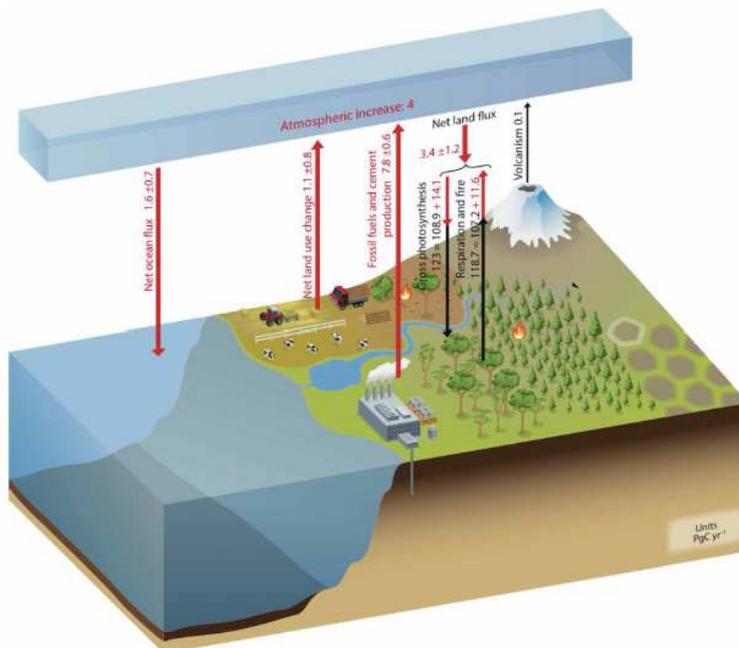
### **1.2. Améliorer les connaissances scientifiques sur les interactions entre l'atmosphère, la biosphère et les océans**

Les mécanismes qui gouvernent les interactions entre l'atmosphère, la biosphère, et les océans sont encore mal connus. Comment l'équilibre entre les sources de CO<sub>2</sub> (feux de forêts, végétation l'hiver, volcans, activités humaines) et les puits de carbone (océans, végétation l'été ou forêts permanentes) va-t-il se modifier avec l'accroissement du CO<sub>2</sub> d'origine anthropique, les océans vont-ils continuer à jouer leur rôle de puits, sont des questions pour lesquelles une meilleure compréhension des mécanismes est nécessaire. La figure ci-dessous extraite du rapport d'évaluation de la proposition CarbonSat illustre ces échanges.

---

<sup>2</sup> Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (IPPC en anglais)

Figure 2.2. CO<sub>2</sub> fluxes averaged globally for 2000–2009. Fluxes are in PgC yr<sup>-1</sup>. (Adapted from Figure 6.1 Errata of Ciais et al. (2013)).



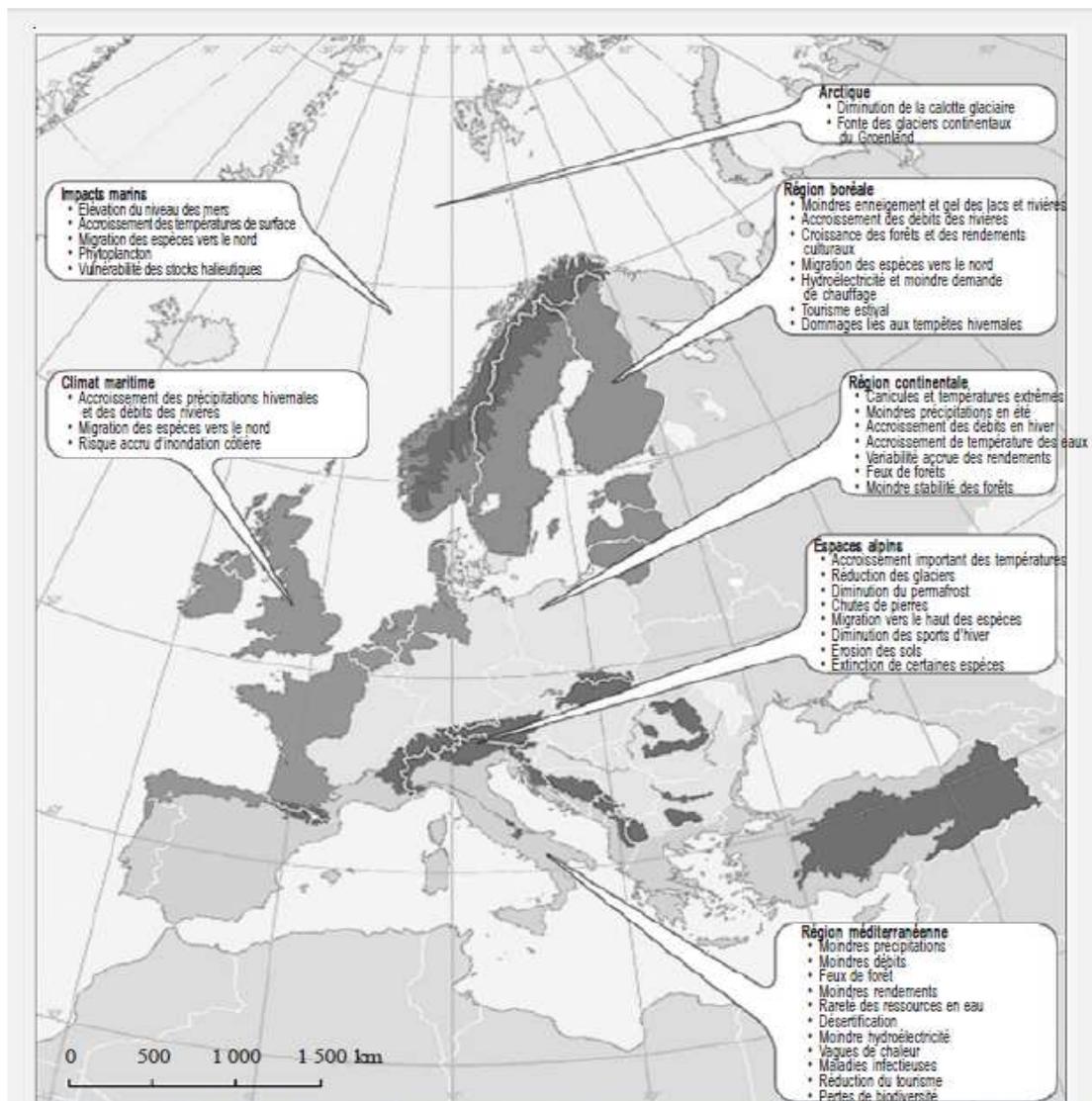
**Figure 1 : Flux CO<sub>2</sub>, Source : rapport ESA CarbonSat**

Ces évolutions provoquées par les émissions de CO<sub>2</sub> vont avoir des conséquences sur la vie sociale et économique des populations : migrations, accès aux ressources, satisfaction des besoins en eau..., montée du niveau moyen des mers, évolution des zones désertiques et migration des espèces végétales et de la faune. Ces évolutions sont déjà constatées. Une limitation et une régulation des émissions de CO<sub>2</sub> d'origine anthropique est nécessaire si on veut éviter un dérèglement climatique majeur et irréversible, (les phénomènes en cause étant loin d'être linéaires), avec les conséquences graves sur l'économie et les populations (déplacements, famines, catastrophes climatiques...).

La figure ci-dessous extraite du rapport de Jean Tirole<sup>3</sup> illustre les constats des effets en Europe.

<sup>3</sup> Politique climatique : une nouvelle architecture internationale, Rapport au Conseil d'Analyse économique n°87, juin 2009 disponible ici : <http://www.cae-eco.fr/IMG/pdf/087.pdf>.

Plus exactement, la figure est tirée de la page 191, et du complément intitulé 'Changement climatique : la politique européenne', rédigé par Dominique BUREAU. La carte provient de l'Agence Européenne de l'Environnement.



**Figure 2 : Effets constatés en Europe du changement climatique (2008)**

### **1.3. Se doter d'outils de mesure crédible des émissions de CO<sub>2</sub> pour mieux contrôler les émissions anthropiques**

Les questions de mesure des émissions de CO<sub>2</sub> ressortent de plusieurs registres selon que l'on cherche à contrôler :

- les émissions de sites industriels fixes dans le cadre du marché de quotas européens,
- les émissions que les pays déclarent à l'inventaire national puisque la logique des négociations a mené à des engagements nationaux sur les émissions de gaz à effet de serre,
- ou que l'on cherche à faire progresser la connaissance scientifique.

Les techniques utilisées diffèrent, mais le croisement des résultats est évidemment une préoccupation régulière.

Lorsqu'il s'agit de mesurer les émissions de sites industriels fixes, dont les émissions doivent être mesurées précisément et être auditées parce que la source fait partie du SCEQE<sup>4</sup>, la demande d'autorisation d'émettre des gaz à effet de serre doit préciser les mesures prévues pour surveiller et déclarer les émissions. Les émissions doivent donc être mesurées et déclarées, et c'est un règlement européen qui précise ensuite comment les « vérificateurs » sont accrédités et comment sont vérifiées les déclarations d'émission.

Lorsqu'il s'agit de rendre compte des émissions d'un pays, les négociations dans le cadre de la Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique ont défini le cadre Measurement, Reporting and Verification ou MRV pour les déclarations d'émission sous forme d'inventaire. Il est à noter que jusqu'à maintenant les obligations en matière d'inventaire sont fortement différenciées : pour les pays de l'annexe 15, les inventaires sont annuels et soumis à des revues par les pairs pour vérifier le respect des méthodes homologuées ; pour les autres pays, ils sont moins fréquents, moins détaillés et moins homogènes dans leur présentation.

Lorsqu'il s'agit de mieux cerner le cycle du carbone, les données partielles (installations industrielles fixes) ou déclaratives (une approximation des émissions physiques par application de coefficients d'émission à des quantités physiques, par exemple) mentionnées plus haut ne suffisent plus. D'où la nécessité de données d'observations mondiales qui –incidemment– peuvent permettre de repérer des anomalies dans les déclarations d'inventaire.

La progression de la connaissance scientifique n'est pas l'enjeu essentiel de la « COP21 » qui se tiendra prochainement à Paris, mais relève plutôt du GIEC. Cependant la progression de la connaissance scientifique et la perspective éventuelle de réaliser des inventaires par mesures satellitaires ou données au sol sont des éléments de contexte importants pour la négociation relative au cadre MRV.

---

<sup>4</sup> Système Européen d'Echange de Quotas d'Emission

<sup>5</sup> Pays développés ayant pris des engagements précis de réduction de leurs émissions lors du Protocole de Kyoto (1997).

## 2. Etat des lieux et perspectives de la mesure des émissions de CO<sub>2</sub>

### 2.1. Outils actuellement disponibles

Devant cet enjeu sociétal que représente ce réchauffement, les scientifiques doivent s'organiser au mieux pour quantifier les échanges de carbone entre les grands réservoirs que sont l'atmosphère, les océans, et les surfaces émergées afin d'identifier les puits et sources de ces gaz, d'en déduire les mécanismes qui les contrôlent et ainsi mieux prévoir le comportement du système climatique terrestre. En parallèle les états cherchent à définir des politiques publiques contraignantes et efficaces pour limiter les émissions de CO<sub>2</sub>. Cette nécessaire régulation nécessitera la mise en place de moyens de mesures, et de contrôle de ces émissions et de contrôle des engagements des états.

#### Mesures à partir du sol

Des réseaux de stations sols (TCCON) permettent déjà de mesurer la quantité globale de CO<sub>2</sub> atmosphérique (Mauna Loa, à Hawaï). Le service de prévision des concentrations de gaz à effet de serre (GES) a été initialisé par la Commission dans le cadre de Copernicus et du projet CAMS. Ce service est à un stade expérimental et utilise les données GOSAT. L'évaluation de sa performance est en cours. Aujourd'hui l'évaluation des émissions de CO<sub>2</sub>, d'origine anthropique au niveau mondial, repose sur des estimations statistiques nationales disparates et irrégulières et non inter-calibrées et de qualité diverses en termes de fréquence de mises à jour et en densité des points de mesures. Il faut noter la difficulté d'évaluer ces émissions, par exemple pour les transports maritimes et terrestres qui reposent sur l'application de facteurs d'émission standards. Des réseaux de mesures scientifiques effectuées depuis des stations au sol (réseau ICOS), des campagnes avions et l'amélioration des modèles globaux du système Terre complètent les efforts devant permettre de mieux comprendre et quantifier les phénomènes en jeux.

#### Mesures à partir de l'espace

Une composante de mesure spatiale assurant la couverture globale, répétitive complémentaire de ces réseaux de mesures sol doit pouvoir compléter ces dispositifs de mesures. Un tel dispositif opérationnel spatial demande des performances très difficiles à satisfaire : haute résolution spectrale, haute résolution spatiale, haute répétitivité. Le tout complété par des modèles de transport atmosphérique et océaniques. La définition d'un tel système est très complexe et demandera du temps. Encore faut-il bien évaluer ce que la composante spatiale peut mesurer et dans un premier temps comprendre les phénomènes en jeux.

Devant cette difficulté les Etats Unis ont lancé un satellite en 2014 OCO-2, suite à l'échec au lancement du premier OCO-1 pour acquérir une première connaissance de cette problématique. Les Japonais ont lancé un satellite GOSAT en 2009 avec des ambitions semblables. La Chine prévoit d'envoyer en 2017 un satellite de même nature, avec des performances assez semblables. Une troisième mission OCO-3 pilotée par les US doit être embarquée en 2017 sur l'ISS (dont l'orbite, 51 deg., 450 km est assez mal adaptée pour ce type d'objectif).

L'Europe a étudié un satellite dans le cadre du programme Explorer 8, CarbonSat, dont l'ambition était de même nature avec quelques différences : résolution spectrale moindre, champ plus large pour pouvoir faire de l'imagerie, objectif de séparer les émissions d'origine naturelle et d'origine anthropique. Le tableau ci-dessous explicite les différences principales entre ces missions.

## Comparatif des missions CO<sub>2</sub>

	OCO-2	Carbonsat	MicroCarb	GoSat -2
<b>Objectifs</b>	Caractérisation des sources et des puits CO <sub>2</sub> ./ contribution à compréhension du cycle carbone. Mesure des concentrations et des flux			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesure variabilité saisonnière du CO<sub>2</sub></li> <li>• Quantify CO<sub>2</sub> emissions on the scale of a large U.S. state</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• separating natural and anthropogenic fluxes</li> <li>• “imaging” of strong localized CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emission areas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesure des flux naturels</li> <li>• Compatible Micro satellite</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimation des efforts internationaux de réduction des émissions</li> </ul>
<b>lancement</b>	07/2014	> 2022	>=2020	2018
<b>Mesures</b>	757-772 nm O <sub>2</sub>	747-773 nm	758-762 nm	757-775
<b>Précision</b>	1590-1621 nm CO <sub>2</sub> 2041-2082 nm CO <sub>2</sub> XCO <sub>2</sub> : 1 ppm	1590-1675 nm CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub> 1925 – 2095 nm XCO <sub>2</sub> : 1 ppm (1 mesure) XCH <sub>4</sub> : 6-12 ppb(1mesure)	1605-1614 nm 2054-2066 nm XCO <sub>2</sub> : 1 ppm	1590--1670 2040-2 083 XCO <sub>2</sub> : 0,5 ppm (1 month / 500km) XCH <sub>4</sub> : 5 ppb (1 mois)
<b>Fauchée / R spatiale</b>	10 km / 2,3x1,25km <sup>2</sup>	240 km / 2x3 km <sup>2</sup>	15 km /3x8 km <sup>2</sup>	NA / 3km <sup>2</sup> (AC)
<b>R spectrale</b>	>20 000	B1 <7000 B2 < 6000 B3 < 4000	> 25 000	
<b>Masse sat / CU</b>	530/135kg	800/140kg (AC)	200/60 kg	

Le projet CarbonSat n'a pas été sélectionné par le comité scientifique (ESAC) réuni par l'ESA à Krakow qui a recommandé au Directeur de l'Observation de la Terre de l'ESA la mission FLEX (étude de la fluorescence de la Végétation comme mission Earth Explorer 8.). Ce satellite CarbonSat devait être opérationnel en 2023. Désormais le choix de CarbonSat dans ce cadre est repoussé à 2028.

Cependant le coût de la mission FLEX étant de 50 à 60 M€ plus faible que celle de CarbonSat, il est probable que lors du PBEO du 18 19 Novembre 2015 l'ESA proposera d'utiliser cet argent pour progresser sur l'instrument CarbonSat et sur l'amélioration des modèles de traitement liés à cette mission.

### 2.2. Absence de l'Europe dans l'observation satellitaire des émissions de CO<sub>2</sub>

On se trouve donc, dans la situation paradoxale où l'Europe est absente de cette thématique essentielle, sauf à participer en tant qu'expérimentateur associé aux missions américaine et japonaise, alors que l'environnement est un des domaines où l'Europe spatiale est leader.

Ceci entraîne plusieurs conséquences fâcheuses :

- impossibilité de préparer efficacement notre industrie à la réalisation des futures missions de ce type, (en particulier la définition de ces missions nécessite une interaction étroite entre les scientifiques et l'industrie) ;
- et non montée en pression des équipes scientifiques européennes et françaises en particulier sur ce thème.

Mauvaise préparation des spécifications d'un futur système opérationnel de monitoring (il est important de reboucler performances instrument et évolution des flux). Cette situation ne facilite pas la capacité de l'Europe à participer aux travaux de définition du futur système de surveillance opérationnel mondial, cela malgré des équipes scientifiques de premier plan capable de couvrir la thématique et des industriels capable de réaliser ce type de satellites.

### **2.3. Réflexion de la Commission pour la mise en place d'un système de contrôle européen des émissions de CO<sub>2</sub>**

Face à cette situation la Commission a mandaté un groupe de travail d'experts (Ref : P. Ciaï) pour aider à définir les étapes de mise en place d'un tel système opérationnel de contrôle de ces émissions. Encore faut-il bien comprendre les mécanismes à l'œuvre, naturels et d'origine anthropiques. Ces systèmes doivent combiner des relevés à partir de stations terrestres, des moyens de mesure d'origine spatiale (couverture des océans par exemple) et des modèles de transport des flux de CO<sub>2</sub> à travers l'atmosphère. Les exigences sur la composante spatiale d'un tel dispositif sont extrêmement sévères, typiquement :

- haute résolution spatiale (1 X 1 ou 2 X 2 km<sup>2</sup> de résolution), pour couvrir les zones industrielles d'émission,
- une haute résolution spectrale pour les systèmes à dispersion spectrale (mesure des raies d'absorption de l'Oxygène, dans les bandes visible, du CO<sub>2</sub> dans les bandes moyen infrarouge),
- une grande résolution radiométrique (1 ppm de précision, 0,1 ppm de biais),
- une forte répétitivité d'accès sur une même zone (la journée ou quelques jours), donc un champ de vue à chaque passage orbital assez grand (200 à 300 km) et une constellation de satellites pour assurer la répétitivité cherchée,
- un ensemble de modèles pour d'une part mesurer lors du passage sur une zone la concentration de CO<sub>2</sub>, un modèle de correction des mesures, perturbées par diverses sources (nuages, aérosols, calibration instrument...), des stations de mesures au sol, de méthodes de calibration du signal, et des modèles de transport atmosphérique pour suivre les évolutions spatio- temporelles de CO<sub>2</sub>.

Un ordre de grandeur des chiffrages pour la mise en place d'un tel système est de 5 Mds € d'après Jean Tirole (2009).

La définition d'un tel système est aujourd'hui au stade de pré-développement et passe par différentes étapes : une meilleure compréhension des phénomènes, une disposition de capteurs fiables, la démonstration que l'on peut mesurer la densité de CO<sub>2</sub> avec une précision de 1 ppm et 0,1 ppm de biais, le développement des modèles pour transformer les mesures instrumentales en valeurs physiques et de calcul des flux et de séparation des sources naturelles et anthropiques.

L'état de l'art aujourd'hui est à la première étape : compréhension des phénomènes, détermination des performances instrumentales avec les technologies associées, établissement et validation des modèles pour les traitements de l'information au sol.

### **2.4. Les réponses des Etats-membres**

Le CNES a préparé deux missions originales pour palier à cette déficience et permettre à la France et d'éventuels partenaires européens, d'être présents sur ce thème fondamental : Merlin pour la mesure du CH<sub>4</sub>, en coopération avec l'Allemagne, et Microcarb pour la mesure du CO<sub>2</sub>.

Les objectifs de la mission Microcarb proposée par le CNES et le Cospace<sup>6</sup> interviennent dans ce contexte :

- nécessité pour l'Europe d'être présente, et de préparer l'ensemble des industries et des équipes scientifiques à relever les défis majeurs futurs ;
- assurer une continuité des mesures acquises par les satellites US et Japonais. Il faut rappeler que OCO-3, pour des raisons sans doute non scientifiques, sera monté sur la station ISS, dont l'orbite est inadaptée à ce type de mission.

La figure ci-dessous indique les missions en cours ou prévues pour la mesure des gaz à effet de serre (essentiellement CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>).

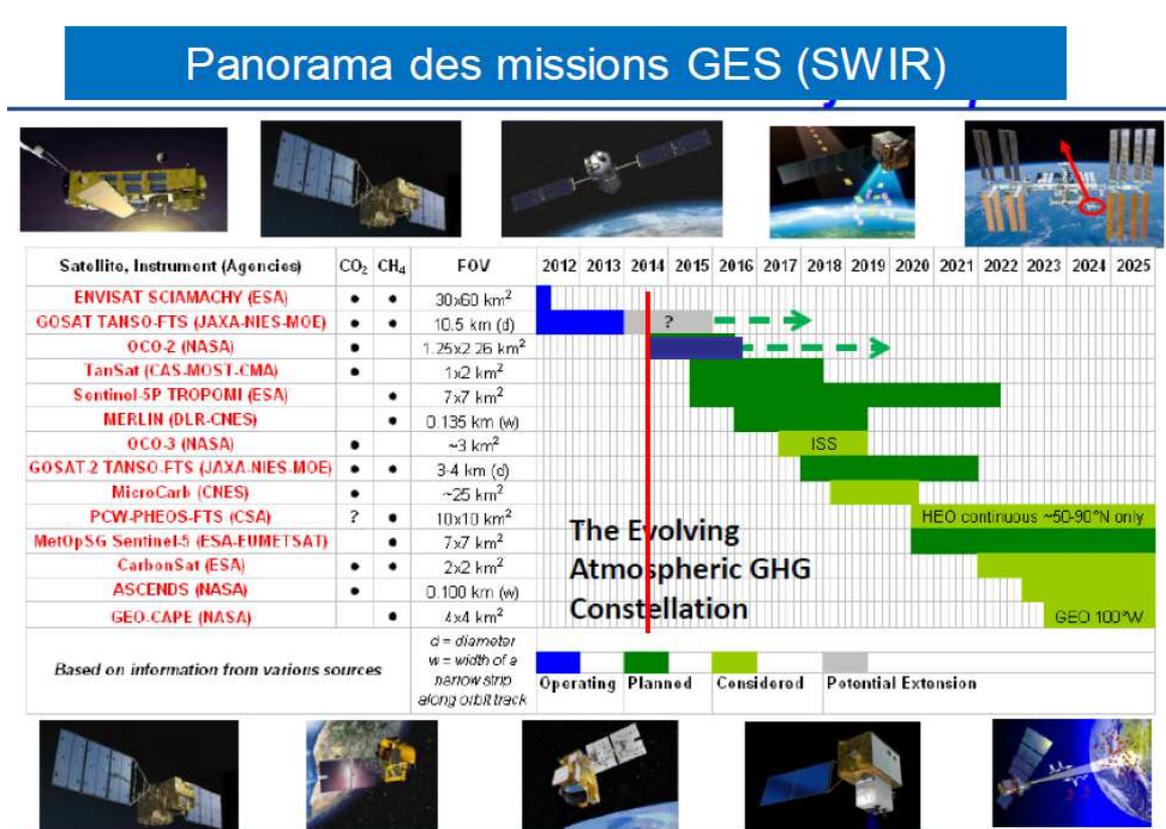


Figure 3 : Missions GES

<sup>6</sup> Le Cospace est un comité de concertation Etat-Industrie qui regroupe tous les acteurs de la filière spatiale : CNES, Ministères concernés, communauté scientifique, industriels incluant maîtres d'œuvre et PME, opérateurs satellites.

### 3. Le projet contre-expertisé

#### 3.1. Les objectifs du projet Microcarb

En plus des deux objectifs cités précédemment (assurer la continuité des mesures acquises par les satellites US et nécessité pour l'Europe d'être présente sur cette thématique), Microcarb a des ambitions d'ordre techniques :

**Améliorer de 50 % la mesure des flux de CO<sub>2</sub> échangés entre la surface terrestre et l'atmosphère.**

Ceux-ci sont essentiellement pilotés par l'activité de la végétation. Même si ces flux montrent des variations jour à jour, et un cycle journalier, on cherche à mesurer les flux moyens sur une période de 7 jours.

Ces flux sont actuellement mal connus. L'ordre de grandeur est de quelques grammes de Carbone par m<sup>2</sup> et par jour. L'incertitude est de l'ordre du gramme (par m<sup>2</sup> et par jour), et on souhaite donc réduire cette incertitude d'un facteur au moins 2. Bien évidemment, il s'agit là de valeurs typiques, avec des variations régionales importantes (les flux sont très différents sur la savane pendant la saison sèche de ceux sur une forêt européenne au printemps...).

En utilisant un simulateur d'observation Microcarb, couplé à un modèle de transport atmosphérique, le LSCE et Noveltis ont pu faire le lien entre la précision et la densité des mesures obtenues par Microcarb (qui sont données par les études CNES) et la précision sur les flux accessibles (qui est l'objectif final de la mission. Bien sûr lorsqu'on fait ce lien il y a des incertitudes liées aux biais de mesures et sur la vraie précision du modèle de transport.

Selon la spécification mission de Microcarb pour le suivi des flux de CO<sub>2</sub>, le maillage du modèle de flux doit être plus fin que 500 x 500 km. Le maillage actuel du modèle de transport LMDz est de 2.5° x 3.75° donnant des mailles de taille variable selon la latitude (400 km x 275 km à l'équateur). Ces modèles devant s'affiner dans les années qui viennent, et les distances de corrélation des mesures étant de l'ordre de 50 à 100 km, il est intéressant, pour une mission visant à mieux connaître les flux globaux, de considérer un maillage de mesures de l'ordre de 100 à 200 km, à l'horizon de la semaine, les données de concentrations étant assimilées à cet horizon de temps pour déterminer les flux.

Le choix de l'orbite de Microcarb est optimisé pour assurer un échantillonnage régulier de concentration de CO<sub>2</sub> cohérent avec ce maillage : une répétitivité de passage de 7 jours avec un échantillonnage tous les 400 km à l'équateur (200 km à 45 degrés), et la possibilité grâce à l'utilisation d'un miroir à changement de visée de porter cet échantillonnage à 100 km.

**Fournir des mesures de concentration de CO<sub>2</sub> avec une précision de 1 ppm**

Pour tenir l'objectif de précision sur les flux de surface de CO<sub>2</sub>, la mission MicroCarb doit fournir, avec l'échantillonnage spatial précédemment décrit, des mesures de concentration de CO<sub>2</sub> avec une précision d'erreur aléatoire de 1 ppm et de biais régionaux (échelle de 1 000 km) inférieurs à 0,1 ppm.

Plusieurs compromis entre performances radiométriques et spectrales sont possibles pour atteindre la précision de 1 ppm. Le choix instrumental fait pour Microcarb est d'avoir une très haute résolution spectrale (de l'ordre de  $\lambda/\delta\lambda=25\ 000$ ), tout en ayant une résolution radiométrique élevée dans l'absolu (SNR entre 200 et 500). On cherche ainsi à limiter la signature instrumentale dans la mesure, et donc à être très robuste aux méconnaissances résiduelles de l'instrument. Ce point de fonctionnement garantit de faibles biais de mesure sur la concentration en CO<sub>2</sub>. La tenue de ce dernier objectif est importante pour la précision du modèle de transport.

Cette mission à caractère global est bien adaptée à l'étude globale des flux car les réseaux sols de mesures de CO<sub>2</sub> sont incomplets, de répartition géographique inhomogène, et difficilement inter-calibrables.

### **Assurer une continuité avec les mesures effectués par le satellite OCO-2**

Le satellite OCO-2 a une durée de vie nominale de l'ordre de 5 ans, il est nécessaire, pour mieux connaître les évolutions des flux naturels, de continuer les acquisitions de mesures. La continuité des acquisitions de mesures sur de longues périodes permet de calibrer les modèles, de tenir compte des variations saisonnières de la végétation et de détecter les évolutions de la réponse des systèmes naturels aux sollicitations grandissantes de l'évolution de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère.

### **Préparer la poursuite de ces acquisitions dans le cadre d'un futur système opérationnel avec des satellites récurrents, ceci étant facilité par le faible encombrement de l'instrument**

Ces mesures seront nécessaires dans un futur système opérationnel, elles pourront être acquises de différentes façons : l'instrument de type de celui de CarbonSat permettra de les effectuer, ou bien un instrument complémentaire, qui peut être un récurrent de celui de Microcarb sera embarqué soit sur un satellite de type Microcarb, soit en passager d'un autre satellite.

## **3.2 Principe de la mesure instrumentale, description de l'instrument**

Les flux de CO<sub>2</sub>, d'origine naturelle ou anthropiques sont calculés à partir de mesures des luminances rediffusées par la surface terrestre (diffusion par les sols et mesures sur le *glint* solaire sur les océans afin d'avoir un signal suffisant) dans des longueurs d'ondes proche infrarouge et moyen infrarouge choisies par la présence de raies d'absorption de l'Oxygène et du CO<sub>2</sub>. Dans ces bandes spectrales la lumière rediffusée par la surface terrestre comporte des raies d'absorption dont la profondeur est proportionnelle à la concentration de CO<sub>2</sub>. Les mesures pour la bande où existent des raies d'absorption de l'Oxygène permettent de calculer la concentration de CO<sub>2</sub> dans la colonne d'air.

Ces mesures sont acquises par l'embarquement d'un spectromètre passif sur le satellite.

Un télescope effectue l'image d'une bande de 12 km au sol grâce à une fente placée à l'entrée de l'instrument. La luminance reçue de cette bande de terrain est reçue dans le spectromètre et est dispersée par un réseau. Deux matrices de détecteurs de 1024 sur 1024 éléments permettent de recueillir l'information une pour le proche infrarouge, une autre pour les bandes moyen infrarouge. Cette dernière matrice est refroidie à 160 deg K à l'aide d'un radiateur passif regardant l'espace froid.

Un des côtés de chaque matrice de détection est placé perpendiculairement à la vitesse au sol du satellite, il correspond à la bande de 12 km. Le second côté de la matrice recueille les différentes couleurs de la lumière dispersée par le réseau en entrée du spectromètre. Une lame dichroïque permet de séparer la bande proche infrarouge et celles dans l'infrarouge moyen. Le choix, par programmation des numéros de lignes de la matrice que l'on enregistre à bord permet de sélectionner les bandes spectrales choisies (quelques différences dans la conception de l'instrument existent selon les deux propositions industrielles).

La ligne de 12 km est divisée en 3 parties de 341 détecteurs, correspondant à 4 km au sol. L'échantillonnage temporel, le long de la trace permet d'intégrer sur 10 km le signal reçu par chaque détecteur (principe *push broom* bien connu depuis le programme Spot). Cela permet de constituer à bord un champ de vue instantané (IFOV), de 4 km X 10km environ qui constitue le pixel élémentaire de mesure des luminances. Il y a 3 IFOV en parallèle qui sont acquis et transmis au sol après archivage à bord dans une mémoire de masse lors du passage au-dessus d'une station de réception de la télémessure satellite.

### PHASE A : CHOIX D'UN CONCEPT SPECTROMÈTRE À RÉSEAU PRINCIPE DE BASE (2/3)

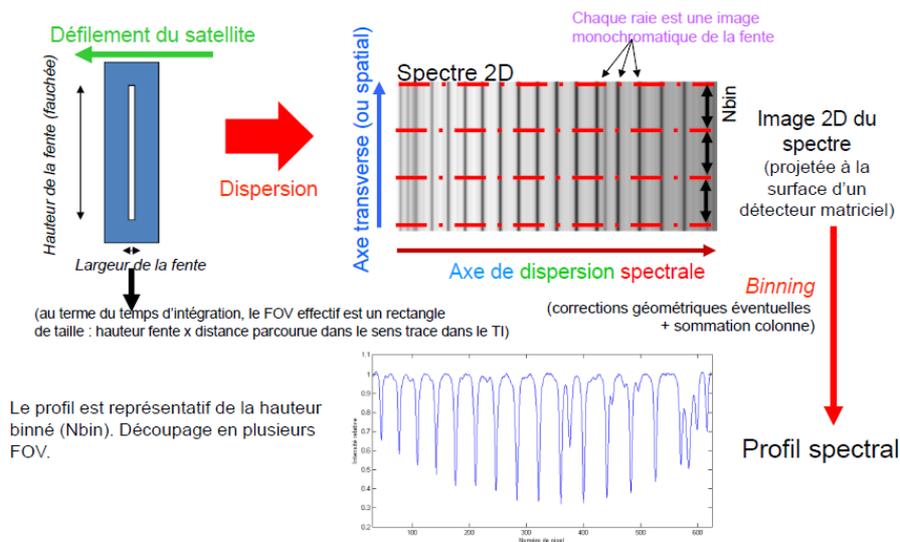


Figure 4 : Principe de la prise de vues

## Bandes spectrales de Microcarb

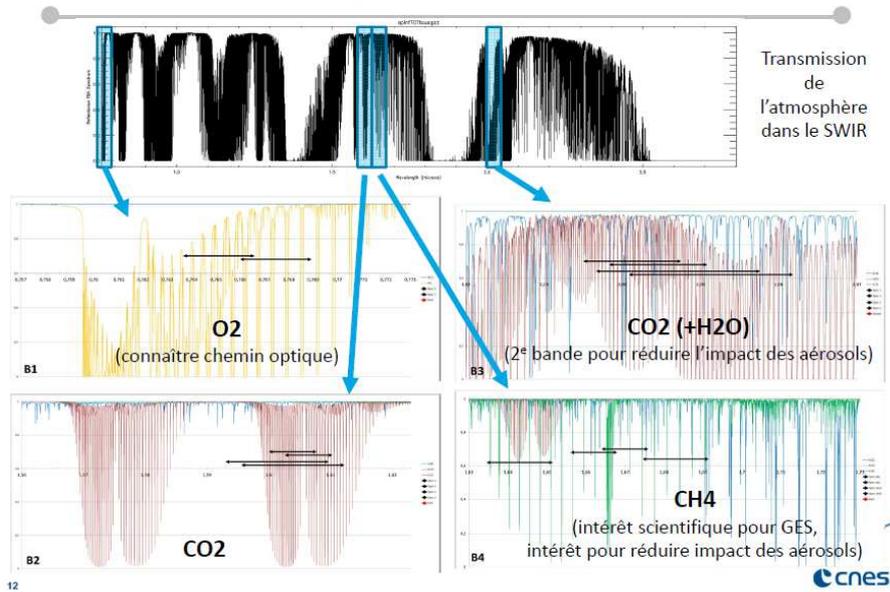


Figure 5 : Sélection des bandes spectrales intéressantes pour la mission

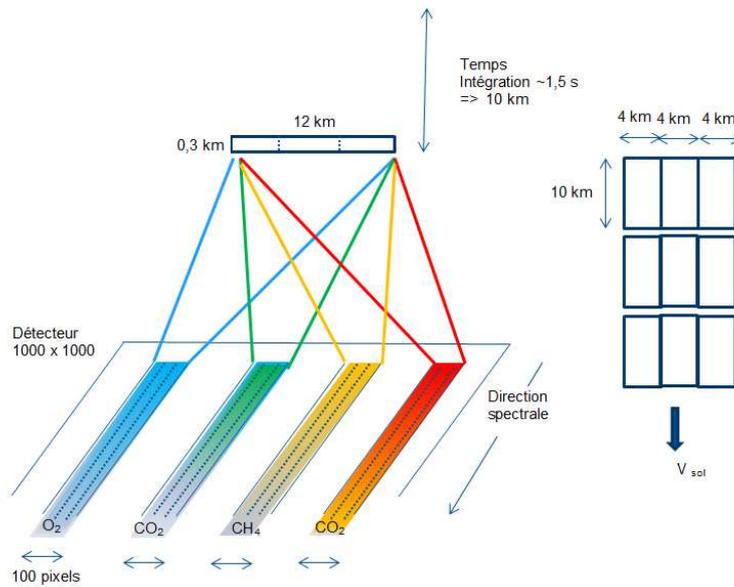
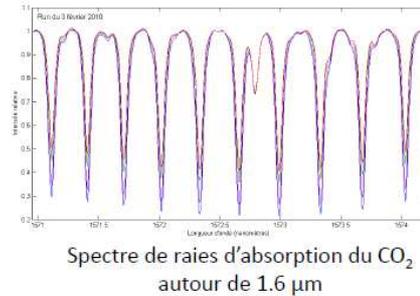
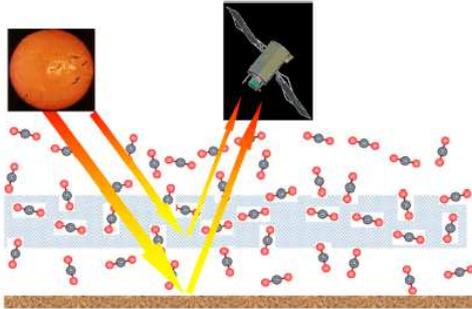


Figure 6 : Principe de l'acquisition des couleurs

## Ce que mesure Microcarb

- On ne peut pas mesurer directement des flux de CO<sub>2</sub> par télédétection
- Principe de Microcarb: mesurer, dans le proche infrarouge, le flux solaire réfléchi par la surface terrestre qui présente des raies d'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique



- Au 1er ordre, plus la concentration en CO<sub>2</sub> est grande, plus les raies sont profondes
- Chaque mesure Microcarb permet d'obtenir une concentration (locale) de CO<sub>2</sub>
- Bien maîtriser la physique du transfert radiatif pour obtenir une performance pointue



**Figure 7 : Principe de mesure de la réflectance des sols par l'instrument**

Le spectromètre possède deux bandes spectrales dans l'IR moyen (raies d'absorption du CO<sub>2</sub>) autour de 1,6 micron et 2,1 microns, et une bande dans le proche infrarouge pour mesurer la concentration d'oxygène.

De par son principe, l'instrument permet d'implanter une 4<sup>ème</sup> bande spectrale autour de 1,7 microns bande où existent des raies d'absorption du CH<sub>4</sub>, permettant également d'améliorer les mesures de CO<sub>2</sub> par correction des aérosols.

La compacité de l'instrument est obtenue grâce à l'utilisation de trois brevets CNES sur la méthode de dispersion spectrale de la lumière. La masse de l'instrument est de 60 kg (à comparer aux masses des instruments autres tels que OCO-2, 135 kg).

Les détecteurs sont constitués d'une matrice CCD pour la bande proche IR, existante fabriquée par EEV, et une matrice NGP développée par Sofradir pour l'IR moyen (SWIR) dans le cadre de Sentinel 5.

Un miroir de changement de visée en entrée de l'instrument permet de déplacer l'axe de prise de vue latéralement par rapport à la trace, pour corriger de l'heure locale dans le cas d'injection sur une orbite non optimale du point de vue de l'heure locale.

Un imageur dans le rouge, complète l'instrumentation embarquée, de résolution au sol typique 120 m X 120 m et de champ de vue 13,5 X 45 km permet d'éliminer les petits nuages polluant les mesures de concentration de CO<sub>2</sub>.

La masse (comme la consommation) de cet imageur est intégrée au bilan de masse instrument.

Le bilan de masse satellite est de 170 kg + 30 kg de marge système. Ce bilan est géré par le CNES.

Un système de géolocalisation permet de positionner à 300 m près l'endroit de la mesure afin de corriger les mesures de l'altitude qui influe sur la pression d'oxygène.

L'orbite choisie doit respecter les contraintes de répétitivité décrites ci-dessus. Elle est héliosynchrone de façon à minimiser les variations d'éclairement des scènes le long de l'année, avec une heure locale de passage élevée en particulier sur l'hémisphère nord, être à une altitude telle que la trainée de l'atmosphère ne soit pas trop forte pour éviter de consommer trop d'hydrazine pour maintenir l'altitude et permettre une durée de vie de 5 ans et de respecter une rentrée dans moins de 25 ans par désorbitation du satellite.

Une altitude de 695 km et heure locale de passage au nœud descendant de 10h30 a été choisie comme orbite nominale de référence.

Le satellite peut également se dépointer pour compléter ce pointage si nécessaire, de permettre également au radiateur passif de ne pas avoir d'entrées de flux solaire. Cette agilité permet en outre de suivre une zone précise (*target mode*), au sol que l'on souhaite suivre pendant plusieurs secondes (mesure d'une émission ponctuelle ou mesure au-dessus de l'emplacement d'une station de calibration sol).

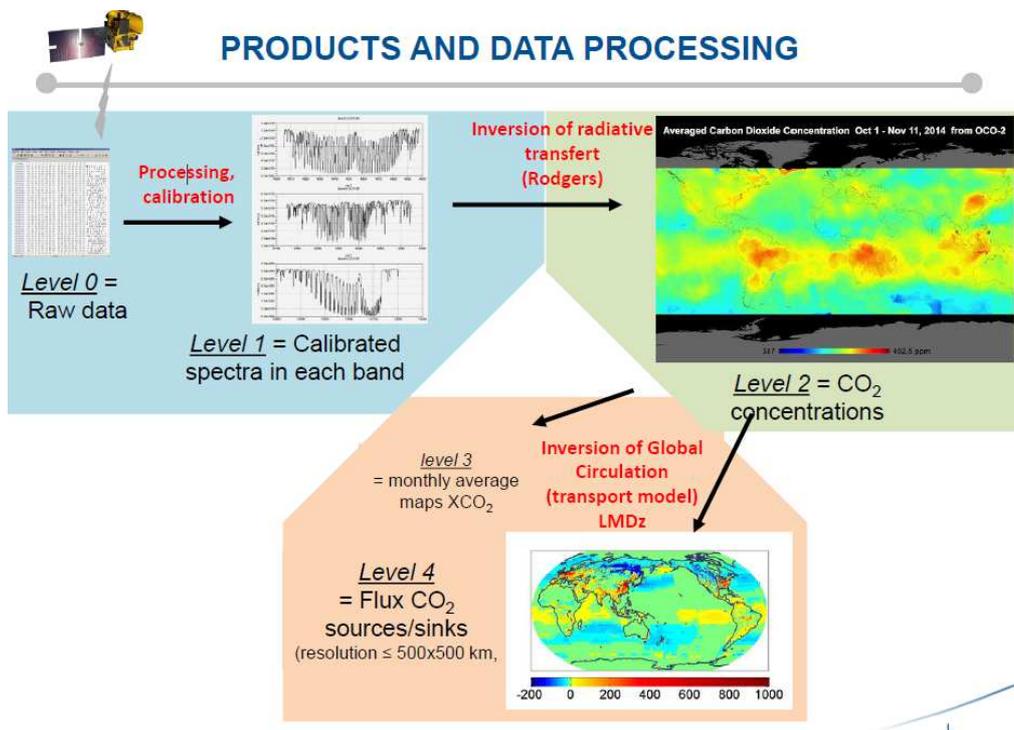
### **3.3. Le satellite Microcarb**

Le satellite utilise une plateforme de la famille Myriade du CNES, développée depuis 2000 et qui a déjà volé 19 fois avec succès. L'utilisation de cette plateforme spatiale de faible masse (200 kg pour la masse du satellite Microcarb) est possible grâce à la faible masse et au faible volume de l'instrument. Des améliorations de Myriade sont prévues pour emporter cet instrument, les principales sont : embarquement d'un récepteur GPS, pour la géolocalisation (utilisée pour la correction d'altitude du sol ou est effectuée la mesure ; introduction d'un senseur stellaire, pour améliorer la précision de pointage ; suppression des gyromètres ; l'introduction d'une roue de réaction complémentaire pour assurer une meilleure fiabilité ; ainsi que des modifications au niveau processeur bord pour parer des problèmes d'obsolescence de composants.

L'ensemble instrument, imageur, senseur stellaire est monté sur un banc optique ultra stable sur la plateforme.

En ce qui concerne la plateforme, les technologies utilisées sont déjà qualifiées ou en cours de qualification ; leur assemblage, leur intégration et leur validation sur Myriades sont à faire au cours du développement de Microcarb.

Le système proposé délivre différents produits en sortie du segment sol correspondant à des degrés différents de corrections des mesures.



**Figure 8 : Produits en sortie du traitement des mesures au sol**

Un simulateur de performances a été développé. Il est construit autour de plusieurs outils numériques et a permis de définir les spécifications instruments correspondant aux besoins mission.

Ce simulateur permet de calculer les performances scientifiques obtenues en entrant les modèles de correction des erreurs/distorsions instrumentales, les différentes corrections d'origine externe (élimination des nuages, effet des aérosols...). Il permet enfin l'évaluation des flux globaux. Ce simulateur est développé au LSCE.

Son utilisation est partagée par les équipes d'ingénierie et scientifiques.

## Les outils numériques

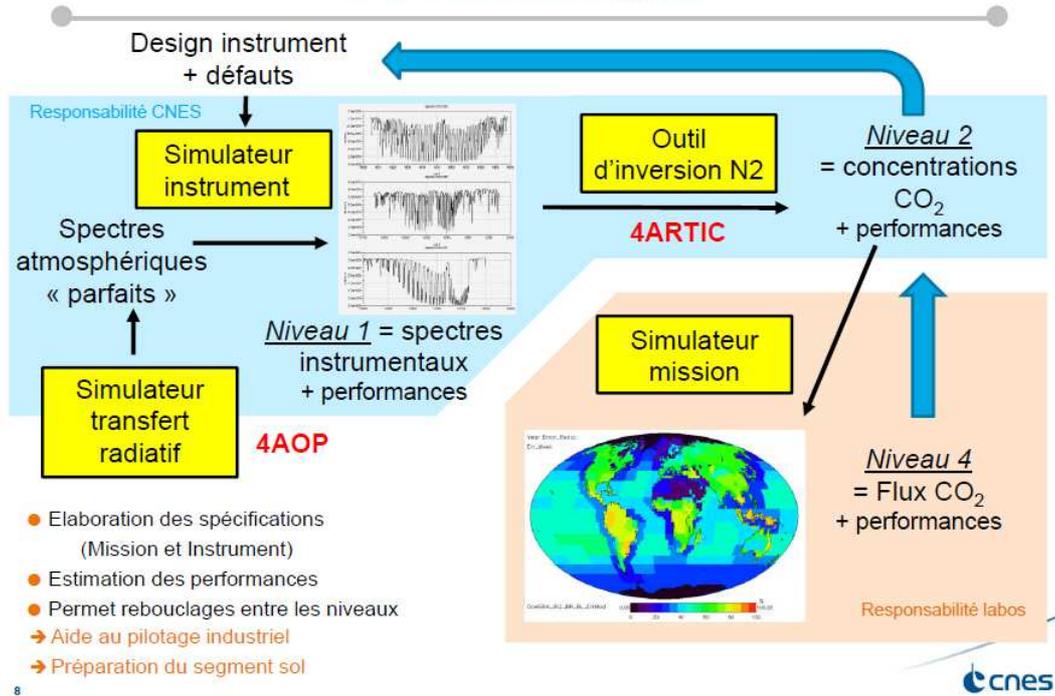


Figure 9 : Outils numériques de traitement au sol

## **4. Evaluation technique approfondie du projet Microcarb**

### **4.1. Méthode**

L'évaluation a été conduite par la lecture de la documentation fournie par le CNES, la documentation ESA et EC sur le même sujet. Des interviews de personnes de l'ESA, de l'équipe Projet du CNES, de la PME Noveltis, de l'équipe scientifique responsable de la mission Microcarb et partie prenante des projets spatiaux européens et internationaux sur le sujet, et d'experts d'organismes qui sont en charge des aspects vérification et inventaire du CO<sub>2</sub> (MDDE et CITEPA).

### **4.2. Performance de mesure et de modélisation**

L'approche proposée par le CNES et ses partenaires scientifiques est semblable à celle qui a été faite pour IASI, sondeur atmosphérique pour la Météo, instrument qui est devenu une référence pour ce domaine : associer autour d'outils numériques (incluant les mesures physiques, les caractéristiques de l'instrument, les traitements correctifs, et le modèle de prévision et d'évaluation des performances) les utilisateurs scientifiques et les concepteurs afin de définir les exigences de la mission et de conduire l'évaluation des performances avant vol et après. Cette approche a montré son efficacité par le passé. Cette méthodologie est appliquée au projet Microcarb.

La lecture des différents documents fournis, les discussions avec les équipes projet et scientifiques ainsi que les auditions ont permis de vérifier qu'à ce stade du projet la déclinaison des exigences de mission vers les différentes parties du système (instrument, satellite et sol) sont correctes et que les performances de mesure des concentrations de CO<sub>2</sub> devraient être tenues (performance de mesures de concentration de CO<sub>2</sub> de précision 1 ppm, avec un biais inférieur à 0,1). Des modèles de transfert et de calcul des flux existent et des améliorations sont en cours de développement. L'objectif d'amélioration de la connaissance de la prédiction des flux sur une période de 7 jours est l'objet du projet. La méthodologie mise en place pour tenir cet objectif est bien détaillée et les équipes aux manettes sont les experts capables de mener à bien cet objectif.

### **4.3. Crédibilité de l'atteinte des objectifs**

Les objectifs de meilleure connaissance des modèles de calcul des flux est l'objet du projet. Il faut beaucoup de contributions à ces modèles pour en améliorer la performance. A ce titre Microcarb apporte une contribution significative, et les équipes scientifiques sont associées de manière importante aux autres projets US, Japonais et plus tard Chinois qui compléteront les sources de mesures. Elles sont également associées aux autres équipes européennes (essentiellement allemandes, britanniques et néerlandaises) travaillant sur ce sujet pour la définition des futures missions européennes. C'est cette diversité des dispositifs de mesures qui permettra de mieux mesurer la précision de calcul et d'améliorer les modèles. Ces activités permettront de mieux définir les exigences des futurs systèmes opérationnels de prédiction d'évolution des climats, de comportement des systèmes naturels, de séparation entre les émissions naturelles et anthropiques et de contrôle des émissions anthropiques en complément des systèmes de déclarations et des moyens sol de mesures. Ces travaux permettent de mieux cerner les conséquences de ces émissions sur les évolutions des systèmes naturels, et le fonctionnement des puits de CO<sub>2</sub>.

Les débuts d'exploitation des données fournies par GOSAT et OCO-2 indiquent que ce type de mesure de concentration de CO<sub>2</sub> est faisable.

Pour suivre l'évolution des puits et des sources il est nécessaire d'avoir de longues séries de mesures (plusieurs saisons) pour bien calibrer les modèles et être capable de détecter les évolutions des réponses des systèmes naturels aux sollicitations du système climatique. D'où l'importance d'assurer une bonne continuité avec OCO-2.

#### 4.4. Compétence, organisation des équipes CNES, industrie et scientifiques

Le projet repose sur des équipes CNES et Industriels qui connaissent parfaitement le bus Myriades et la conception de tels instruments. Les équipes scientifiques des laboratoires (LSCE, LMD, LATMOS...) sont parmi les meilleures en Europe et dans le monde. La méthode de travail ensemble a été rodée par le passé sur de nombreux projets (IASI, Polder, Intégral, Microscope... parmi les plus récentes expériences) La capacité d'ingénierie et de pilotage de projets du CNES a été démontrée de nombreuses fois par le passé.

L'organisation proposée : CNES maître d'œuvre (MO) du système et du satellite, pilotant l'AIT<sup>7</sup> du projet ; des laboratoires en charge des aspects traitements sols, définition des exigences de mission, exploitation scientifique des données ; un support en renfort des personnels CNES par des sous-traitants connaissant la plateforme Myriade ; une base de fournisseurs des équipements stable et ayant déjà trempés dans les projets développés avec Myriade ; un MO instrument à choisir parmi les 2 MO français ayant la capacité de maîtriser ce type de développement complexe sont des atouts qui donnent une très forte crédibilité au projet.

#### 4.5. Analyse de risques, planning/coût et maturité du projet

Une analyse des risques détaillée du projet, ainsi qu'une estimation du planning et du coût total à achèvement ont été fournies par l'équipe CNES. L'analyse de ces informations est détaillée ci-après.

##### Planning

L'analyse du planning de développement montre que ce planning est très tendu, un relâchement des marges standard est nécessaire pour tenir l'objectif d'un lancement en 2020 (marge actuelle annoncée de 5 mois par rapport à fin 2020 ; la date objectif est octobre 2020), mais le projet a prévu dans ses marges de coûts un glissement possible de 18 mois, ce qui semble raisonnable. Un lancement en 2020 suppose un démarrage des activités de phase B et de développement instrument et satellite au 1<sup>er</sup> avril 2016, avec une mise en place des équipes industrielles et CNES début 2016.

Le planning le plus critique est celui de l'instrument, conception, mise au point et qualification. Les développements des détecteurs de l'infrarouge moyen, les approvisionnements des LLI (*long lead items*) tels que composants, processeurs, et l'électronique vidéo sont les chemins les plus critiques. Des maquetages sont prévus en phase B/C afin de minimiser ces risques.

La sélection du Maître d'œuvre de l'instrument reste encore à faire et il faudra une montée en puissance rapide des équipes, et sans doute un travail en double shift pour les parties de développement qui le permettent (essais, AIT). On verra comment l'industriel s'organise pour la conception détaillée (concurrent design par exemple) pour tenir au mieux le planning.

---

<sup>7</sup> Opérations d'Assemblage, d'Intégration des équipements, des câblages et d'essais (tests) du satellite.

En ce qui concerne la plateforme Myriades et les modifications prévues, le planning est moins critique. Il suppose une mise en place dès maintenant d'approche concurrente et le passage en double shift pour l'AIT satellite. Des maquettings pour accélérer le développement et la validation du logiciel de vol.

L'expérience des équipes CNES et Industrie de la plateforme Myriades est de ce point de vue une garantie essentielle de la crédibilité des développements de la plateforme, en particulier du banc système et du logiciel de vol adapté au changement de processeur qui sont souvent dans les projets des chemins critiques. Il faudra faire attention aux risques d'impasses techniques et sur la validation pour tenir le planning.

Des mesures en diminution des risques ont été prises ou sont prévues telles que maquettings de parties délicates instrument, suivi rapproché du planning, concertation étroite initiée avec les organismes tutelles des laboratoires et ces laboratoires eux-mêmes. Le manque chronique de ressources des laboratoires constitue un risque assez fort ; il est diminué par les marges prises par le CNES pour pouvoir recruter des personnels temporaires dans les laboratoires. Il faut noter que la philosophie adoptée de réaliser un modèle PFM est peu robuste à un échec au lancement. Dans ce cas il serait nécessaire si on souhaite faire voler une deuxième version de Microcarb de réapprovisionner un satellite (3-4 ans de délai) et un coût significatif.

#### **Coût à achèvement**

L'estimation des coûts du projet est assez complète (175 M€ TTC pour le système complet dont 65 M€ pour l'instrument) avec des marges quantifiées pour les aléas identifiés par le projet. Le fait que le choix du Maître d'œuvre instrument n'est pas choisi constitue un élément de risque d'aléa important. La compétition sur cette partie devrait limiter ce risque, cependant l'expérience montre que les négociations sont toujours difficiles pour lever les exceptions que l'industriel tentera d'imposer surtout une fois le choix fait pour converger entre les estimées CNES et l'industrie. La marge de 18 mois prise par le projet sur les risques de glissement du planning est de ce point de vue une bonne précaution. A ce stade du projet, l'expérience du CNES constitue la meilleure confiance sur la tenue du coût à achèvement, par les marges prises à ce stade du projet.

#### **4.6. Maturité du design**

On est en fin de phase A/B1 en termes ESA. Le design a été amélioré par rapport aux études de début de phase A. Il reste des points à vérifier : design et performances du radiateur passif pour garantir des températures de fonctionnement des détecteurs à 160 deg K, correction des sources de pollution externes du signal mesuré... L'ensemble des contraintes spécifiques liées au contexte de développement du projet et aux exigences mission sont bien prises en compte.

Le réseau dispersif permettant la dispersion de la lumière est en développement, des maquettes existent, la tenue du bilan de masse sera une contrainte difficile.

On dispose d'une bonne analyse mission système et d'une bonne coopération entre le CNES et les laboratoires scientifiques qui se sont montrés très favorables à cette mission essentielle pour leur évolution future.

Un maquetting a été réalisé pour valider les éléments de la chaîne de détection.

Il ne devrait pas y avoir de grosses surprises de ce point de vue.

#### **4.7. Maturité des technologies**

Les technologies plateforme sont largement développées, celles de l'instrument sont à un niveau de TRL 5 ou 6 (Réseau dispersif, diffuseur de calibration, brouilleur de polarisation) ce qui est correct vis-à-vis de l'état d'avancement du projet (fin de phase A). De nombreuses parties constituant la plateforme sont des éléments récurrents sauf le micro perforateur pour la passivation du réservoir pour respecter la contrainte LOS.

Le développement des détecteurs NGP utilisés pour l'infrarouge moyen est un élément critique. Le fait que Sentinel 5 en assure le développement est une bonne assurance de disposer d'un bon détecteur, satisfaisant le besoin. La compatibilité de sa mise à disposition avec le planning de l'instrument est un chemin critique. Le détecteur infrarouge existe et a déjà volé.

La stabilité dimensionnelle de l'ensemble senseur stellaire, instrument, imageur est une technologie maîtrisée.

Pour les nouveaux équipements de la plateforme (senseur stellaire...) les technologies sont qualifiées mais sont à valider dans le cadre de la réalisation du projet (TRL 4,5).

Le recueil des données avec le réseau CNES ne pose pas de problème particulier.

Le lancement présente une difficulté sur deux points : date de lancement liée à la possibilité d'avoir un co-passager pour un lancement double sur le même type d'orbite, ce qui peut imposer des retard planning, ainsi que la nécessité de corrections d'orbite ou de l'utilisation du miroir de changement de visé si l'heure locale de l'orbite est différente.

La LOS (loi sur les opérations spatiales) est respectée.

#### **4.8. Positionnement du projet par rapport aux autres projets de même nature**

Avec le report de CarbonSat, Microcarb est le seul projet européen crédible pour un lancement en 2020, aucune autre solution très différente n'est possible sans un report significatif de la date de lancement (par exemple OCO-3 sur un SL européen, autre design.... tout cela reporte le vol d'au moins 3 à 4 ans). C'est le constat fait dans le rapport de la Commission publié suite à la non-sélection de CarbonSat comme mission Explorer 8, qui annonce un premier satellite possible pour 2025 si ses caractéristiques ne sont pas très différentes de celles de CarbonSat.

Microcarb se situe bien en précurseur des missions de connaissance et monitoring des contenus de CO<sub>2</sub>.

Il faut noter que de par sa conception l'instrument permet de mesurer les concentrations de CH<sub>4</sub> dans la même colonne d'air que celle de mesure du CO<sub>2</sub>. De plus l'instrument par sa flexibilité de conception (souplesse de regroupement des éléments des détecteurs, et possibilité de ralenti de la vitesse de défilement par rotation du satellite) peut conduire des expérimentations de mesures de flux anthropiques localisés, et d'imagerie sur un champ limité à 12 km avec des performances légèrement dégradées en précision radiométrique.

## 5. Evaluation socio-économique du projet Microcarb

### 5.1. Analyse Coût-efficacité

L'évaluation technique du projet Microcarb a permis de conclure que cette mission sera selon toute vraisemblance à même de remplir son objectif principal, à savoir fournir des mesures suffisamment précises de concentrations en CO<sub>2</sub> pour l'ensemble du globe permettant d'améliorer significativement la précision des modèles d'estimation de flux totaux de CO<sub>2</sub>, à l'échelle des grandes régions et sous régions de la planète.

Dans un premier temps, on peut examiner le coût du projet au regard de cet objectif et se demander si cet objectif pourrait être atteint à coût moindre.

#### Coût des mesures satellitaires pour améliorer la précision des prédictions des flux de surface de CO<sub>2</sub>

Avec un coût estimé du projet d'environ 160 M€ HT (auquel on peut éventuellement ajouter les coûts déjà engagés au titre de la phase A, soit 14 M€), le projet Microcarb satisfait au critère de coût/efficacité d'une mesure satellitaire. En effet, la mission OCO-2, dont les performances en termes de précision *in fine* de la mesure des XCO<sub>2</sub> sont très comparables à celles de Microcarb, a bénéficié d'un budget de l'ordre 467,7 M\$ (~ 435 M€)<sup>8</sup> et la mission OCO-1 (dont les produits attendus étaient identiques) d'un budget de 209 M\$ (~195 M€)<sup>9</sup>. La mission japonaise en vol GOSAT, dont les performances sont moindres et insuffisantes pour atteindre la précision requise de 1 ppm sur le CO<sub>2</sub>, a quant à elle bénéficié d'un budget de 364 M\$ (340 M€).

Hungerschoefer et ali.<sup>10</sup> ont comparé les performances (en termes de réduction d'erreur sur les estimations de flux de CO<sub>2</sub>) de différents systèmes d'observation, et parmi eux OCO (OCO-1 à l'époque de l'article) et un projet de satellite de 2009 utilisant un système de mesure de type LIDAR (A-Scope, non retenu finalement par l'ESA). En termes d'efficacité, ce système domine le satellite OCO, avec une réduction d'erreur supplémentaire de l'ordre de plus ou moins 10 points de pourcentage sur les flux hebdomadaires (et quelques points sur les flux annuels).

#### Coût des mesures avec usage des données au sol pour le même objectif scientifique

Ce différentiel demeure lorsqu'on considère des scénarios mixtes (satellite + réseau sol), plus conformes à la pratique : 90,5 % de réduction pour A-Scope+réseau sol contre 85,3 % pour OCO + réseau sol en Europe (respectivement 87,3 contre 77,3 en Sibérie, 53,1 contre 46,7 en Amérique du Nord). Pour autant, en supposant que les gains attendus en termes de précision avec Microcarb sont du même ordre que ceux d'OCO, l'indicateur qui rapporte le gain attendu (en % de réduction d'erreur) au coût de la mission (M€) reste favorable à Microcarb (cf. tableau ci-dessous), car le moindre coût budgétaire de Microcarb (160 M€ contre 200 M€ pour A-SCOPE) fait plus que compenser sa moindre performance en termes d'erreurs de prévision.

---

<sup>8</sup> Source : NASA, OCO-2 Press Kit, juillet 2014

<sup>9</sup> Source : NASA, OCO Mishap Investigation Results

<sup>10</sup> Source : HUNGERSHOEFER, K., BREON, F.-M., PEYLIN, P., et al. *Evaluation of various observing systems for the global monitoring of CO<sub>2</sub> surface fluxes*. Atmospheric chemistry and physics, 2010, vol. 10, no 21, pp. 10503-10520

Alternativement aux mesures satellitaires, il pourrait être envisageable de développer les réseaux de mesure au sol existants pour améliorer la précision des modèles. Hungershofer et al. (citée *supra*) ont ainsi montré qu'un scénario d'extension du réseau de mesures au sol de 200 M€ (scénario A = 418 nouvelles stations + équipement de 41 existantes / scénario B=168 stations dont 131 nouvelles tours et équipement de 38 existantes), permettrait de réduire les erreurs d'estimation hebdomadaire de flux de CO<sub>2</sub> dans la même proportion qu'un satellite de type OCO combiné avec le réseau sol existant. Dans certaines grandes régions (Europe, Sibérie, Amérique du Sud, Amérique du Nord), la réduction d'erreur via l'extension du réseau sol est même supérieure de quelques points de pourcentage (2 à 3) au scénario avec satellite OCO. En supposant toujours que les gains attendus en termes de précision avec Microcarb sont du même ordre que ceux d'OCO, l'indicateur qui rapporte le gain attendu (en % de réduction d'erreur) au coût de la mission (M€) reste toujours favorable à Microcarb, même en Amérique du Nord où l'avantage du scénario d'extension du réseau sol était le plus significatif.

	Europe	Sibérie	Amérique du Sud	Amérique du Nord
Réseau Sol existant	% réduction erreur (flux hebdo.)			
+ Extension réseau sol	93,1	91,2	97,3	57
+OCO	85,3	77,3	93,6	46,7
+ A-SCOPE 2.0 (LIDAR)	90,5	87,3	94,9	53
Réseau Sol existant	% réduction erreur / M€			
+ Extension réseau sol (200M€)	0,47	0,46	0,49	0,28
+OCO (200M€)	0,43	0,39	0,47	0,23
+A-SCOPE (200M€)	0,45	0,44	0,47	0,27
+MicroCarb (160M€)	0,53	0,48	0,59	0,29
+MicroCarb (174M€) - yc. coût phaseA	0,49	0,44	0,54	0,27

Source : d'après HUNGERSHOEFER, K., BREON, F.-M., PEYLIN, P., et al., (*supra*), Table 1

## 5.2. Analyse Coûts-Bénéfices

L'analyse socio-économique du CNES a bien identifié qualitativement les différents bénéfices associés au projet MicroCarb.

### Bénéfices scientifiques

Les bénéfices attendus sont d'abord d'ordre scientifique, *via* l'amélioration de l'information disponible pour les modèles d'estimation des flux de CO<sub>2</sub> au niveau régional, et le développement des connaissances scientifiques sur le fonctionnement du cycle du carbone et les comportements des grands écosystèmes dans un contexte de changement climatique.

Néanmoins, l'apport additionnel des mesures fournies par MicroCarb pour la réduction des erreurs d'estimation des flux des modèles doit encore être précisé. Si on suppose que les phénomènes naturels qui sont à l'origine des flux de CO<sub>2</sub> et des concentrations qui en résultent ne se modifient que très marginalement à un horizon de 5/10 ans par rapport à la période d'acquisition des données satellitaires, le gain marginal en termes de précision à attendre d'un prolongement ou d'une répétition des mesures sur cet horizon est décroissant.

D'après les scientifiques auditionnés, l'acquisition de mesures supplémentaires sur la période 2020/2025 est en revanche souhaitable pour constituer une série temporelle longue et suivre l'évolution du cycle du carbone et des écosystèmes dans le cadre du changement climatique.

Plus largement, toujours en termes scientifiques, le projet aura des retombées positives *via* la montée en compétences des laboratoires sur le transfert radiatif (passage de la mesure spectrométrique à la mesure physique), le renforcement de l'excellence française sur les techniques d'inversion et la maîtrise des outils de modélisation et d'assimilation, et l'acquisition de technologies innovantes (plusieurs brevets liés au dispositif instrumental de mesure ont déjà été déposés par le CNES lors de la phase A du projet).

Ce projet peut enfin offrir la visibilité et le contenu nécessaire à une mobilisation durable, cohérente et organisée des ressources de la recherche française autour des problématiques de la mesure satellitaire des gaz à effet de serre et plus largement des observations satellitaires au service des enjeux environnementaux.

### **Bénéfices à travers des actions futures de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>**

Au-delà de ces bénéfices scientifiques, qu'il est difficile d'évaluer quantitativement, on peut supposer que les connaissances acquises seront mobilisées, *in fine*, pour l'action et contribueront, dans une certaine mesure, aux actions futures de réduction des émissions de gaz à effet de serre (« grâce à Microcarb, nous serions mieux à même de quantifier et localiser les flux naturels de carbone [...], cela devrait permettre de mieux gérer les actions de limitation d'émission ou d'actions de déforestation »<sup>11</sup>).

Pour évaluer ce bénéfice à titre illustratif, nous proposons de retenir une hypothèse très prudente et de considérer que le projet Microcarb contribuera, à hauteur de 0,01 %, à la réduction des émissions à compter de 2030 (fin de mission 2025, analyses et élaboration des connaissances entre 2025 et 2030 et connaissances opérationnelles disponibles à compter de 2030), dans un scénario favorable de trajectoire compatible avec la limitation des températures à +2°C en 2100 (UNEP, Gap Emissions Report 2014). En valorisant ces réductions conformément à la trajectoire de la valeur tutélaire du carbone adoptée dans le rapport Quinet (CGSP, 2013), les bénéfices actualisés s'élèveraient à un peu plus de 100 M€.

### **Bénéfices industriels directs**

Le développement de la mission (2016-2020) et sa phase d'exploitation (2021-2025) induiront un volume d'affaires qui bénéficieront aux industriels et sous-traitants divers qui seront chargés de la réalisation des différents composants de MicroCarb (instrument, système, satellite...).

A partir de l'estimation des emplois associés à ce volume d'activité proposée par le CNES (570 ETP pour la phase de développement, 40 ETP pour la phase exploitation, ETP liés au lancement non compris), on peut estimer les bénéfices associés en appliquant un ratio moyen de 0,1 M€ de valeur ajoutée (VA) par ETP observé dans le secteur de la construction aéronautique et spatiale<sup>12</sup>, soit près de 63 M€ actualisés.

---

<sup>11</sup> CNES, 2015. Analyse d'impact socio-économique

<sup>12</sup> Résultats comptables et financiers, ESANE 2010-2013, INSEE

### Bénéfices industriels indirects/induits

Dans l'analyse socioéconomique du CNES, le satellite Microcarb est également présenté comme le préfigurateur d'un système opérationnel de satellites de mesures de GES au niveau européen (« Microcarb doit être vu comme un démonstrateur pour un suivi à long terme du cycle du carbone » (p. 8), « Microcarb est une mission précurseur des futurs systèmes opérationnels de mesure des GES » (p. 17)<sup>13</sup>), et constituerait à ce titre une opportunité pour l'industrie spatiale française d'acquérir en amont une spécialisation et une maîtrise des technologies et des processus de production lui permettant de bénéficier ultérieurement d'un avantage compétitif pour le développement de satellites récurrents. Cette dynamique a en effet été manifeste dans le cas du développement de l'observation satellitaire météorologique ou de la mesure altimétrique : mission préfiguratrice (co-)réalisée par des industriels français (MeteoSat-1 en 1977 sous maîtrise d'œuvre française (Aérospatiale), mission franco-américaine Topex-Poseidon en 1993) et développements ultérieurs des satellites opérationnels confiés par EumetSat à Thales Alenia Space (les trois générations de MétéoSat, les satellites JASON 1, 2 et 3 et SWOT (à venir) pour l'altimétrie).

En poursuivant l'analogie avec la filière opérationnelle météorologique, l'investissement initial dans un projet expérimental de type Microcarb peut également permettre de donner à terme un avantage compétitif aux entreprises françaises sur les activités de service liées à la diffusion et l'utilisation des produits « CO<sub>2</sub> », et d'identifier plus précocement des utilisateurs potentiels de ces produits (organismes en charge des inventaires GES et du reporting par exemple).

Dans cette hypothèse, on peut évaluer un scénario dans lequel 5 instruments récurrents sur le modèle de celui de MicroCarb seraient réalisés et embarqués sur des satellites (5 missions de 5 ans de 2025 à 2050). Cet instrument, dont le coût peut être estimé à 20 M€ d'après le CNES à partir de l'analyse des offres des industriels, serait financé à hauteur de 16 % par la France (sa quote-part habituelle dans les programmes Eumetsat) et générerait une valeur ajoutée pour les industriels français de l'ordre de 6 M€<sup>14</sup> (qui par hypothèse se voient confier la réalisation des satellites grâce à la compétitivité de leurs offres acquises grâce à Microcarb), soit en effet un effet de levier de l'ordre de 2 et un bénéfice net (hors services « aval ») par mission de l'ordre de 3 M€ (6 M€ - (16 % de 20 M€)).

Toutefois, la mission Microcarb ne peut préfigurer *qu'une partie* du système opérationnel de suivi des émissions de CO<sub>2</sub> depuis l'espace car l'accès aux émissions anthropiques devra être assuré par d'autres systèmes. L'ESAC continue ainsi de recommander l'approfondissement du projet CarbonSat (même s'il n'a pas été retenu dans le programme Earth Explorer 8), notamment pour porter à maturité la technologie de spectromètre imageur de haute précision permettant d'accéder à la séparation des flux naturels et des émissions anthropiques.

---

<sup>13</sup> Ref 1-COSPACE-Microcarb-COP21

<sup>14</sup> Ratio moyen de VA par Chiffre d'affaires de 3,4, source : Insee, ESANE

De même, dans le rapport du groupe d'experts mandaté par la Commission européenne<sup>15</sup>, la mission préfiguratrice préconisée pour le suivi des émissions anthropiques est également plus proche des options retenues dans CarbonSat (« *This [XCO<sub>2</sub> measurements with required accuracy and repeated passes as needed] be achieved by a combination of LEO (Low Earth Orbiting) imaging instruments, possibly complemented by GEO capabilities by 2030* » p. 48). Les auteurs du rapport soulignent également l'intérêt de développer des technologies de mesures actives (LIDAR), performantes aux hautes latitudes et en période hivernale (p. 29), en complément des systèmes passifs.

Dès lors, le projet Microcarb a donc également un coût d'opportunité et une stratégie alternative ou complémentaire, évoquée également dans l'analyse du CNES, serait d'investir plutôt (ou simultanément) sur la recherche et le développement de telles technologies (spectro-imageur, lidar, mesure géostationnaire). Le développement de la mission MERLIN, qui utilisera la technologie LIDAR, répond déjà en partie à ce besoin.

### **Bénéfices politiques**

Le développement et le lancement de la mission MicroCarb permettrait à la France, et indirectement à l'Europe, d'occuper une place dans les mesures de CO<sub>2</sub> depuis l'espace, à l'heure où l'Europe a reporté (sans garantie) à un horizon plus lointain la mission CarbonSat et où les Etats-Unis, le Japon et la Chine ont lancé (ou vont lancer) des missions de ce type.

La mission est à même de contribuer à l'indépendance et l'autonomie de l'expertise française et européenne sur le suivi et l'analyse du changement climatique, et par conséquent de renforcer la capacité de la France à peser dans le cadre des négociations internationales sur le climat et les politiques d'atténuation et d'adaptation.

Enfin, cette mission peut s'inscrire dans la politique de soutien et de transfert à destination des pays émergents et en développement pour l'élaboration de leurs politiques climatiques. L'article de Hungershoefer et ali. déjà cité (cf *supra*) a en effet établi que dans le cas de la France, le réseau de mesures sol actuel (2010), et *a fortiori* son extension pour acquérir des précisions régionales ou encore plus localisées, domine nettement les observations satellitaires en termes de réduction d'erreur des flux (annuels ou hebdomadaires) de CO<sub>2</sub>. Le gain direct, en termes de maîtrise de la précision des estimations de flux de CO<sub>2</sub> pour la France, est donc quasi nul. Il est en revanche très important pour les pays dont les réseaux de mesure au sol sont inexistantes ou encore insuffisamment développés (Amérique du Sud, Afrique subsaharienne, Inde et Asie du Sud-Est...). Si les produits délivrés par la mission Microcarb sont mis à disposition de ces pays, le financement d'un tel projet sur fonds exclusivement français (ou même sur fonds européen) s'apparente donc à un transfert net au bénéfice de ces pays, et pourrait donc venir au crédit des engagements de la France dans le cadre du fonds à destination des pays du Sud que les pays développés ont prévu d'abonder à hauteur de 100 Mds\$ à compter de 2020. Pour mémoire, la France a annoncé lors de la dernière Assemblée Générale des Nations-unies une augmentation de 2 Mds€ de ses financements climat à l'horizon 2020, qui passeraient ainsi de 3 à 5 Mds€.

---

15 Ciais et ali., *Towards a European Operational Observing System to Monitor Fossil CO<sub>2</sub> Emissions*, octobre 2015

## Synthèse

Le tableau ci-dessous reprend les éléments de l'évaluation présentés ci-dessus. L'évaluation est réalisée en actualisant les chroniques de coûts et de bénéfices au taux de 4,5 %. Le coût total de 160 M€ HT sur la période 2016-2025 est ainsi équivalent à 144 M€<sub>2016</sub>.

L'estimation du bénéfice lié à la réduction des émissions que l'on pourrait imputer à la mission Microcarb repose sur des hypothèses nombreuses (cf. encadré méthodologique) et le lien de cause à effet entre les connaissances délivrées par la mission et les actions et les décisions qui pourraient être prises à moyen terme pour atténuer les émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> est complexe, sans doute ténu, et inextricablement lié à de nombreux autres facteurs. Pour autant, l'exercice garde une vertu illustrative : même en supposant une contribution très modeste (0,01 % des réductions d'émission), les bénéfices induits (pourtant lointains) sont quantitativement importants et de nature à équilibrer plus ou moins le coût du projet.

Par ailleurs, cette évaluation quantitative permet de souligner qu'une part substantielle des bénéfices du projet sont à imputer au reste du monde et ne sont donc pas strictement nationaux.

M€ "2016" actualisés	Coût	Bénéfices					Valeur Actuelle Nette (Bénéfices- Coûts)
		industriels : développement (2016-2020) + exploitation (2021-2025)	industriels post 2025 (satellites récurrents)	réduction émissions CO2 imputables à MicroCarb	scientifiques (connaissances , ETP labos)	politiques	
<b>Total</b>	142,4	61,8	6,4	105,3	n.e	n.e	31,2
France	142,4	61,8	6,4	1,1	-	-	
Monde	0	0	0	104,2	-	-	

**Source : chiffrage des auteurs**

## Encadré méthodologique

Le coût du projet et son profil temporel de 2016 à 2025 sont tirés des documents fournis par le CNES (Réf 19 -CARB-MGT-NT-468-CNES Ed 00 DJ prix).

Pour la phase développement et exploitation, les bénéfices industriels sont obtenus à partir des estimations d'ETP induits estimés par le CNES (en supposant, hypothèse favorable, qu'il s'agit intégralement d'ETP additionnels) et d'un ratio moyen de valeur ajoutée par ETP observé dans le secteur de la construction aéronautique et spatiale (Insee, ESANE). Le profil annuel des ETP est identique au profil du coût : cette approximation a peu d'incidence car sur la période de 5 ans, le différentiel d'actualisation joue peu.

Pour la phase post-2035 (instruments récurrents de 2030 à 2050), on a supposé que le coût de réalisation de l'instrument du satellite sur 5 ans se traduisait par un chiffre d'affaires pour le secteur de la construction aéronautique (20 M€), équivalent à environ 23 M€ de valeur ajoutée. De ce bénéfice on déduit la participation de la France (16 %) au financement du satellite pour calculer un bénéfice net.

Pour l'estimation des réductions d'émissions imputables au projet Microcarb, on a considéré une trajectoire d'émissions compatibles avec une hausse de +2°C des températures telle que proposée par l'UNEP, soit 42 GteqCO<sub>2</sub> d'émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> en 2030 et 21 GteqCO<sub>2</sub> en 2050. On a supposé ensuite qu'on pouvait imputer à la mission Microcarb, via les connaissances qu'elle apportera et les conséquences pour les actions d'atténuation que l'on pourra en tirer, 0,01 % de la réduction annuelle des émissions entre 2030 et 2050, soit 0,1 millions de tonnes par an (les émissions annuelles de GES de la France sont de 490 MteqCO<sub>2</sub>). On suppose que Microcarb ne produira des connaissances opérationnelles pour l'action qu'à compter de 2030 (5 ans de mission jusqu'en 2025, 5 ans d'élaboration de connaissances).

Cette réduction d'émissions est valorisée en utilisant le prix du carbone (croissant de 100 €/t en 2030 à 240 €/t) tel que proposé dans le rapport du CGSP (2013) sur la valeur tutélaire du carbone. Formellement, il ne s'agit pas véritablement d'un prix établi sur le principe de l'évaluation du coût marginal de la tonne de CO<sub>2</sub>, mais d'un prix découlant d'une optimisation sous une contrainte de trajectoire d'émissions. Les ordres de grandeur de ces deux approches ne sont pas forcément très éloignés et cette trajectoire de prix est plutôt conservatrice ici et défavorable au projet, car les estimations au coût marginal de la tonne de CO<sub>2</sub> émise conduisent à des niveaux de prix supérieures (voir par exemple Dietz and Stern (working paper 2014) où il est proposé un prix supérieur à 200 € dès 2035).

La trajectoire d'émissions retenue est plutôt « neutre » vis-à-vis du projet. Elle suppose que de gros efforts auront déjà été faits pour atteindre 42 GteqCO<sub>2</sub> en 2030 (la tendance « fil de l'eau » aboutit à 69 GteqCO<sub>2</sub> en 2030 et les engagements des pays pour la COP21 aboutiraient à 60 GteqCO<sub>2</sub>), sans que ces efforts puissent être en partie imputés à Microcarb (qui ne produit des effets sur l'action qu'à compter de 2030). A l'opposé, il y a naturellement un risque qu'aucune action suffisante ne soit prise et que les émissions continuent de croître. Formellement, ce risque, que l'on pourrait traduire par une corrélation positive entre réduction des émissions et niveau de croissance<sup>16</sup> viendrait diminuer le bénéfice espéré imputé à Microcarb en matière de réduction d'émissions.

---

<sup>16</sup> Voir par exemple CGDD, Taux d'actualisation et politiques environnementales, Etudes et Documents, n°42, mai 2011, p.11

La répartition (indicative) du bénéfice ainsi estimé entre la France et le Monde reprend la part des émissions de GES françaises dans le total des émissions mondiales (ce qui surestime clairement le bénéfice « France »).

Pour l'actualisation, on a retenu un taux d'actualisation de 4,5 % sur 30 ans (jusqu'en 2045 donc), décroissant ensuite tendanciellement vers 2 %, conformément aux préconisations du rapport Lebègue (2005). L'horizon d'évaluation des bénéfices (et des coûts) s'arrête en 2050 (hypothèse défavorable au projet), car la trajectoire du prix du carbone au-delà est encore plus délicate à établir.

Les bénéfices scientifiques *stricto sensu* (amélioration des connaissances) et politiques ne sont pas évalués.

## 6. Conclusion

Le projet évalué est un satellite dont l'objectif est la mesure des flux globaux de CO<sub>2</sub> entre les puits et les sources, avec une grande précision (1 ppm) et un très faible biais (0,1 ppm). Ces mesures permettront d'améliorer les modèles d'évaluation des flux de CO<sub>2</sub> moyennés sur une période de 7 jours, par des mesures régulières sur les zones éclairées de l'orbite du satellite. Un modèle de transport du CO<sub>2</sub> permet à partir des mesures de concentration de CO<sub>2</sub> le calcul de ces flux et de leur évolution.

Ce satellite constitue un des premiers maillons de la mise en place d'un dispositif opérationnel de suivi de l'évolution de la concentration de CO<sub>2</sub> qui sera mis en place dans un cadre international. Ce dispositif comprendra un réseau de stations sol, à l'état embryonnaire dans les pays du sud, des satellites et des modèles de transport atmosphérique permettant la mesure de la concentration de ce gaz et le contrôle des déclarations des Etats. La composante spatiale de ce dispositif devrait comprendre :

- un système d'imagerie pour séparer les flux anthropiques des flux naturels,
- un système de suivi de l'évolution des écosystèmes.

Microcarb se présente comme une solution astucieuse pour répondre au besoin de suivi de l'évolution des écosystèmes.

Ce satellite est un complément de ceux déjà lancés par les US et le Japon suivis par la Chine en 2017. Il doit permettre de continuer les mesures après Gosat 1 et OCO-2, et, dans un second temps, en s'inspirant des exemples du passé (Symphonie et les télécommunications commerciales, Ariane, IASI, Jason, Spot et, dans un domaine différent, Hélios) être relayé par l'ensemble des pays européens.

La technologie de l'instrument de mesure est aujourd'hui accessible aux industriels. Le planning de sa production est toutefois très tendu au sein du planning projet. L'adaptation de la plateforme à l'instrument ne présente pas de risque particulier. L'estimation du coût du projet comprend une marge pour aléas suffisante, sauf accident majeur.

Au-delà de l'assurance de la continuité des mesures après OCO et GOSAT, le lancement du projet Microcarb conduirait à :

- la mise en place d'une dynamique et d'une montée en puissance des équipes scientifiques sur la thématique de la mesure du CO<sub>2</sub> ;
- une attractivité accrue des équipes européennes de recherche sur ce sujet (All, UK, NL) ;
- une amélioration de la connaissance de l'évolution des concentrations de CO<sub>2</sub>, et du suivi des comportements des puits et sources naturels ;
- l'acquisition de mesures du CH<sub>4</sub> qui est également possible par cet instrument ;
- la mise en place de capacités industrielles et d'un mode de travail itératif industrie/scientifiques, permettant de préparer, en sachant de quoi on parle, la définition d'un futur système de contrôle international.

En revanche, si le projet ne se fait pas, on peut pronostiquer un maintien de compétences scientifiques à *minima* en Europe, pas de franchissement du seuil de connaissances sur cette problématique du changement climatique. Des coopérations seront possibles avec l'accès aux données acquises par des partenaires, essentiellement Japon et Chine, OCO-3 étant placé sur la station Internationale dont l'orbite est assez inadaptée à ce type de mission ; l'industrie ne sera pas bien préparée pour la réalisation des instruments nécessaires à un futur système opérationnel de suivi du CO<sub>2</sub> ; l'Europe sera à la remorque des autres partenaires internationaux, US, Japon, Chine en 2017.

L'analyse socio-économique de Microcarb conduit à un bilan globalement positif.

Le projet satisfait au critère de coût-efficacité par rapport à l'objectif de gain en précision des mesures de flux de CO<sub>2</sub>. Le projet est astucieux 60 kg/ 135 kg pour l'instrument US ce qui permet de l'embarquer sur un petit satellite (200 kg) de la filière Myriade du CNES.

Le gain en précision par rapport à OCO2 est sans doute moins important, mais l'acquisition de mesures supplémentaires sur la période 2020/2025 est souhaitable pour constituer une série temporelle longue et suivre l'évolution du cycle du carbone et des écosystèmes dans le cadre du changement climatique.

Les bénéfices industriels directs et induits à moyen terme avec la récurrence de l'instrument voire du satellite couvrent 50 % environ du projet.

Même en supposant une contribution très modeste des connaissances apportées par la mission Microcarb à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (0,01 % des réductions d'émission), les bénéfices induits (pourtant lointains) sont quantitativement importants et de nature à équilibrer le coût du projet.

En conclusion, Microcarb se présente comme un projet original permettant de mieux maîtriser les outils de modélisation et d'assimilation des données et de connaissance du comportement des écosystèmes. Il permet en outre d'assurer une continuité avec les mesures du satellite US OCO-2, et offre la possibilité de mettre en place une coopération plus étroite avec nos partenaires UK, D et NL. La conception compacte de l'instrument permet d'envisager de l'utiliser ultérieurement dans le cadre d'un futur système spatial opérationnel de monitoring du CO<sub>2</sub>.

Ce projet est la seule occasion pour la France et l'Europe d'être présente dans la mise en place d'un plan de suivi de l'évolution du CO<sub>2</sub> dès 2020. L'horizon pour un projet satellitaire européen semblable étant aujourd'hui reporté au-delà de 2025. Les risques sont maîtrisés et la France apparaît une nouvelle fois comme moteur.

Enfin, de par l'importance des bénéfices extra-nationaux du projet, la recherche de financements complémentaires internationaux paraît souhaitable (partenariats bilatéraux européens (Allemagne, Royaume-Uni...), coopération franco-américaine pour une mission post-OCO-2 reprenant le principe instrumental de Microcarb, financements européens ou internationaux au titre des politiques climatiques...) mais serait incompatible avec un lancement en 2020.

## Annexe 1 : Liste des institutions auditionnées

<b>Organisme auditionné</b>	<b>Date</b>
Head of the ESA Earth Observation Department "Science, Applications, and Future Technologies", EOP-S	26 octobre 2015
CNES (équipe du projet)	29 octobre 2015
NOVELTIS	30 octobre 2015
Laboratoires LSCE, IPSL et LATMOS	2 novembre 2015
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie	2 novembre 2015
CITEPA	3 novembre 2015

## Annexe : Liste des documents examinés

- Sachant que la mesure de CO<sub>2</sub> depuis l'espace est compliquée, et dans le contexte où la France va soutenir Carbonsat (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) à EE8 et propose aussi la mission Merlin (CH<sub>4</sub>), quels sont les atouts de la mission Microcarb (dans le contexte COP21) ? (Cathy CLERBAUX-CPS, 5 juin 2015, 18 pages)
- GMES Sentinels 4 and 5 Mission Requirements Document (EESA - Jörg Langen, Yasjka Meijer, Ellen Brinksma, Ben Veiheilmann, Paul Ingmann, 20 juillet 2010, 141 pages)
- GEO – Carbon strategy – La stratégie du Carbone (GEO, juin 2010, 50 pages)
- ESAC : Recommendation on the ESA Earth Explorer-8 Mission Selection (ESA, 18 septembre 2015, 4 pages)
- MICROCARB versus CARBONSAT (CNES, septembre 2015, 2 pages)
- Introduction aux programmes Observation de la Terre de l'ESA (CNES – Philippe LIER, janvier 2015, 16 pages)
- Les missions gaz à effet de Serre (C. DENIEL – DSP/CNES avc le concours de FM BREONS – LSCE et C. CREVOISIER – LMD, septembre 2014, 34 pages)
- Current systematic carbon – cycle observations and the need for implementing a policy – relevant carbon observing system (Biogeosciences, 2014, 56 pages)
- Spécification de l'instrument MICROCARB (CNES, 24 juin 2015, 69 pages)
- IAA Climate change and disaster management conference – Space systems for the Benefit of Earth Humankind – MicroCarb mission: a CNES initiative for monitoring the CO<sub>2</sub> exchanges (CNES, 17 septembre 2015, 14 pages)
- CEOS Strategy for Carbon Observations from Space – The Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) Response to the Group on Earth Observations (GEO) Carbon Strategy (CEOS Carbon Task Force, avril 2014, 216 pages)
  
- MICROCARB – Analyse d'impacts Socio-économique (CNES, 8 octobre 2015, 10 pages)
- Initiative COP-21 – Le CO<sub>2</sub> atmosphérique depuis l'espace – MICROCARB (CNES et COSPACE, 18 pages)
- Recommandations du Comité des Programmes Scientifiques (5 juin 2015, 5 pages)
- Rapport de synthèse du TOSCA (16 pages)
- Conclusions du Séminaire de Prospective Scientifique de la Rochelle (Jean-Loup Puget, Président du comité des Programmes Scientifiques du CNES, 6 pages)
- Proposition pour la mise en place d'une organisation Carbosphere. Sur l'acquisition des données spatiales et in-situ de concentration atmosphérique permettant la détermination des flux de gaz à effet de serre (Philippe Ciais et François-Marie Bréon, 19 pages)

- Les pôles thématiques de données et de service. Vers une infrastructure de recherche 'données d'observation de la Terre' à moyen terme - Présentation au MENESR (Pascale Ultré-Guérard et al, 4 mai 2015, 36 pages)
- Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system (Biogeosciences, 2014, 56 pages)
- Chaire Industrielle BridGES 'Bringing greenhouse gas science from research to industry' (Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines – ThalesAlenia Space, 22 octobre 2012, 19 pages)
- The carbon balance of terrestrial ecosystems in China (Shilong Piao, Jingyun Fang, Philippe Ciais, Philippe Peylin, Yao Huang, Stephen Sitch & Tao Wang, 2009, 7 pages)
- Convention de co-financement de bourse de recherches CEA/CNES concernant Cindy CRESSOT (CNES, 13 octobre 2010, 14 pages)
- La " STERN REVIEW " : l'économie du changement climatique (5 pages)
- Politique climatique : une nouvelle architecture internationale (Jean TIROLE, 2009, 358 pages)
- Introduction aux programmes Observation de la Terre de l'ESA (Philippe LIER, janvier 2015, 16 pages)
- Global Monitoring for Environment and Security Atmosphere Core Service (GACS) Implementation Group – Final Report (GAS Implementation Group, avril 2009, 100 pages)
- GMES SENTINELS 4 AND 5 MISSION REQUIREMENTS TRACEABILITY DOCUMENT (ESA, 20 septembre 2012, 145 pages)
- Performance of a geostationary mission, geoCARB, to measure CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and CO column-averaged concentrations (Atmospheric Measurement Techniques, 2014, 23 pages)
- Les missions gaz à effet de Serre – on se focalise sur le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub> dans les basses couches (C. DENIEL avec le concours de FM Bréon et C. CREVOISIER, septembre 2014, 34 pages)
- Les statuts du CNES (1 page)
- Evaluation du prix et du planning MICROCARB (CNES, 6 octobre 2015, 22 pages)
- PROCEDURE pour la prise en compte des risques (incertitudes et aléas) dans le dimensionnement des coûts & des délais du dossier d'engagement d'un projet (CNES, 27 janvier 2011, 46 pages)
- MICROCARB- Compte-rendu de réunion du comité inter-organismes (CIO) du 16 juillet 2015 (CNES, 22 juillet 2015, 47 pages)
- MEthane Remote sensing LIdar missioN Comité Inter-Organismes #03 CNES Paris (CNES, 27 juin 2014, 46 pages)
- Sentinel-5 Assessment of Requirements for CO<sub>2</sub> Monitoring (ESA, 1er février 2012, 14 pages)

- Proposition pour la mise en place d'une organisation Carbosphere - Sur l'acquisition des données spatiales et in-situ de concentration atmosphérique permettant la détermination des flux de gaz à effet de serre (Philippe Ciais et François-Marie Bréon, 8 octobre 2011, 38 pages)
- MICROCARB – Expertise CGI (CNES – Equipe projet, 29 octobre 2015, 62 pages)
- CO<sub>2</sub> (COPERNICUS, octobre 2015, 68 pages)
- Communiqué de presse - Visite d'Etat du Président de la République en République Populaire de Chine - Préparation du volet spatial de la COP21 -Signature d'une lettre d'intention sur l'espace et le climat (CNES, 2 novembre 2015, 1 page)
- *Press release - State visit of French President to the People's Republic of China - Preparations for space agenda of COP21 - Letter of intent signed on space and climate* (CNES, 2 novembre 2015, 1 page)
- Proposition de plan annuel d'Avant-Projets des phases A des Systèmes Orbitaux 2010 (CNES, 25 janvier 2010, 10 pages)
- Compléments de réponses (Michel Courtois, 3 novembre 2015, 1 page)
- Tableau comparatif – Mesures depuis l'espace de constituants atmosphériques (Cathy CLERBAUX, 5 novembre 2015, 1 page)
- *Current systematic carbon-cycle observations and the need for implementing a policy-relevant carbon observing system* (Biogeosciences, 2014, 56 pages)
- *Geo Carbon Strategy* (Group on Earth Observations, juin 2010, 49 pages)
- *CEOS strategy for carbon observations from space* (CEOS, avril 2014, 216 pages)
- Compléments de réponses (Frédéric CHEVALLIER, 11 novembre 2015, 1 page)
- Carbonsat and other carbon missions (Mission Science Division | ESA HQ, Paris | 15/06/2015)
- Microcarb vs Carbonsat (1 diapo)

## Synthèse

Le projet évalué est un projet de satellite dont l'objectif est la mesure des flux de CO<sub>2</sub> avec une grande précision 1 ppm et un très faible biais (0.1 ppm), entre puits et sources globaux, et d'améliorer les modèles d'évaluation des flux de CO<sub>2</sub> moyennés sur une période de 7 jours, par des mesures régulières sur les zones éclairées de l'orbite du satellite. Un modèle de transport du CO<sub>2</sub> permet à partir des mesures de concentration de CO<sub>2</sub> le calcul de ces flux et de leur évolution.

La calibration absolue des mesures est assurée à bord du satellite et par le survol de stations sol étalon. Ces données sont essentielles pour le suivi de l'évolution du contenu en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, ce gaz étant avec le méthane un des principaux gaz à effet de serre responsables, par sa composante anthropique, du réchauffement climatique en cours. Ce satellite constitue un des premiers maillons de la mise en place d'un dispositif opérationnel de suivi de l'évolution de la concentration de ce gaz qui sera mis en place dans un cadre international. Ce dispositif comprendra un réseau de stations sol, à l'état embryonnaire des satellites et des modèles de transport atmosphérique permettant la mesure de la concentration de ce gaz et le contrôle des déclarations des états.

Ce satellite est un complément de ceux déjà lancés par les US et le Japon suivi par la Chine en 2017. Il doit permettre de continuer les mesures après Gosat 1 et OCO-2. Importance de la continuité des mesures et démo par les premières exploitations de OCO/ Gosat que la mesure est faisable et l'objectif accessible.

La mesure du taux de CO<sub>2</sub> est effectuée par spectrométrie passive avec des matrices de détecteurs mesurant la profondeur des bandes d'absorption du CO<sub>2</sub>, de l'oxygène et du méthane dans les longueurs d'ondes infrarouge proche, 0,9 micron, et IR moyen 1,6 et 2,1 microns dans une zone élémentaire de 4X10 km<sup>2</sup> à la verticale du satellite.

Le projet est astucieux 60 kg/ 135 kg pour l'instrument US ce qui permet de l'embarquer sur un petit satellite (200 kg) de la filière Myriade du CNES.

Nous avons évalué à partir de la documentation fournie et d'un certain nombre d'auditions de personnes intervenant sur ce sujet afin de compléter notre analyse, la crédibilité de l'obtention des objectifs de la mission, de l'estimée de son coût et du planning proposé. Cette évaluation montre une bonne conception du projet, par une excellente itération entre le CNES, l'industrie et les scientifiques. Les équipes sont compétentes et de classe mondiale.

Ce projet constitue la seule réponse de l'Europe dans le délai de 2020 après la non sélection par l'ESA d'un projet plus ambitieux CarbonSat dont la date de lancement prévue était de 2023. Il n'y aura pas de projet européen en orbite avant 2025 au plus tôt.

La proposition industrielle pour le développement de l'instrument est en cours. L'instrument est un bon design. Les technologies utilisés sur l'instrument sont à un bon degré de maturité à ce stade du développement du projet (détecteurs, réseaux dispersifs, scrambleur de polarisation et dispositif de calibration). Le design est sain, avec une difficulté liée au fonctionnement à 160 deg. K du détecteur infrarouge moyen nécessitant un radiateur passif regardant l'espace pour maintenir cette température.

Le planning de l'instrument constitue le chemin critique du planning du projet. Le bus est un modèle de la plateforme Myriades qui vole depuis 1999 avec 19/19 de succès. Des améliorations de cette plateforme ne présentent pas de risques exceptionnels par rapport aux projets spatiaux existants. La bonne crédibilité de l'estimation des coûts est confortée par la bonne connaissance du

produit par le CNES. La proposition du futur MO instrument actuellement en compétition constitue un risque de ce point de vue. Le projet a inclus dans son estimé financière une marge pour un glissement de 18 mois du projet par rapport à la date objectif de lancement d'octobre 2020, ce qui devrait suffire sauf accident majeur (une marge de 5 mois existe dans le planning actuel, avec l'hypothèse d'un démarrage rapide du projet et de mise en place des équipes. L'analyse des risques est bien conduite.

Ces expériences en vol sont essentielles pour pouvoir évaluer l'évolution du comportement naturel (végétation, océans) et mettre au point et améliorer la précision des modèles de suivi des concentrations de CO<sub>2</sub>, qui seront utilisés dans les dispositifs opérationnels futurs. La séparation entre les flux naturels et anthropiques n'est pas possible avec ce dispositif.

Un futur dispositif de séparation de ces flux devra effectuer de l'imagerie du CO<sub>2</sub>, avoir une haute répétitivité et une excellente résolution spectrales et radiométriques (haute répétitivité implique une tâche au sol de 1X1 ou 2X2 km<sup>2</sup>, un champ de 220 km et plusieurs satellites simultanés).

Y aura-t-il des modèles supplémentaires de l'instrument Microcarb ? Cela dépendra de la définition du futur système opérationnel, et de la qualité des modèles de transferts après les expérimentations en vol, l'exemple de Jason en altimétrie des océans est illustratif de ce point de vue. La petite taille de l'instrument permet de le monter en passager sur d'autres satellites du programme Copernicus, ou d'utiliser des satellites récurrents de Microcarb.

Conséquences si ce projet se fait: mise en place d'une dynamique et montée en puissance des équipes scientifiques sur cette thématique importante dans le cadre de l'évolution du climat. Attraction des équipes européennes de recherche sur ce sujet (All, UK, NL); Amélioration de la connaissance de l'évolution des concentrations de CO<sub>2</sub>, et du suivi des comportements des puits et sources naturels, (l'acquisition de mesures du CH<sub>4</sub> est également possible par cet instrument) ; mise en place des capacités industrielles et du mode de travail itératif industrie/ scientifiques, permettant de préparer, en sachant de quoi on parle, la définition d'un futur système de contrôle international. La bonne connaissance de la performance de l'instrument est importante pour évaluer la qualité du système, ce qui est difficilement possible pour les systèmes conçus par d'autres pays.

Continuité des acquisitions de mesures avec les OCO et GOSAT assurée (durée de vie environ 5 ans de ces systèmes).

Il faut avoir en tête que le délai entre la définition et l'utilisation opérationnelle d'un système spatial est d'environ 20 ans (Météo depuis l'orbite géostationnaire, GPS).

Si le projet ne se fait pas, on peut pronostiquer un maintien de compétences scientifiques à minima en Europe, pas de franchissement du seuil de connaissances sur cette problématique du changement climatique. Des coopérations seront possibles avec l'accès aux données acquises par des partenaires, essentiellement Japon et Chine, OCO-3 étant placé sur la station Internationale dont l'orbite est assez inadaptée à ce type de mission ; l'industrie ne sera pas bien préparée pour la réalisation des instruments nécessaires à un futur système opérationnel de suivi du CO<sub>2</sub> ; l'Europe sera à la remorque des autres partenaires internationaux, US, Japon, Chine en 2017.

On en reparle dans 5 ans.

Microcarb constitue une réponse *a minima* de l'Europe sur la problématique climat dans un délai relativement court.