



Modélisation de la fluorescence chlorophyllienne avec DART

Omar REGAIEG¹, Jean-Philippe GASTELLU-ETCHEGORRY¹

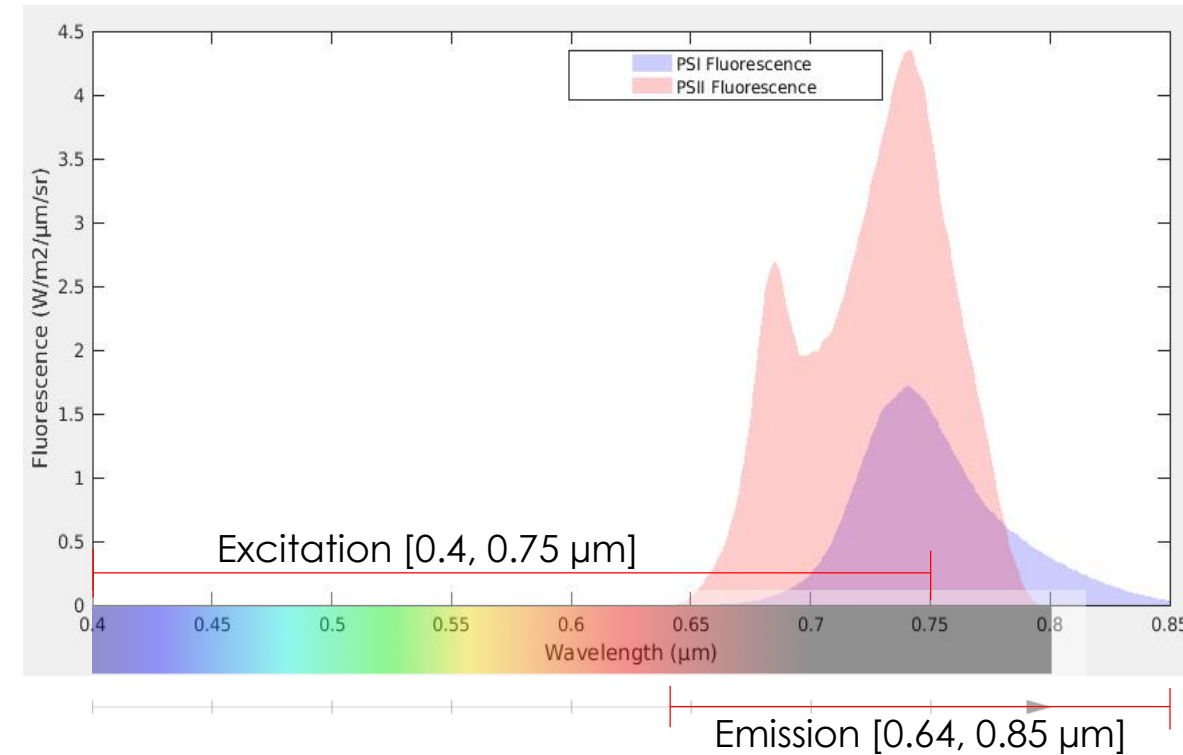
¹Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO), CNES, CNRS, IRD, UPS, 18 Av. E.Belin, 31401 Toulouse, France

15 Novembre 2019



Définition de la fluorescence

- Fluorescence induite par le soleil (SIF): Réémission spontanée de radiations ([640nm 850nm]), due à une excitation ([400nm 750nm]) de la végétation
- Signal faible (~1% de l'énergie incidente)
- Indicateur fiable et instantané de l'activité photosynthétique
- Utile pour la détection des stress de la végétation, étude du cycle de carbone, etc.
- En plus de l'état physiologique des plantes, la SIF et son observation dépendent des directions solaire/d'observation, de l'architecture 3D de la végétation, de la topographie, etc.



Besoin de modèle 3D de SIF, pour comprendre la génération et émission TOC de SIF, et par suite mieux comprendre et exploiter les mesures spectrales in situ, avion et bientôt satellites (FLEX).

Modélisation 1D: SCOPE et mSCOPE

SCOPE (van der Tol et al. 2009) : modèle référence pour la SIF. Ce modèle d'énergie 1D (émission thermique, photosynthèse, ...) simule la SIF foliaire avec le modèle FLUSPECT. (Vilfan et al., 2016)

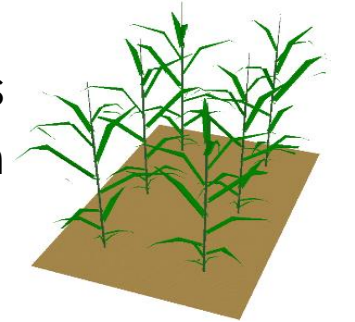
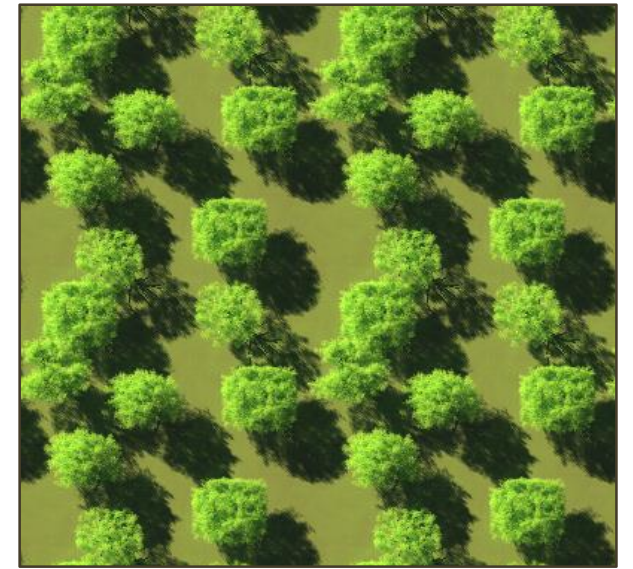
- **Avantage:** le modèle de **bilan d'énergie** calcule la bioclimatologie locale ($T_{\text{feuille}}, \dots$) qui conditionne la SIF foliaire, et par suite les facteurs ϵ_{tau} (sunlit leaves) et ϵ_{tah} (shaded leaves) qui pondèrent la SIF foliaire simulée avec le modèle FLUSPECT.
- **Inconvénients:** - Végétation = **Couche horizontale homogène**
 - ⇒ Pas d'architecture 3D des couverts : distribution spatiale des arbres, architecture des couronnes d'arbre, hétérogénéité ...
 - Couche de végétation simulée par du **milieu turbide**.
- mSCOPE (Yang et al. 2017): Introduction de l'hétérogénéité verticale des couverts dans SCOPE

Modélisation 3D: DART

DART : Modèle de transfert radiatif 3D

⇒ Images de télédétection et bilan radiatif des couverts

- **Avantage** : Modèle 3D
- **Inconvénient** : Pas de bilan d'énergie (uniquement le radiatif)
- 2016 – 2018 : Nouvelle modélisation DART "facette" qui simule la SIF de couverts simulés avec des facettes. La SIF foliaire est simulée avec FLUSPECT et importation des facteurs foliaires etau et etah. (feuilles d'ombre et de lumière)



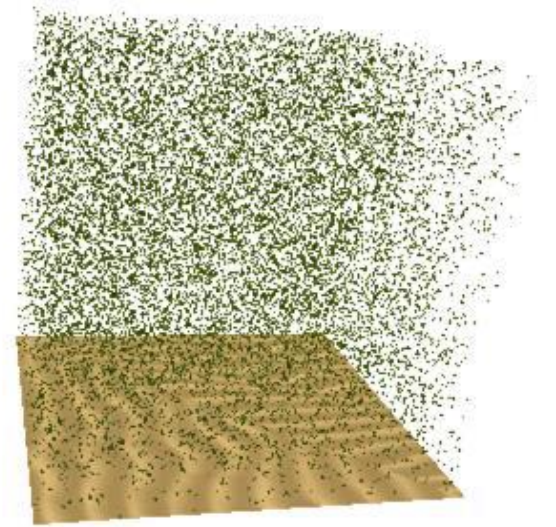
Mon travail : - Validation de la simulation SIF DART "facette"

- Implémentation de la modélisation DART "turbide" qui simule la SIF de la végétation simulée par une architecture 3D de cellules turbides 3D.

Validation de la modélisation DART "facette"

Comparaison avec SCOPE/mSCOPE

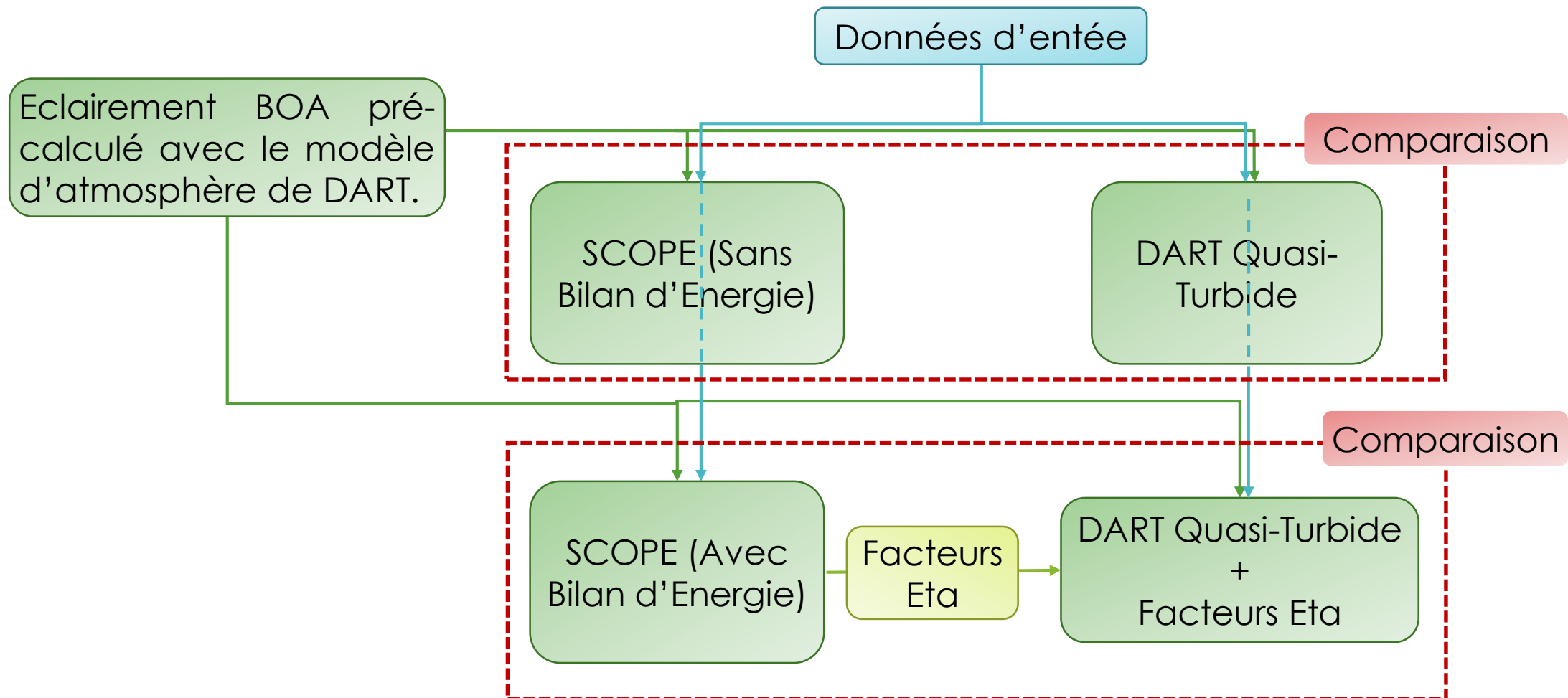
- DART "facette" traite le couvert comme un milieu quasi-turbide utilisé comme approximation du milieu turbide traité par SCOPE
- Compromis "Temps de calcul vs. Précision de simulation", sur la taille des facettes. Idéalement, une facette devrait être infiniment petite.
- Contrainte : mêmes configurations pour DART et SCOPE (même proportion de feuilles à l'ombre, feuilles au soleil, etc.).



Milieu quasi turbide

Validation de la modélisation DART "facette"

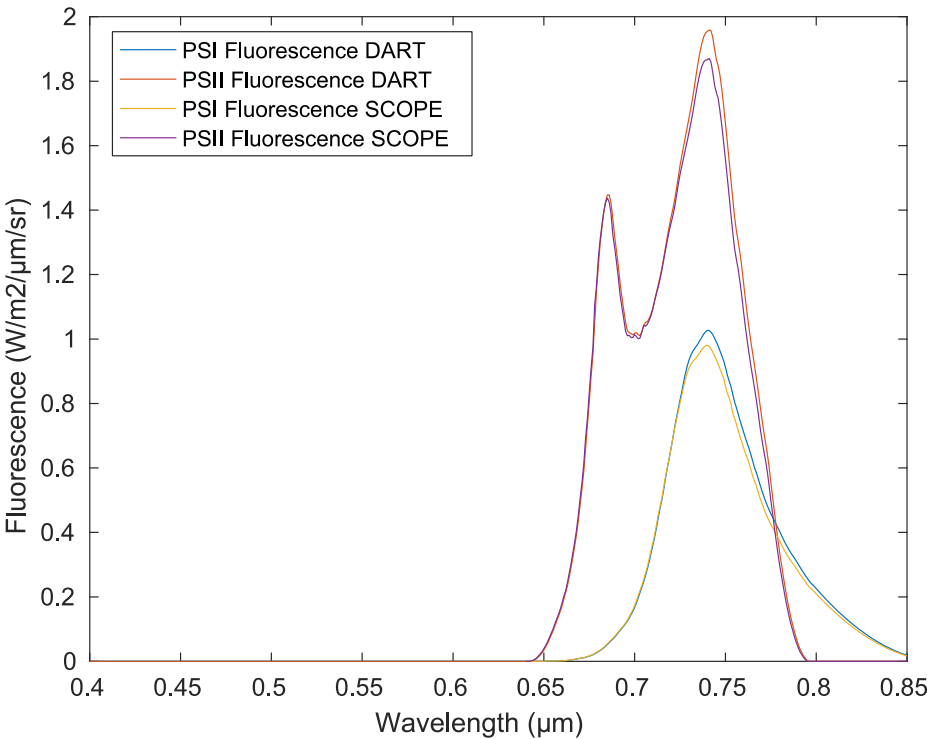
Comparaison DART "facette" avec SCOPE/mSCOPE



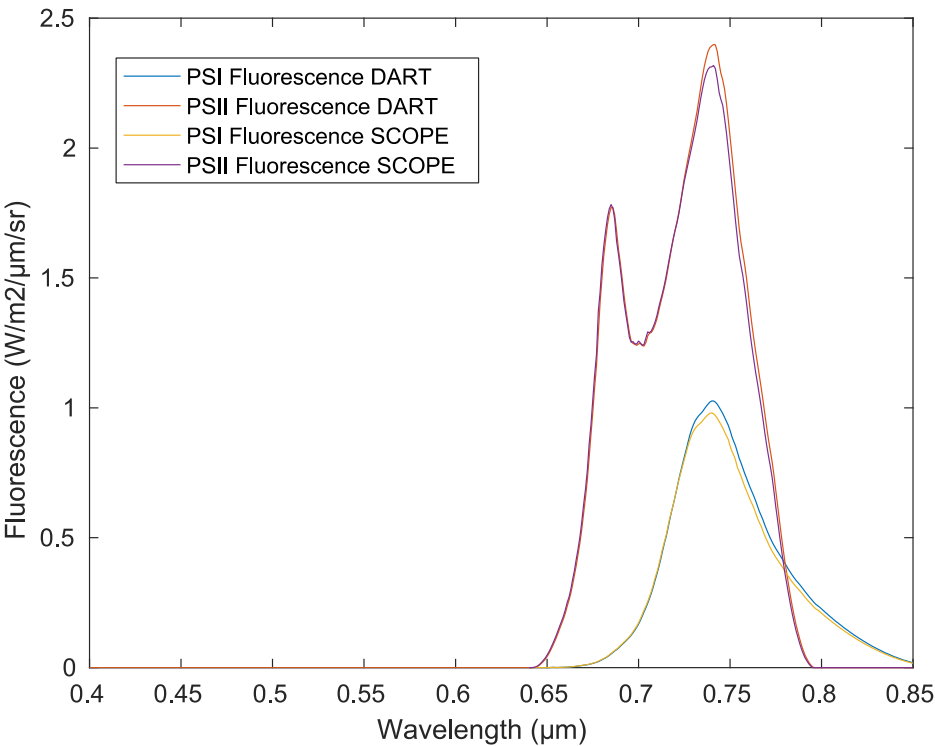
Validation de la modélisation DART "facette"

Comparaison DART "facette" avec SCOPE

Cab	60 µg/cm2
Cca	15 µg/cm ²
Cw	0,009 cm
Cdm	0,002 g/cm ²
Cs	0
Cant	0 g/cm ²
N	1,5
LAI	1
PSI quantum yield	0.006
PSII quantum yield	0.03



Sans Bilan d'Energie

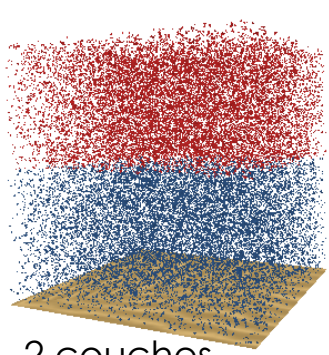


Avec Bilan d'Energie
(Eta de SCOPE → DART)

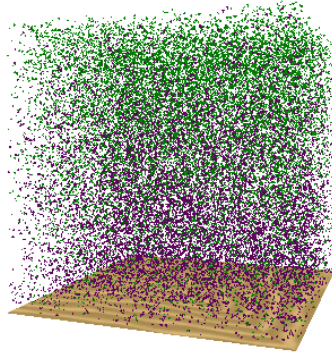
Réflectance du sol: 0
Direction solaire: $\theta_s=30^\circ$, $\varphi_s=225^\circ$
Direction d'observation: Nadir

Validation de la modélisation DART "facette"

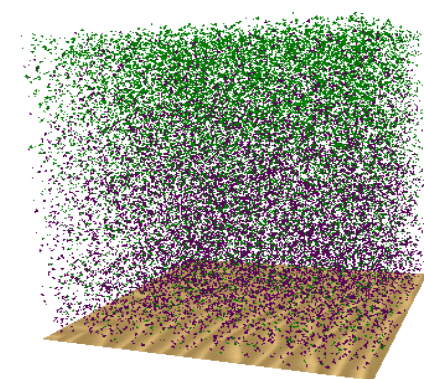
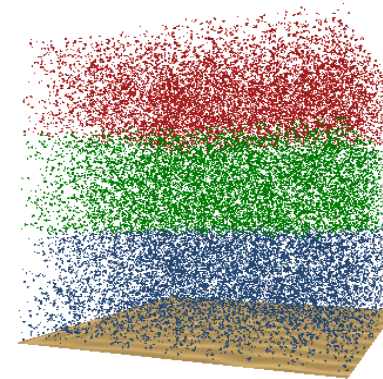
Comparaison DART "facette" avec mSCOPE



2 couches



Feuilles d'ombre et de lumière



$R_{sol} = 0$

Paramètre	Couche du haut	Couche du bas
Cab	40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	60 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
Cca	10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	15 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
Cw	0.006 cm	0.009 cm
Cdm	0.0014 g/cm^2	0.0021 g/cm^2
Cs	0	0
Cant	0 g/cm^2	0 g/cm^2
N	1	1.5
LAI	1	1
PSI quantum yield	0.006	
PSII quantum yield	0.03	

$R_{sol} = 0.5$

Paramètre	Couche du haut	Couche du milieu	Couche du bas
Cab	40 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	60 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	80 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
Cca	10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	15 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$	20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
Cw	0.006 cm	0.01 cm	0.012 cm
Cdm	0.0014 g/cm^2	0.002 g/cm^2	0.0028 g/cm^2
Cs	0	0	0
Cant	0 g/cm^2	0 g/cm^2	0 g/cm^2
N	1	1.5	2
LAI	0,6667	0,6667	0.6667
PSI quantum yield	0.006		
PSII quantum yield	0.03		

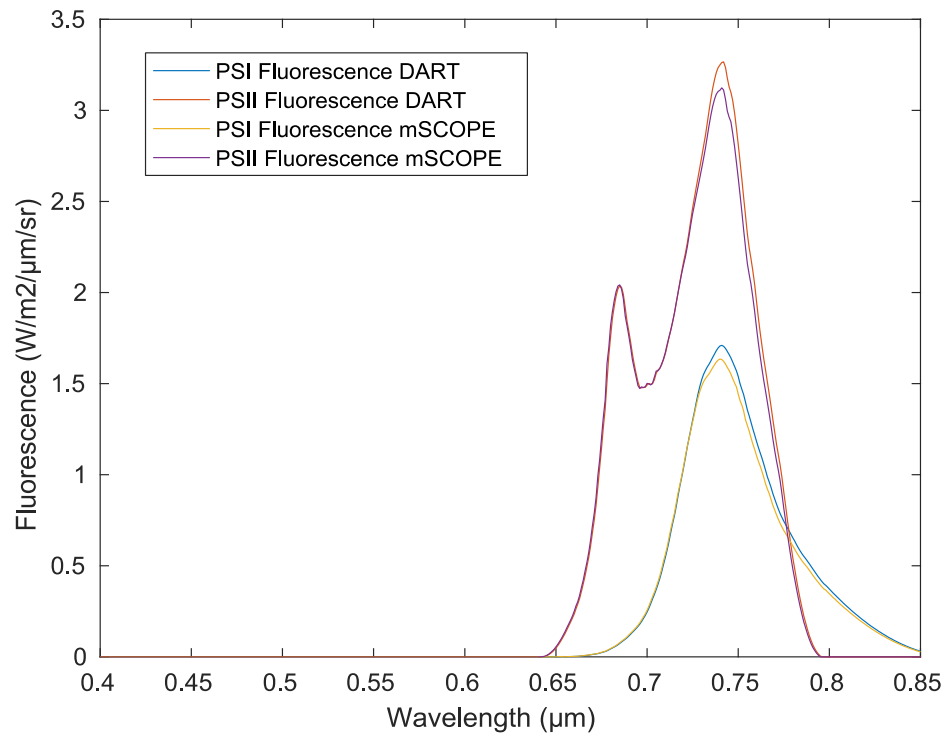
Direction solaire: $\theta_s = 37,94^\circ$, $\varphi_s = 311,89^\circ$. Direction d'observation: Nadir.

Validation de la modélisation DART "facette"

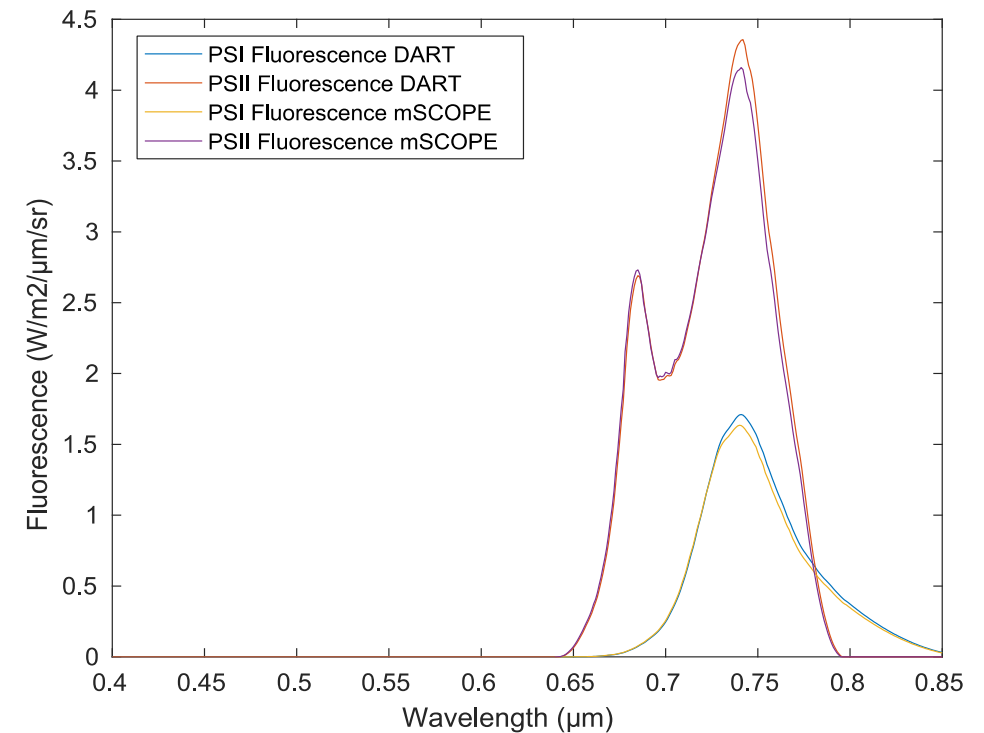
Comparaison DART "facette" avec mSCOPE

2 couches

Sans Bilan d'Energie



Avec Bilan d'Energie



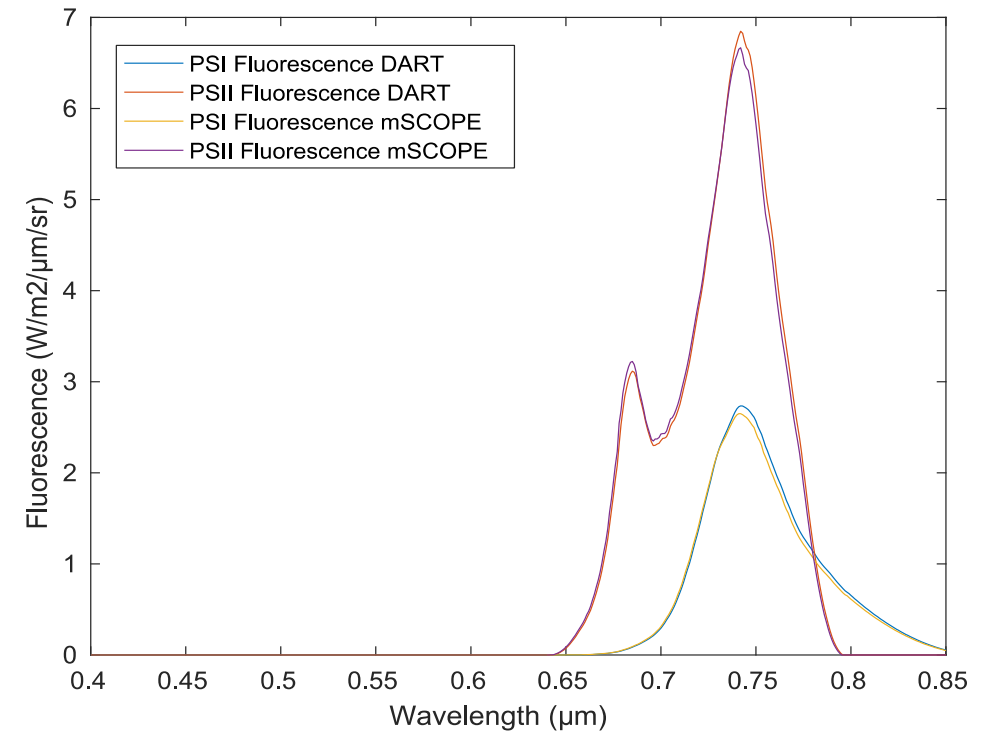
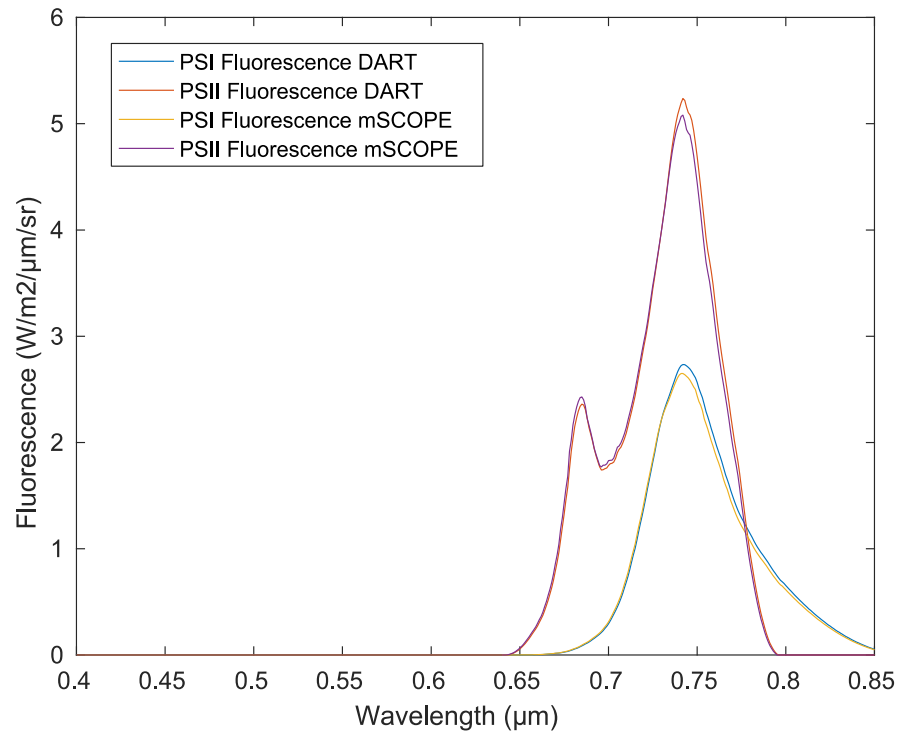
Validation de la modélisation DART "facette"

Comparaison DART "facette" avec mSCOPE

Sans Bilan d'Energie

Avec Bilan d'Energie

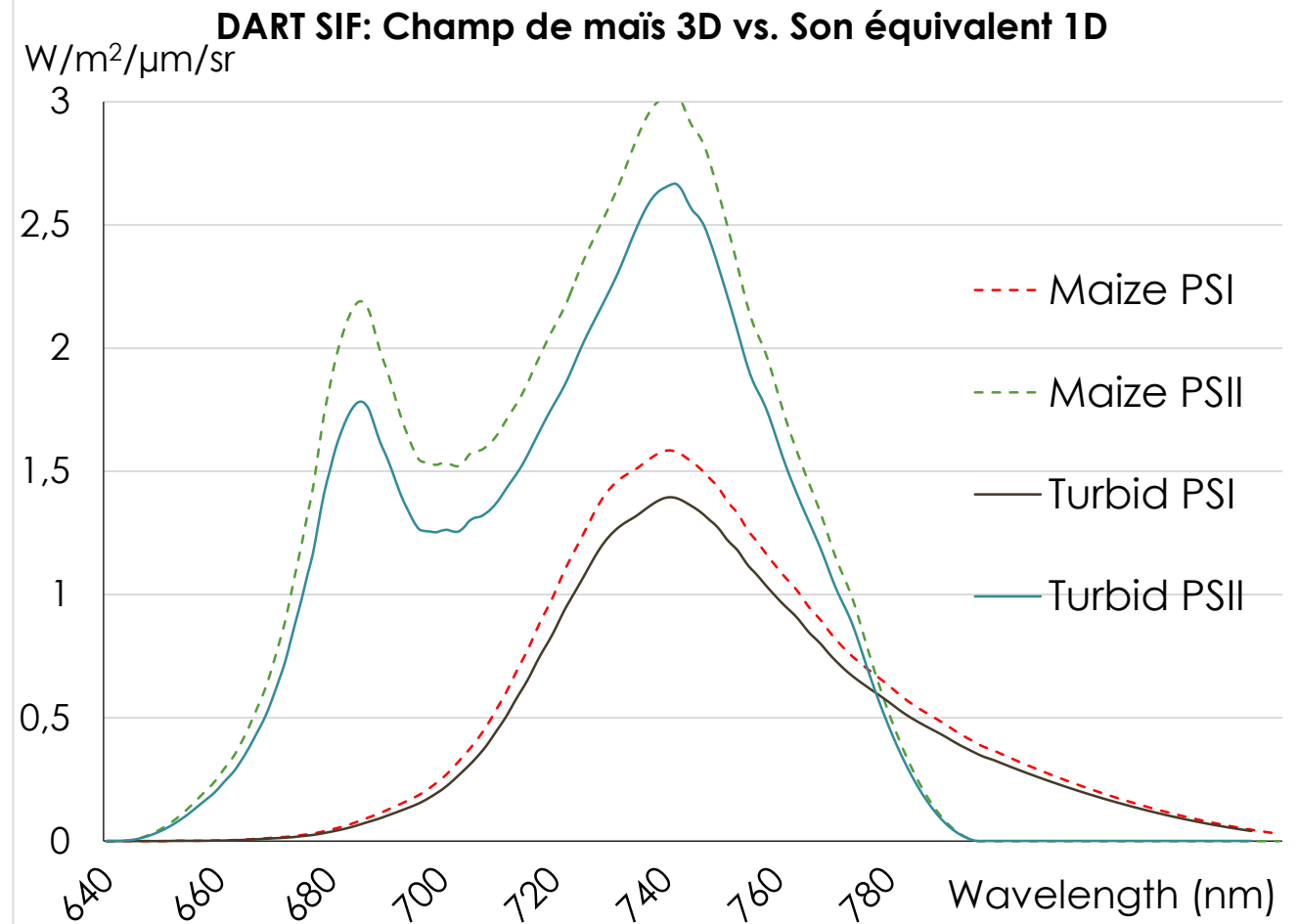
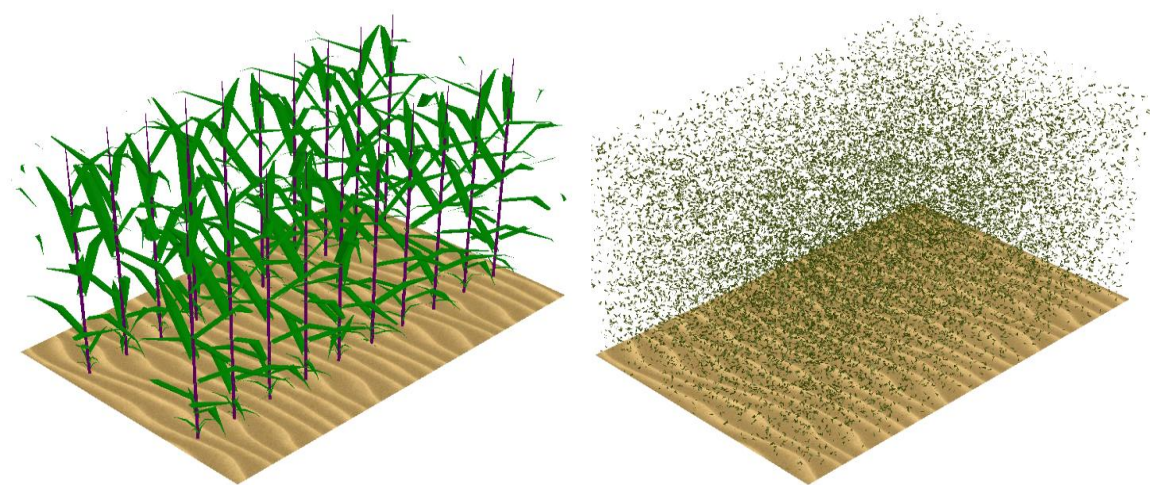
3 couches



⇒ Modèle DART "facette" validé par rapport à SCOPE pour milieu turbide homogène

Utilité de la modélisation “facette”

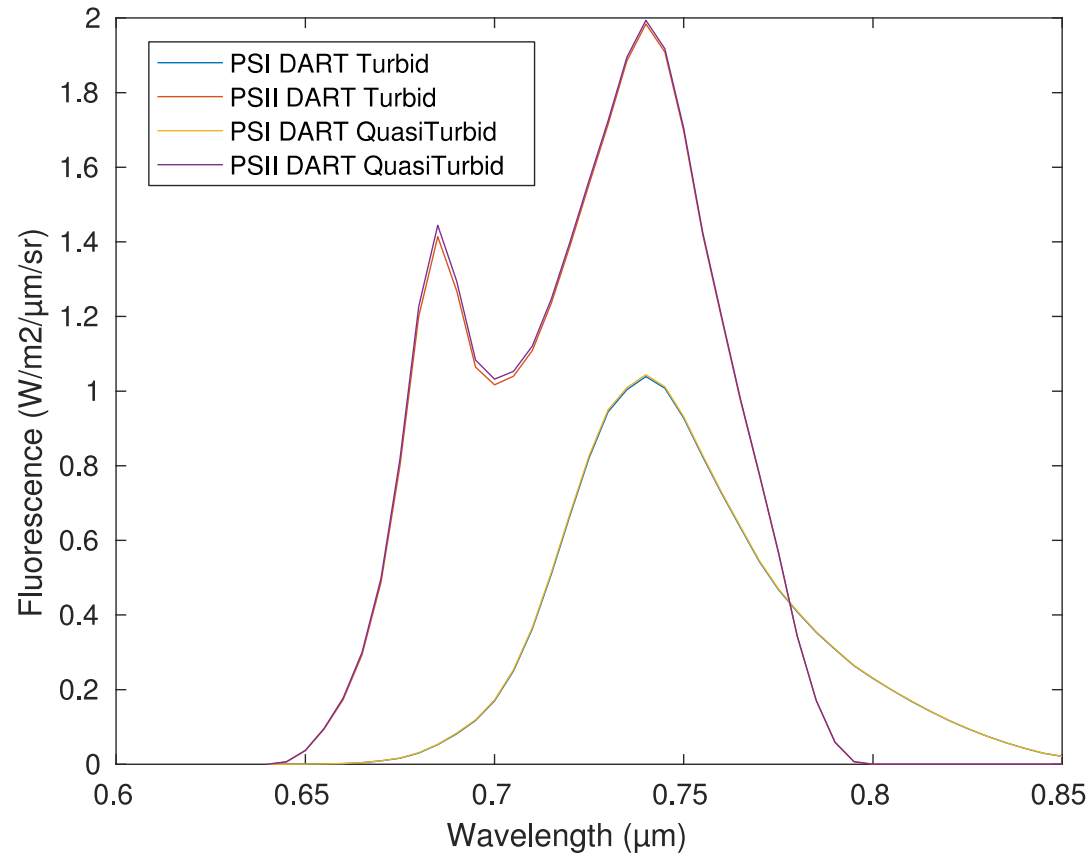
DART SIF: Champ de maïs 3D vs. Son équivalent 1D



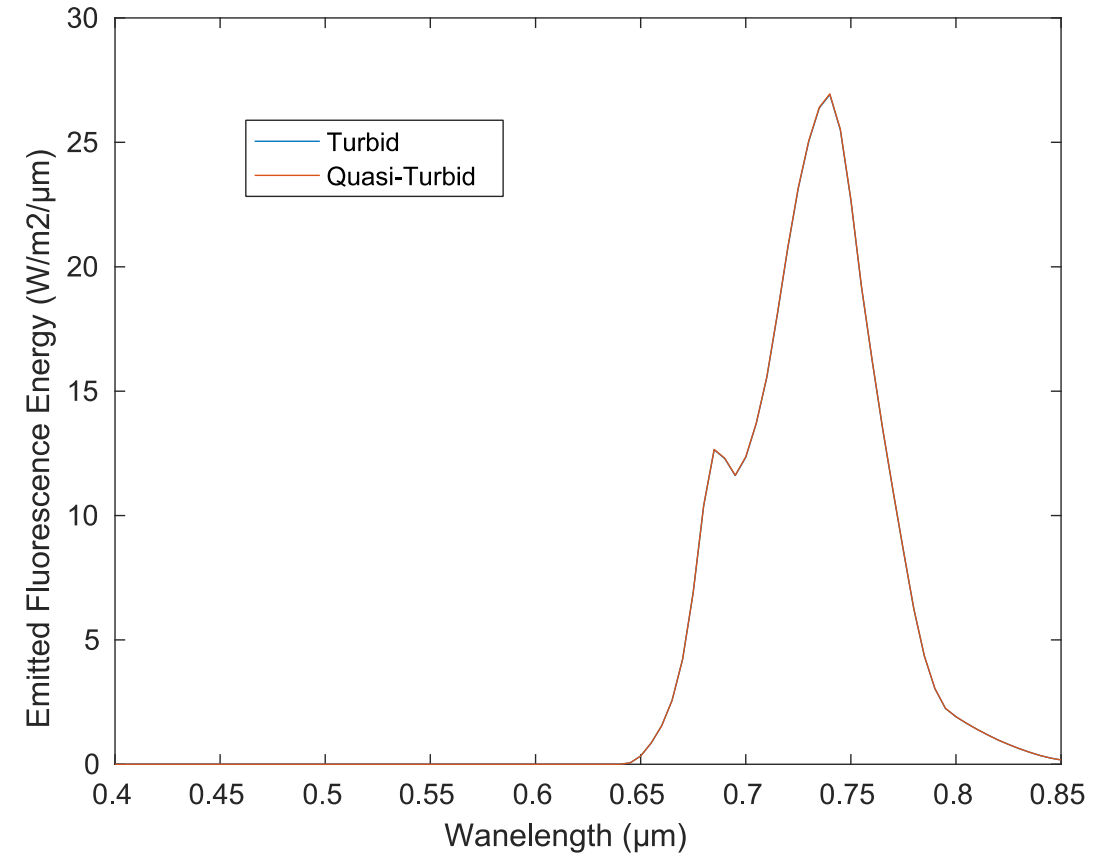
Validation de la modélisation DART "turbide"

Comparaison Nouveau DART "turbide" - DART "facette"

Equivalence de DART "turbide" et DART "facette" pour SIF de milieu turbide homogène



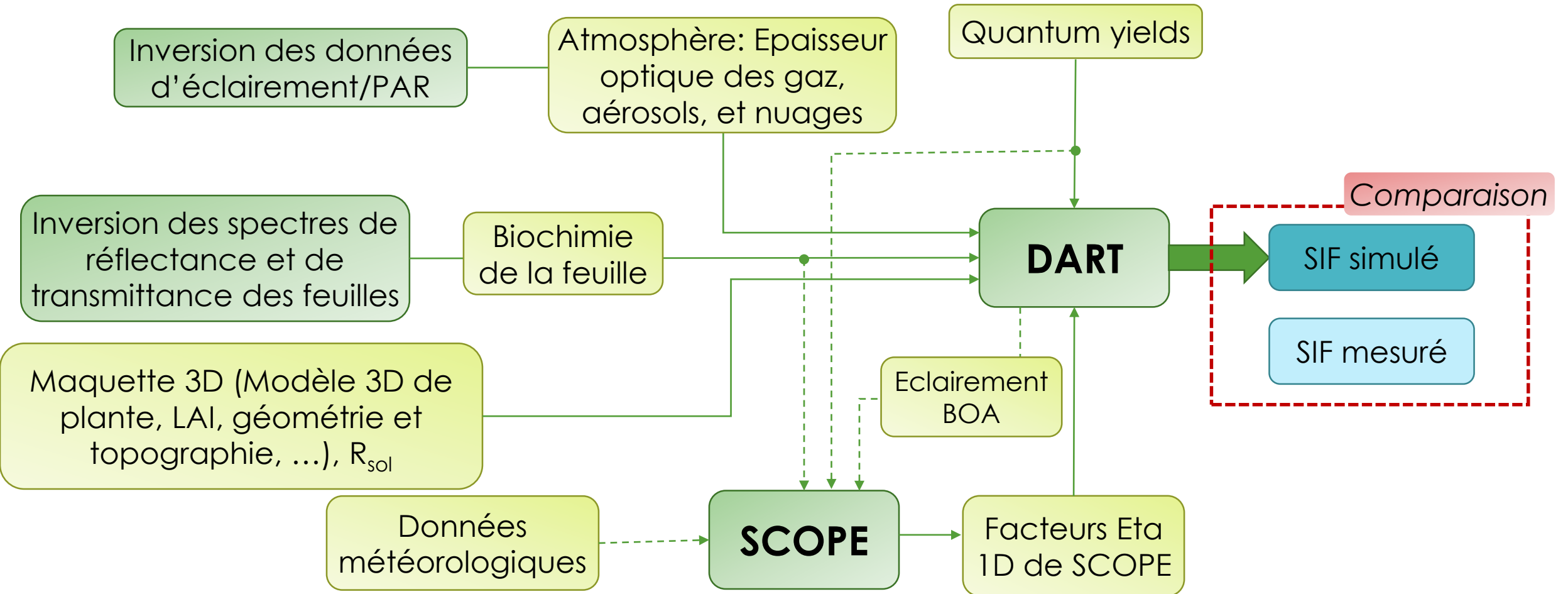
Luminance SIF



DART bilan radiatif 3D $\Rightarrow$ SIF totale
émise dans le couvert (W/m²/μm)

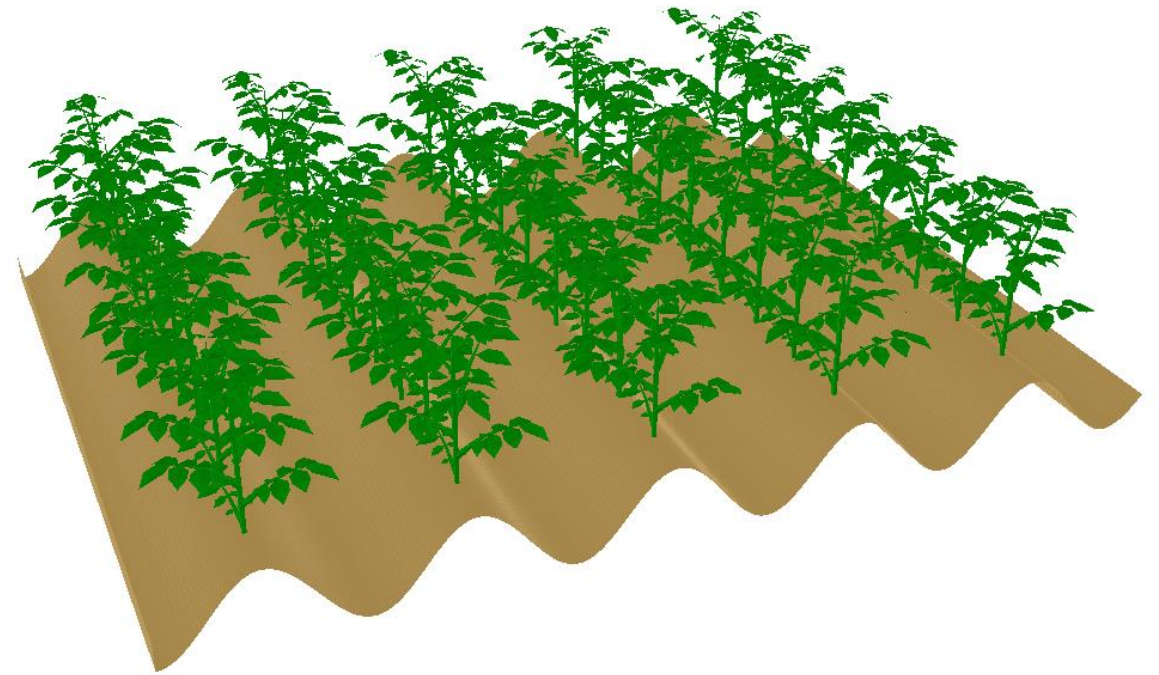
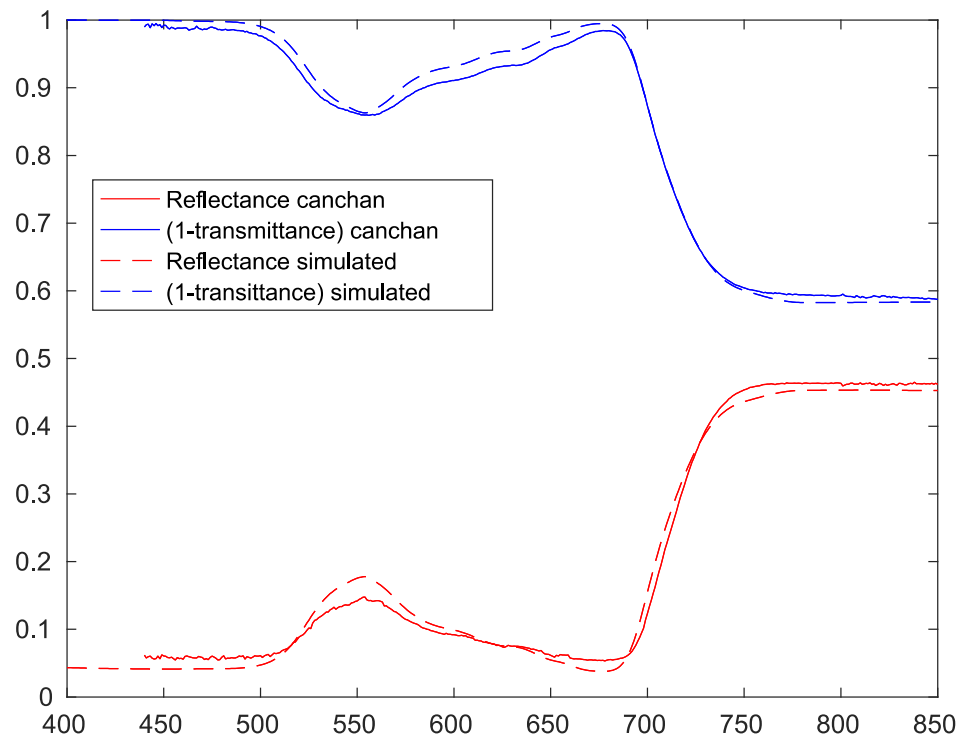
Validation de la modélisation DART

Comparaison de DART avec des mesures terrain



Validation de la modélisation DART

Comparaison de simulations DART avec des mesures de SIF d'un champ de pommes de terre (Pérou) réalisées par le Laboratoire de Météorologie Dynamique (France) (Travail en cours)



Exemple d'inversion de propriétés optiques des feuilles

1^{ère} modélisation du champ de pommes de terre

Conclusions

- Le SIF est un bon indicateur de l'activité photosynthétique instantanée de la végétation
- Lancement de la mission FLEX en 2022
- Modèle 1D imprécis $\Rightarrow$ Besoin de modèles 3D de SIF
- DART: Simulations 3D de SIF avec deux approches: Facettes et Turbide
- Couplage avec le modèle de bilan d'énergie 1D de SCOPE.

Perspectives

- Validation par comparaison à des mesures terrain (Pérou, Chine, ???) (Travail en cours)
- Nouvelle stratégie de modélisation (Monte Carlo) (Travail en cours)
 - ⇒ Simulation d'images SIF de grands paysages
- Conception et implémentation d'un modèle d'énergie 3D qui simule les mécanismes (photosynthèse, ...) et paramètres environnementaux (Température 3D, ...) qui affectent la SIF

Merci de votre attention

Regulation mechanism	Maximum photosynthesis functioning	Blocked photosynthesis
Photosynthesis	84 %	0 %
Thermic dissipation	14 %	88 %
Fluorescence	2 %	12 %

Source: Antoine Fournier. Influence de la structure des couverts végétaux en télédétection de la fluorescence chlorophyllienne, 2011.

Band	PRI band	Chlorophyll absorption	O ₂ -B band		Red-edge		O ₂ -A band			
λ (nm)	500–600	600–677	677–686	686–697	697–740	740–755	755–759	759–762	762–769	769–780
Spectral Resolution (nm)	3	3	0.6	0.3	2	0.7	0.7	0.3	0.3	0.7
Spectral Sampling (nm)	2	2	0.5	0.1	0.65	0.5	0.5	0.1	0.1	0.5
SNR	245	245	340	175	425	Linear 510–1015	1015	115	Linear 115–455	1015

Table 4.2. Spectral resolution, SSI and SNR requirements for each spectral range at the threshold level for the reference radiance

Source: Report for mission selection: FLEX (ESA SP-1330/2, June 2015)