

Correction atmosphérique au dessus des océans : rôle des modèles de transfert radiatif

Malik Chami, Laboratoire d'Océanographie de Villefranche

Cédric Jamet, Laboratoire d'Océanologie et Géosciences

emails : chami@obs-vlfr.fr, cedric.jamet@univ-littoral.fr

Atelier TRATTORIA II, Lille, Mars 2015



Plan de l'exposé

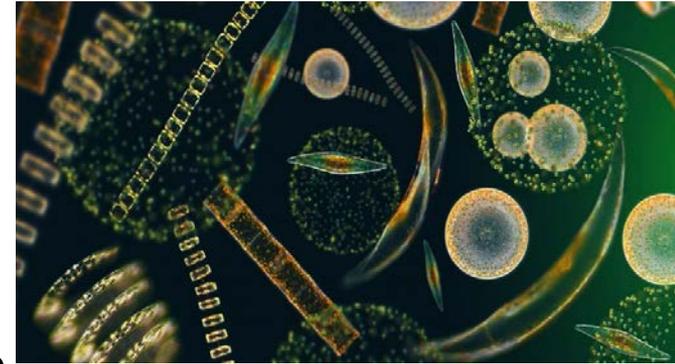
1. Contexte scientifique de l'étude de la couleur de l'océan
2. Modélisation du rayonnement dans le système couplé océan-atmosphère
3. Principe de base d'un algorithme de correction atmosphérique au dessus des océans
4. Quelques exemples d'algorithmes actuels
5. Avancées réalisées depuis Trattoria I (2008), limitations actuelles et besoins futurs

1. Contexte scientifique de l'étude de la couleur de l'océan

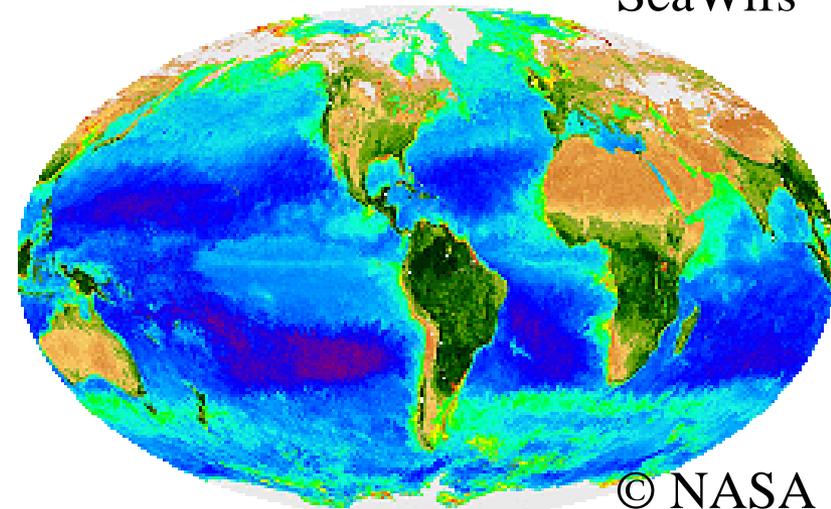
Phytoplancton : micro-algue unicellulaire

Rôle du phytoplancton dans l'océan

- ✓ 1^{er} maillon de la chaîne alimentaire marine
- ✓ Conversion du CO₂ en carbone organique
- ❑ absorption du rayonnement → production primaire
- ❑ impact sur le cycle du carbone global et sur le climat



Importance de déterminer la concentration en phytoplancton à l'échelle globale → couleur de l'océan



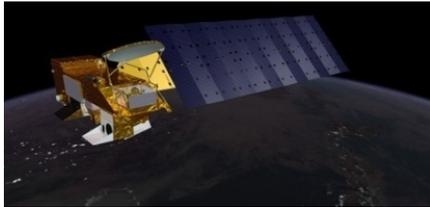
Capteurs satellitaires “couleur de l’océan” passés



CZCS sur Nimbus-7



SeaWiFS sur OrbView-2



MODIS sur Terra

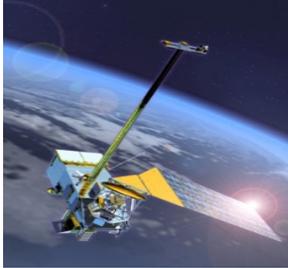


MERIS sur ENVISAT

actuels



MODIS sensor on Aqua satellite



VIIRS on NPP-Suomi



...et futurs

OLI sur LANDSAT-8

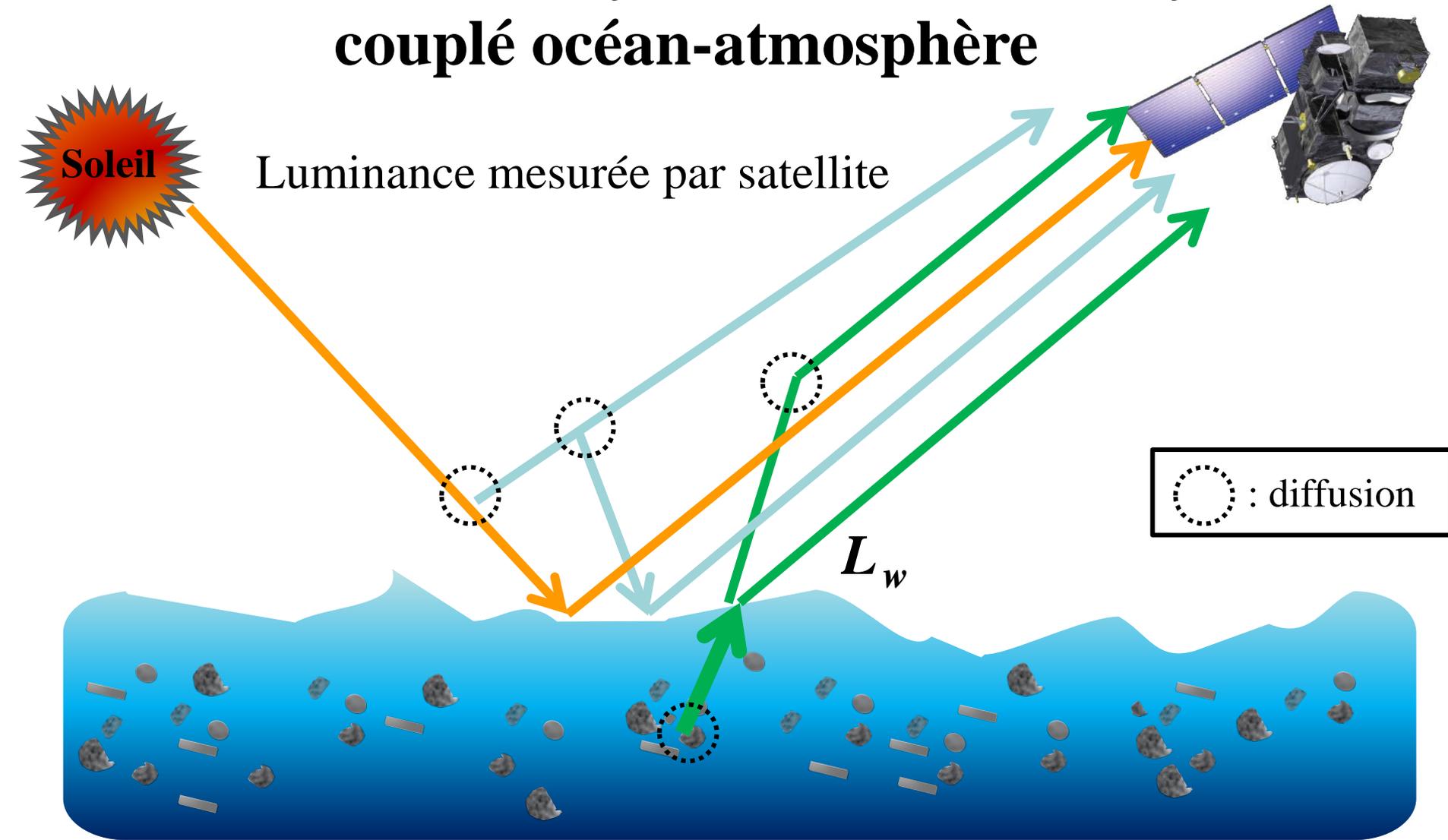


MSI sur Sentinel-2



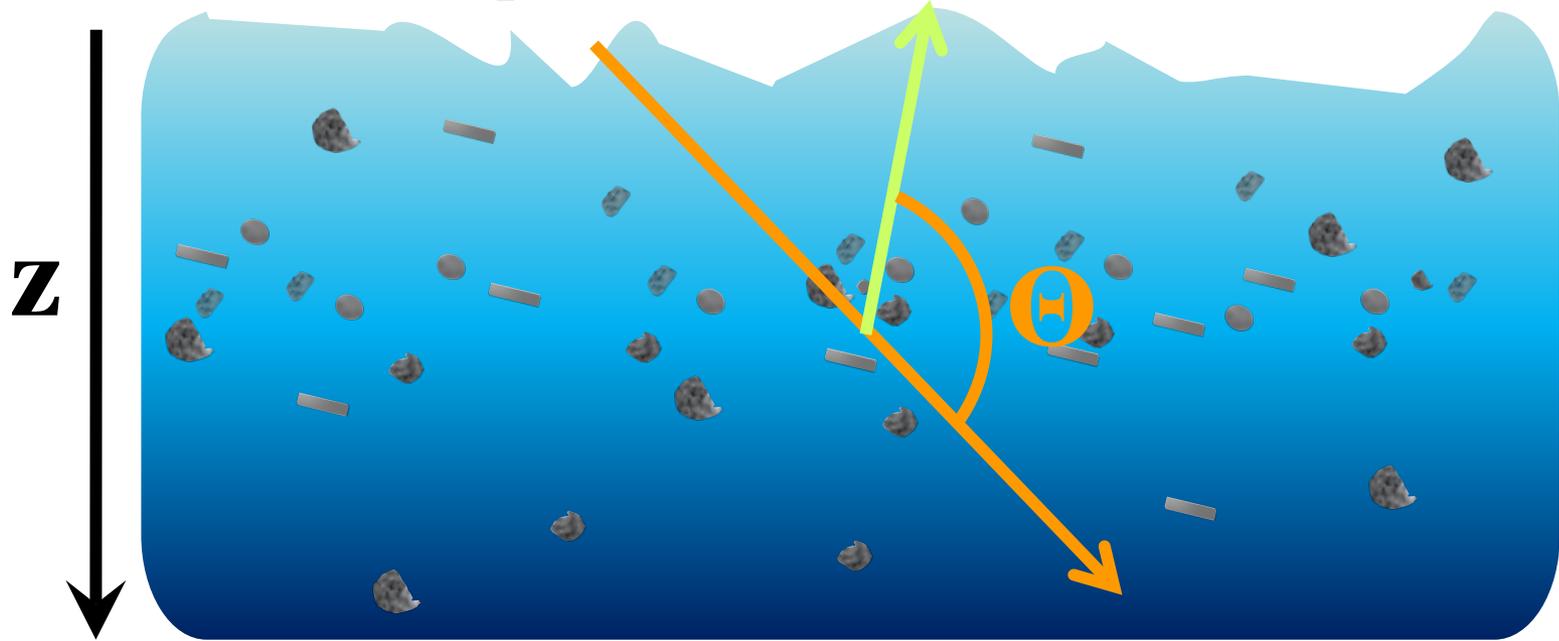
OLCI sur Sentinel-3

2. Modélisation du rayonnement dans le système couplé océan-atmosphère



→ Contribution du signal de l'océan (L_w), du ciel, de la réflexion du soleil et du ciel sur la surface marine

Equation du transfert radiatif



Formalisme vectoriel (avec polarisation) : \mathbf{I} = vecteur de Stokes, \mathbf{M} = matrice de phase

$$\nabla \mathbf{I}(r, \Theta) = -c(r, \Theta) \mathbf{I}(r, \Theta) - 2\pi \int_{\Theta'=0}^{\pi} \mathbf{M}(r, \Theta' \rightarrow \Theta) \mathbf{I}(r, \Theta') \sin \Theta' d\Theta'$$

Formalisme scalaire (sans polarisation) : I = Luminance

$$\nabla I(z, \Theta) = -c(z, \Theta) I(z, \Theta) - 2\pi \int_{\Theta'=0}^{\pi} VSF(z, \Theta' \rightarrow \Theta) I(z, \Theta') \sin \Theta' d\Theta'$$

c = coefficient d'atténuation, VSF = fonction de phase des particules

Modèles de transfert radiatifs du système océan-atmosphère

quelques exemples...

A. Modèles incluant **une couche atmosphère + une surface marine**

- ✓ Utilisés historiquement pour modéliser l'atmosphère au dessus des océans .
- ✓ Performants en temps de calcul
- ✓ Pas de couche océan → non prise en compte des propriétés optiques des hydrosols

Quelques exemples de modèles appliqués en couleur de l'océan

- *Monte-Carlo* : Ding and Gordon (1994), Jolivet et al. (2013)
- *Ordre successifs de diffusion* : Deuze et al. (1989-SOS), Wang (1991), Kotchenova et al. (2006) (6SV)
- *Ordonnées discrètes* : Stamnes et al. (1988-DISORT), Jin and Stamnes (1994) (CRTM)
- *Adding doubling* : Fell and Fischer (2001-MOMO), Mishchenko et al. (2006), Duforet (2009)

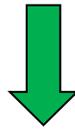
B. Modèles incluant une couche atmosphère + une couche océanique

- ✓ Modèles plus complets et précis au niveau de la modélisation de la couche océan
- ✓ Dégradation possible de la performance en temps de calcul

Quelques exemples de modèles bi-couches « atmosphère + océan »

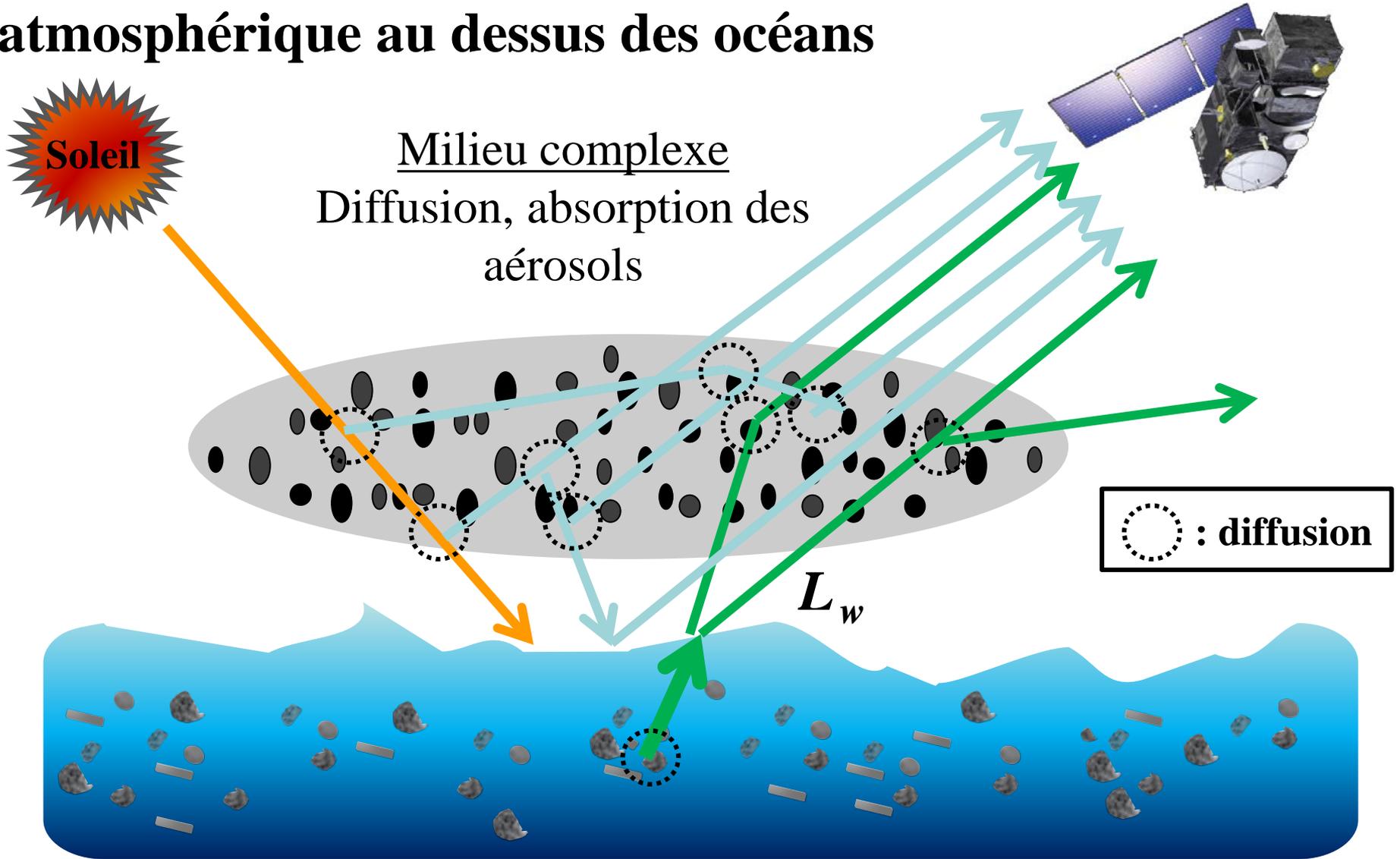
- ✓ Modèle scalaire (i.e., sans polarisation)
 - Hydrolight (Mobley, 1989) : commercial (~10 Keuros)
- ✓ Modèles vectoriels (i.e., avec polarisation)
 - méthode des ordonnées discrètes: Jin et al. (2006-COART), Sommersen et al. (2010).
 - méthode de Monte Carlo : Kattawar et al. (1989), You et al. (2009)

- méthode des ordres successifs de diffusion : Chami et al. (2001-OSOA), Zhai et al. (2010)
- méthode « T-matrix » (adding doubling) : Chowdhary et al. (2006), He et al. (2010-PCOART), Ota et al. (2010), Hollstein and Fischer (2012-MOMO)
- méthode des éléments finis : Bulgarelli et al. (1999)



- ✓ Hormis COART, les codes vectoriels « atmosphère + océan » ne sont pas en accès libre à la communauté
- ✓ Site COART : <http://cloudsgate2.larc.nasa.gov/jin/coart.html>
- ✓ Mise à disposition de la communauté prochainement de la version avancée de OSOA (OSOAA, voir poster Lafrance et al. – Trattoria II)

3. Principe de base d'un algorithme de correction atmosphérique au dessus des océans



- ✓ Diffusion des molécules + aérosols + réflexion de surface ~ 80-90% du signal satellitaire

- ✓ Nécessité de corriger le rayonnement satellitaire des effets de l'atmosphère et de la réflexion de surface : **correction atmosphérique**

Principe de base au dessus des océans ouverts

- ✓ Estimation des propriétés optiques des aérosols dans le proche infra-rouge (i.e., rayonnement océanique ~ 0 – méthode dite du “black pixel”)
- ✓ Extrapolation de la réflectance aérosol vers les bandes visibles
- ✓ Estimation de la luminance sortante de l'eau en soustrayant le signal atmosphérique

Au dessus des eaux turbides

- ✓ Méthode du “black pixel” non valide (réflectance $\neq 0$) → d'autres méthodes sont développées (voir ci-après)

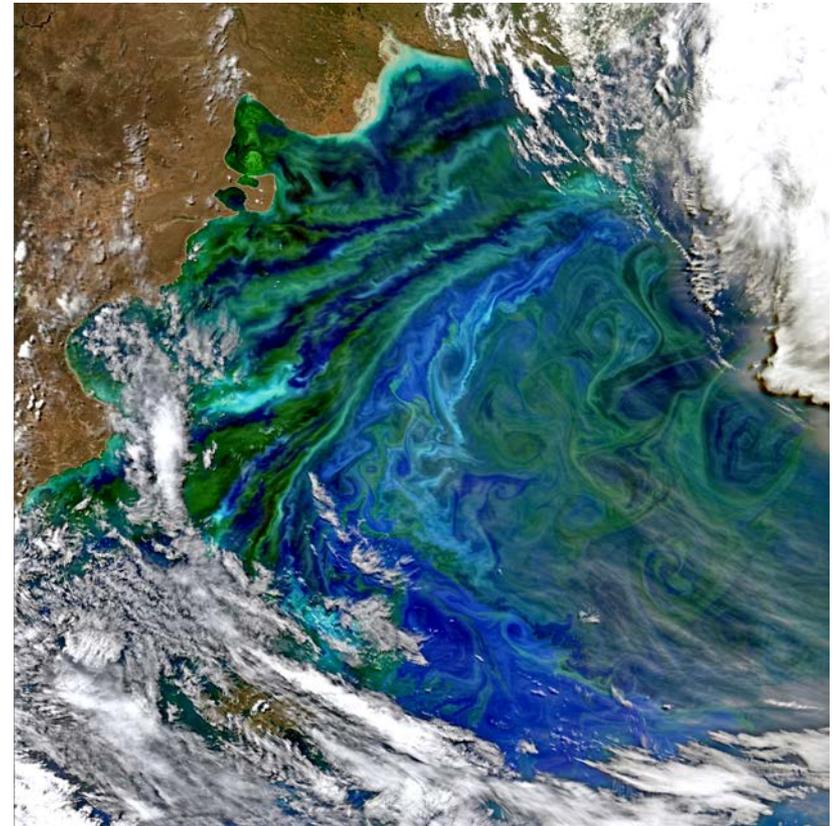
Illustrations des bénéfices de la correction atmosphérique pour observer l'océan

- ✓ Observation de structures détaillées des matières minérales et phytoplanctoniques

MERIS - Bangladesh (2003)



VIIRS – Patagonie (2014)



Rôle des codes de transfert radiatif pour les corrections atmosphériques

- ✓ Simulation du signal “aérosol” et des réflectances marines
 - besoin de modèles d’aérosol
 - besoin des propriétés optiques (absorption, rétrodiffusion) des hydrosols
- Utilisation de codes de transfert radiatif couplé océan-atmosphère pour générer les propriétés optiques aérosols/hydrosols (Look Up Tables-LUT)
- ✓ Modèles d’aérosols utilisés fréquemment en couleur de l’océan
 - Modèles de Shettle and Fenn (1979) : 12 modèles
 - Modèles basés sur AERONET (Ahmad et al., 2010): 80 modèles prenant en compte une grande variété d’humidité relative
- ✓ Modèles d’hydrosols issus de la littérature (propriétés bio-optiques)

Quelques exemples d'algorithmes actuels

✓ Méthode du “black pixel” : Gordon and Wang (1994) → SeaWiFS

✓ Méthodes alternatives à celles du “black pixel”

→ Assigner une pente spectrale des aérosols et une contribution de la réflectance marine dans le proche infra-rouge (NIR) (e.g. Hu et al. 2000, Ruddick et al. 2000)

→ Utilisation des bandes “Shortwave” infrarouge (SWIR) (e.g. Wang & Shi 2007)

→ Utilisation de bandes Ultra Violet (UV) (e.g., He et al., 2012)

→ Corriger / modéliser la réflectance dans NIR

Moore et al. (1999) MERIS/OLCI (ESA)

Lavender et al. (2005) MERIS (ESA)

Bailey et al. (2010) Reprocessing SeaWiFS (NASA)

Wang et al. (2012) GOCI (KOSC)

→ Utilisation d'une méthode d'optimisation/inversion du système couplé océan-atmosphère :

< 2008 : Chomko & Gordon (2001) ; Stamnes et al. (2003) ; Jamet et al. (2005) ; Ahn and Shanmugam (2007) ; Schroeder et al. (2007) ; Doerffer & Schiller (2007)

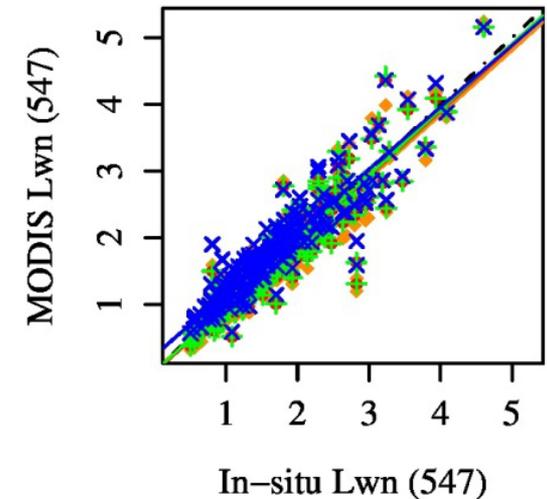
> 2008 : Kuchinke et al. (2009) ; Steinmetz et al. (2011) ; Harmel and Chami (2011) ; Brajard et al. (2012)

Evaluation des algorithmes a été conduite par différents auteurs

✓ *SeaWiFS*: Zibordi et al. (2006, 2009); Banzon et al. (2009); Jamet et al. (2011)

✓ *MODIS-AQUA*: Zibordi et al. (2006, 2009); Wang et al. (2009); Werdell et al. (2010); Goyens et al. (2013)

✓ *MERIS*: Zibordi et al. (2006, 2009); Cui et al. (2010); Kratzer and Vinterhav (2010); Melin et al. (2011)



Goyens et al. (2013)

5. Avancées réalisées depuis Trattoria I (2008)

Limitations actuelles et besoins futurs

Avancées réalisées

- ✓ Développement de 6 modèles de transfert radiatif couplés bi-couches « atmosphère + océan » depuis 2008
- accroissement des performances des algorithmes (e.g., grande variété de modèles d'aérosols/hydrosols, meilleure représentativité des LUTs, prise en compte de rugosité de surface et de la polarisation du rayonnement,...)
- ✓ Développement de méthodes d'optimisation/inversion plus robustes pour les algorithmes de correction atmosphérique
- ✓ Exercice d'intercomparaison des algorithmes de corrections atmosphériques réalisés dans le cadre de l'IOCCG (International Ocean Color Coordinating Group, report #10, 2010)
- Génération et mise à disposition de bases de données de luminances par l'IOCCG (<http://www.ioccg.org/data/synthetic.html>) : océan ouvert avec aérosol peu absorbant, eaux côtières avec aérosols absorbants

Limites actuelles

1. Au niveau de la modélisation du transfert radiatif

- ✓ Trop peu de modèles couplés « atmosphère+océan » sont en accès libres à la communauté → multiplication des développements de modèles par institution/laboratoire
- ✓ Manque de modèles couvrant la gamme spectrale complète [UV-SWIR] → limitation pour la mise au point d'algorithmes de correction robustes aussi bien en océan ouvert qu'en eaux côtières
- ✓ Manque de modèles 3D en calcul sphérique capable de prendre en compte les nuages + aérosols + rugosité de surface + couche océan → difficultés pour modéliser le rayonnement aux hautes latitudes (hyp. plan-parallèle) et à l'échelle globale (i.e., y compris zone nuageuse au dessus des océans qui ont un impact sur le rayonnement disponible pour la production primaire)

- ✓ Temps de calcul des codes vectoriels encore trop long pour permettre l'implémentation d'algorithmes de correction dans les chaînes de traitement opérationnelles → contraint d'utiliser des LUTs (i.e., approximation)

2. Au niveau des algorithmes de corrections atmosphériques

- ✓ Manque de données in-situ (radiométriques et bio-optiques) dans la couche océan dans le spectre UV et SWIR → performance des algorithmes dégradée dans les eaux turbides
- ✓ Manque de données in-situ radiométriques de la luminance descendante et sortante au niveau de la surface de la mer dans des zones océaniques loin des continents → difficultés pour la validation des algorithmes de correction atmosphérique
- ✓ Hypothèse atmosphère plan-parallèle est une limite pour appliquer les algorithmes aux hautes latitudes ($> 70^\circ$) → difficulté pour étudier l'effet des changements climatiques aux pôles par télédétection

Besoins futurs

- ✓ Accroître la rapidité des modèles de transfert radiatif océan-atmosphère pour une implémentation opérationnelle dans des chaînes de traitement d'images satellites (i.e., en s'affranchissant des LUTs)
- ✓ Développer un modèle 3D océan + aérosols + nuages en calcul sphérique → synergie possible de modèles existants ?
- ✓ Génération et mise à disposition de LUTs « standards » représentatives des diverses conditions atmosphériques et océaniques dans la gamme UV → SWIR pour le développement, tests et évaluation des algorithmes inverses
- ✓ Consolider le réseau « AERONET-Ocean Colour » pour la validation des algorithmes de correction atmosphérique

- ✓ Besoin de poursuivre les développements de méthodes robustes pour modéliser les effets d'adjacence pour l'observation des zones côtières

En perspective de futurs capteurs géostationnaires

- ✓ Amélioration de la modélisation de la réflectance de Fresnel à l'interface air-mer pour des angles de visées $> 45^\circ$
- ✓ Prise en compte de fortes valeurs de masse d'air (> 5) pour calculer les luminances atmosphériques le long du chemin optique

Remerciements

- ✓ Comité d'organisation de l'atelier Trattoria II
- ✓ Université de Lille 1
- ✓ CNES
- ✓ ESA
- ✓ NASA

Merci de votre attention

Références citées (ordre alphabétique)

- ✓ Ahmad Z., B. A. Franz, C.R. McClain, E. Kwiatkowska, J. Werdell, E.P. Shettle, and B.N. Holben (2010), Applied Optics, Vol. 49, No. 29, 5545-5560
- ✓ Ahn, Y.H. and P. Shanmugam (2007), Proceedings of the IV International Conference – Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW 2007). Nizhniy Novgorod, Russia, 11-15 September 2007
- ✓ Bailey, S. W., Franz, B. A., & Werdell, P. J. (2010), Optics Express, 18, 7521–7527
- ✓ Banzon V.F., , H.R. Gordon, C.P. Kuchinke, D. Antoine, K.J. Voss, R.H. Evans (2009), Remote Sensing of Environment 113 (2009) 2689–2700
- ✓ Brajard J., R. Santer, M. Crepon, and, S. Thiria (2012), Remote Sens. Environ. 126, 51–61
- ✓ Bulgarelli B, Kisselev VB, Roberti L. (1999), Appl. Opt. 38, 1530–1542

Références (suite 1)

- ✓ Chami M., Santer R., Dilligeard E. (2001), *Appl. Opt.* 40, 2398–416
- ✓ Cui, T., Zhang, J., Groom, S., Sun, L., Smyth, T., & Sathyendranath, S. (2010), *Remote Sensing of Environment*, 114, 2326-2336
- ✓ Chomko R.M., Gordon H.R. (2001), *Appl. Opt.* 40: 2973-2984
- ✓ Chowdhary J., Cairns B. and L.D. Travis (2006), *Appl Opt.*, 45, 5542–67
- ✓ Deuzé J.L., M. Herman, and R. Santer (1989), *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 41, 483–494
- ✓ Ding and Gordon (1994), *Appl. Opt.*, 33, 30, 7096-7106
- ✓ Doerffer R. and Schiller H. (2007) *Int. J. Remote Sens.* 28 517–35
- ✓ Duforet (2009), thèse de l'université du Littoral, pp. 154
- ✓ Gordon H.R., Wang M. (1994), *Appl. Opt.* 33: 443-452
- ✓ Goyens C., C. Jamet, and T. Schroeder (2013), *Remote Sens. Environ.* 131, 63-75
- ✓ Fell F., Fischer J. (2001), *J. Quant. Spect. Rad. Trans.* 69, 351–88
- ✓ Harmel T., and M. Chami (2011), *Optics Express*, 19 (21), 20960-20983
- ✓ He et al. (2010), *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 111, 1426-1448
- ✓ Hollstein A. and J. Fisher (2012), *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 113, 536-548
- ✓ Hu C.M., Carder K. L. and Muller-Karger F.E. (2000) *Remote Sens. Environ.* 74, 195-206

Références (suite 2)

- ✓ IOCCG (2010), Wang, M. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 10, Canada (<http://www.ioccg.org/data/synthetic.html>)
- ✓ Jamet C., Thiria S., Moulin C., Crépon M. (2005), J. Atmos. Ocean Technol. 22: 460-475
- ✓ Jamet C., H. Loisel, C. P. Kuchinke, K. Ruddick, G. Zibordi, and H. Feng (2011), Remote Sens. Environ. 115 (8), 1955-1965
- ✓ Jin Z., Charlock T.P., Rutledge K., Stamnes K., Wang Y. (2006), Appl Opt., 45:7443–55
- ✓ Jolivet D., Ramon D., Deschamps P.Y. (2013), International Ocean Colour Science meeting, Darmstadt, Germany.
- ✓ Kattawar G.W. and C. N. Adams (1989), Limnol. Oceanogr. 34, 1453–1472
- ✓ Kotchenova S.Y., E.F. Vermote, R. Matarrese, & F.J. Klemm, Jr., (2006) Applied Optics, 45 (26), 6726-6774
- ✓ Kratzer, K. and Vinterhav, C. (2010), *Oceanologia*, 51(4): 1-26
- ✓ Kuchinke C.P., Gordon H.R., Franz B.A. (2009), Remote Sens. Environ. 113: 571-587
- ✓ Lavender S.J., M.H. Pinkerton, G.F. Moored, J. Aiken, D. Blondeau-Patissier (2005), Continental Shelf Research 25 (2005) 539–555
- ✓ Mélin, F., Vantrepotte, V., Clerici, M., D'Alimonte, D., Zibordi, G., Berthon, J.-F., Canuti, E (2011), Prog. Oceanogr., 91, 229-244, 10.1016/j.pocean.2010.12.001

Références (suite 3)

- ✓ Mishchenko MI, Travis LD, Lacis AA. (2006), New York: Cambridge University Press.
- ✓ Mobley C.D (1989), *Limnol. Oceanogr.* 34, 1473–1483
- ✓ Moore G.F., Aiken J., Lavender S. (1999), *Int. J. Remote Sens.* 20: 1713-1733
- ✓ Ota Y, Higurashi A, Nakajima T, Yokota T. (2010), *J. Quant Spect Rad Trans.*, 111, 878–94
- ✓ Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M. (2000), *Appl. Opt.* 39: 897-912
- ✓ Schroeder T., Behnert I., Schaale M., Fischer J., Doerffer R. (2007), *Int. J. Remote Sens.* 28: 1469-1486
- ✓ Shettle E.P., Fenn R.W. (1979), Report No. AFGL-TR-79-0214, U.S. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, Mass.
- ✓ Sommersten E.R, Lotsberg J.K, Stamnes K., Stamnes J.J. (2010). *J Quant Spect Rad Trans* 2010;111:616–33
- ✓ Stamnes, Knut; Tsay, S. C.; Wiscombe, W.; Jayaweera, Kolf (1988), *Appl. Opt.* 27 (12): 2502–2509
- ✓ Steinmetz F., Deschamps P.Y., Ramon D. (2011), *optics express*, ; 19(10), 9783-800
- ✓ Stamnes, K., W. Li, B. Yan, H. Eide, A. Barnard, W. S. Pegau and J. J. Stamnes. (2003), *Applied Optics.* 42, 939-951
- ✓ Wang M.(1991), PhD dissertation, 135 pp., University of Miami, USA
- ✓ Wang M., Tang J., Shi W. (2007), *Geophy. Res. Lett.* 34, L06611

Références (suite 4 et fin)

- ✓ Wang M., Son S., Shi W. (2009), *Remote Sens. Environ.* 113: 635-644
- ✓ Wang M., W. Shi, and, L. Jiang (2012), *Opt. Express* 20, 741–753
- ✓ Werdell P.J., B.A. Franz, and S.W. Bailey (2010), *Remote Sensing of Environment* 114, 2238-2247
- ✓ You Y., Zhai P., Kattawar G.W., Yang P. (2009) *Appl. Opt.* 48, 3019–29
- ✓ Zhai P., Hu Y., Chowdhary J., Trepte C.R, Lucker P.L, Josset D.B (2010), *J. Quant Spect Rad Trans*, doi:10.1016/j.jqsrt.2009.12.005
- ✓ Zibordi G., Mélin F., Berthon J.-F. (2006), *Geophys. Res. Lett.* 33: L06617
- ✓ Zibordi, G., Berthon, J. F., Mélin, F., D'Alimonte, D., & Kaitala, S. (2009), *Remote Sensing of Environment*, 113, 2574–2591