



Nomenclature : **SOS-MU-001-II**

EDIT. : 04 REV. : 01

DATE : 05/09/2017

Réf. CSSI/111-1/SOS/OSDMU-V6.1

du : 05/09/2017

Codes des Ordres Successifs de Diffusion (version 6.1)
Manuel Utilisateurs

	Fonction et Nom	Date	Signature
Préparé par	Bruno LAFRANCE	05/09/2017	
Approuvé par			
Pour Application			

Diffusion	Pour :	
	Action	Info.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature SOS-MU-001-II PAGE : i.2 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

BORDEREAU D'INDEXATION

Caractéristiques du document	
Volume :	1
Nombre total de pages :	194
Nombre de pages liminaires :	10
Nombre d'annexes :	0

Document géré en configuration	
A dater du :	05/09/2017
Responsable :	
Matériel hôte :	PC
Logiciel hôte :	WORD 2010

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature SOS-MU-001-II PAGE : i.3 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

COPYRIGHT

Copyright 2017, Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)

SOS is free software: you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or (at your option) any later version.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature SOS-MU-001-II PAGE : i.4 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

MODIFICATION

Edition	Révision	Date	Cause évolution
01	00	21/05/02	Création du document
02	00	25/06/08	<ul style="list-style-type: none"> - Ajout de nouvelles références. - Mise à jour du contenu du fichier de lancement (§III-2 « Définition des paramètres de simulation ») - Adaptation des commentaires et croquis au cas de simulation de modèles bimodaux d'aérosols : § III-« Mode opératoire » et §VII-« Propriétés radiatives des aérosols ». - Ajout de la section VII-7 « Calcul des propriétés radiatives de modèles bi-modaux » - Expression des sections efficaces de diffusion et d'extinction (§VII-1, page 95) et précision sur la modification du contenu des données informatives du fichier des propriétés radiatives des aérosols (§VII-2.2, page 98). - Correction des résultats de validation de l'implémentation des modèles d'aérosols de la WMO (§VII-5.2) et de Shettle & Fenn (§VII-6.2), suite à l'utilisation des sections efficaces au lieu des coefficients de diffusion et d'extinction. - Correctif de la formule de calcul du paramètre de taille α_{\max} pour les calculs de Mie des particules des modèles de Shettle & Fenn (eq. 94 en page 134).
02	01	08/08/2008	<ul style="list-style-type: none"> - Ajout d'une référence. - Précisions sur le calcul de l'épaisseur optique moléculaire (p. 35) - Précisions sur le fichier résultat des calculs «aérosols» (p. 98)
03	00	02/06/2010	<ul style="list-style-type: none"> - Introduction d'un chapitre dédié à la nouvelle fonction de gestion des angles et ordres de développement (§V-). - Refonte complète du paramétrage du code (§III-). - Ajout d'une fonctionnalité de lecture de données externes de fonctions de phase aérosols (§VII-8) - Ajout d'une fonctionnalité de calcul des transmissions (§VI-8). - Remplacement de SOS_RACINE_MU (variable d'environnement) par SOS_RACINE_FIC, car les fichiers prédéfinis d'angles de Gauss ne sont plus utilisés (p. 17) - Précisions sur le passage des paramètres propres à chaque programme.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature SOS-MU-001-II PAGE : i.5 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

04	00	10/12/2015	<ul style="list-style-type: none"> - Précision des évolutions du code au chapitre I-. - Précision sur la compilation gfortran au chapitre II-3 - Correction d'une erreur sur l'équation (5) - Modification du format des fichiers AEROSOLS (chap. VII-2.2) - Modification du format des fichiers de fonctions de phase externes (chap. VII-8.1) - Précision sur les paramètres k_0, k_1 et k_2 du modèle de BRDF de Roujean (chap. IX-3.1) - Changement de la définition du modèle de granulométrie LND pour adopter la définition commune (chap. VII.4.1.b, III-2.1 et VII-2.4 principalement) - Correction du terme de réflexion du faisceau solaire direct sur mer plate (chap. IX.2.2.b).
04	01	05/09/2017	Ajout des informations de licence en page i.3

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature SOS-MU-001-II PAGE : i.6 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

DOCUMENTS DE REFERENCE

- DR1 : Bodhaine B., N. Wood, E. Dutton, and J. Slusser « On Rayleigh Optical Depth Calculations », *J. Atmos. And Oceanic Technology*, vol. 16, pp. 1854-1861, 1999.
- DR2 : Bréon F.M., D. Tanré, P. Lecomte, and M. Herman « Polarized reflectance of bare soils and vegetation : Measurements and models », *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.*, vol. 33, pp. 487-499, 1995.
- DR3 : Cox C. and W. H. Munk, « Measurements of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter », *J. Optical Soc. America*, Vol. 44, No. 11, 1954.
- DR4 : Deuzé J.L, « Etude de la polarisation du rayonnement par les milieux diffusants, application à la polarisation localisée de Vénus », rapport de thèse, Université des Sciences et Techniques de Lille, 1974.
- DR5 : Deuzé J.L, M. Herman, and R. Santer, « Fourier series expansion of the transfer equation in the atmosphere-ocean system », *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, vol. 41, no. 6, pp. 483-494, 1989.
- DR6 : Dubovik O., Holben B., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M. D., Tanré D. and Slutsker I. « Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations », *J. Atmos. Sciences*, vol. 59, pp. 590-608, february 2002.
- DR7 : Dubovik, O. et al., Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust, *J. Geophys. Res.*, *111*, D11208, doi:10.1029/2005JD006619, 2006.
- DR8 : Hansen J. and Travis L., "Light scattering in planetary atmospheres", *Space Sci. Rev.*, Vol. 16., pp. 527-610, 1974..
- DR9 : Herman M and J.L. Deuzé, « Observation de la terre en lumière polarisée. Simulations numériques par le code des ordres successifs de diffusion. Notice scientifique », Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Lille, 2002.
- DR10 : Kuscer I. and M. Ribaric, « Matrix formalism in the theory of diffusion of light », *Optica Acta*, vol. 6, no. 42, 1959.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature SOS-MU-001-II PAGE : i.7 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

DR11 : Lenoble, J. et al., A successive order of scattering code for solving the vector equation of transfer in the earth's atmosphere with aerosols, *J. Quantitative Spectroscopy & radiative transfer*, vol. 107, n°3, pp. 479-507, 2007.

DR12 : Nadal F., « Analyse de la polarisation pour la télédétection de l'atmosphère et des surfaces grâce aux mesures spatiales POLDER », rapport de thèse, Université Paris VII, 1999.

DR13 : Rondeaux G. and M. Herman, « Polarization of light reflected by crop canopies », *Remote Sens. Env.*, no. 38, pp. 63-75, 1991.

DR14 : Roujean J.L., M. Leroy, and P.Y. Deschamps, « A bidirectional reflectance model of the Earth surface for the correction of remote sensing data », *J. Geophys. Res.*, no. 97, pp. 20455-20468, 1992.

DR15 : Shettle Eric P. and Fenn Robert W., « Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties », Air Force Geophysics Laboratory. September 1979, AFGL-TR-79-0214, *Environnemental Research papers*, No. 676.

DR16 : Siewert C. E., « On the equation of transfer relevant to the scattering of polarized light », *The Astrophysical J.*, vol. 245, no. 3, part 1, pp. 1080-1086, 1981.

DR17 : Stratton J.A., *Electromagnetic theory*, McGraw Hill Book, New York, USA, 615 pp., 1941.

DR18 : Vermote et al., Manuel – « Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum. 6S User Guide Version 1 », 15/09/97.

DR19 : World Climate Research Programme, « A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation », *WCP-112, WMO/TD Report No 24, Geneva, Switzerland*, March 1986

SOMMAIRE

I- INTRODUCTION.....	11
II- INSTALLATION	13
II-1 ENVIRONNEMENT MATERIEL ET LOGICIEL	13
II-2 ARBORESCENCE SOS.....	13
II-3 GENERATION DE L'EXECUTABLE.....	15
III- MODE OPERATOIRE	16
III-1 DEFINITION DES VARIABLES D'ENVIRONNEMENT	17
III-2 DEFINITION DES PARAMETRES DE SIMULATION	17
III-2.1 <i>Liste des paramètres</i>	18
III-2.2 <i>Définition des conditions angulaires</i>	30
III-2.3 <i>Conditions de surface</i>	31
III.2.3.a Surfaces marines.....	31
III.2.3.b Surfaces terrestres.....	31
III.2.3.c Fichiers des matrices de réflexion de surface.....	32
III-2.4 <i>Conditions atmosphériques</i>	35
III.2.4.a Diffusion moléculaire	35
III.2.4.b Diffusion et absorption des aérosols.....	35
III-2.5 <i>Type de sortie</i>	41
III-2.6 <i>Définition des fichiers de sortie</i>	45
III-2.7 <i>Exemple de fichier de lancement : Simulation sur océan</i>	46
III-3 CONSTANTES DE SIMULATION.....	47
III-3.1 <i>Liste des constantes du fichier SOS.h</i>	47
III-3.2 <i>Modification du nombre de couches des profils</i>	51
IV- DESCRIPTIF DU LOGICIEL.....	52
IV-1 STRUCTURE DU CODE	52
IV-2 LISTE DES PROGRAMMES ET ROUTINES	54
V- DEFINITION DES CONDITIONS ANGULAIRES	56
V-1 PASSAGE DES PARAMETRES A L'EXECUTABLE SOS_ANGLEX.EXE.....	56
V-2 CONTENU ET FORMAT D'UN FICHIER ANGLES POUR LE CODE DES OS.....	58
V-2.1 <i>Fichiers produits par le programme SOS_ANGLEX</i>	58
V.2.1.a Fichier pour le calcul du champ de luminance	58
V.2.1.b Fichier pour le calcul des fonctions de phase	59
V-2.2 <i>Fichiers de définition des « angles utilisateurs »</i>	61
V-3 FONCTIONNEMENT DE SOS_ANGLEX	61
V-3.1 <i>Gestion des angles</i>	61
V-3.2 <i>Ordres limites des développements</i>	63
V-4 ROLE DES ROUTINES ASSOCIEES AU PROGRAMME ANGLES.....	63
VI- CALCUL DU CHAMP DE LUMINANCE PAR LE CODE DES OS.....	64
VI-1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	64
VI-2 EQUATION DE TRANSFERT RADIATIF POUR UNE DECOMPOSITION EN SERIES DE FOURIER.....	65
VI-2.1 <i>Formalisme de Stokes</i>	65
VI-2.2 <i>Forme intégral-différentielle de l'ETR</i>	66
VI-2.3 <i>Forme intégrée de l'ETR</i>	66
VI-3 ENCHAÎNEMENT DES TRAITEMENTS DU CODE DES OSD : ROUTINE SOS_OS	68
VI-4 CALCUL DES FONCTIONS SOURCES.....	70
VI-4.1 <i>Noyaux de diffusion : SOS_NOYAUX</i>	70
VI-4.2 <i>Fonction source d'ordre 1 : SOS_FSOURCE_ORDRE1</i>	75
VI-4.3 <i>Fonction source d'ordre n : SOS_FSOURCE_ORDREIG</i>	76
VI-4.4 <i>Fonction source d'ordre 1 pour la prise en compte d'une réflexion sur mer plate</i>	76
VI-5 INTEGRATION SUR LE PROFIL ATMOSPHERIQUE.....	77

VI-6 TESTS D'ARRET DES DEVELOPPEMENTS	78
VI-6.1 Tests d'arrêt de calcul des interactions successives	78
VI.6.1.a Convergence en série géométrique	78
VI.6.1.b Importance de la contribution d'ordre n de diffusion	79
VI-6.2 Test d'arrêt du développement en série de Fourier	80
VI-7 PRECISION DES CALCULS	81
VI-7.1 Intégration sur l'épaisseur optique	81
VI-7.2 Intégration spatiale	81
VI-7.3 Longueur des développements	82
VI-8 CALCULS DES TRANSMISSIONS	83
VI-8.1 Principe de calcul des transmissions diffuses	83
VI-8.2 Validation	84
VI-9 PASSAGE DES PARAMETRES A L'EXECUTABLE SOS.EXE	88
VI-10 ROLE DES ROUTINES ASSOCIEES AU PROGRAMME SOS	92
VI-10.1 Programme du fichier SOS	92
VI-10.2 Procédures du fichier SOS_OS	92
VI-10.3 Procédures du fichier SOS_TRPHI	94
VII- PROPRIETES RADIATIVES DES AEROSOLS	95
VII-1 PROPRIETES RADIATIVES CARACTERISANT UNE COUCHE DE PARTICULES	95
VII-2 APPLICATION AU CODE DES OS : PROGRAMME SOS_AEROSOLS	98
VII-2.1 Propriétés radiatives des aérosols requises pour le code des OS	98
VII-2.2 Contenu et format d'un fichier AEROSOLS pour le code des OS	98
VII-2.3 Choix de simulation d'un modèle d'aérosols	99
VII-2.4 Passage des paramètres à l'exécutable SOS_AEROSOLS.exe	102
VII-3 CALCULS DE MIE	107
VII-3.1 Objectif des traitements	107
VII-3.2 Choix des données en entrée	108
VII-3.3 Description des fichiers de sortie	109
VII-3.4 Relation théorie / algorithme	110
VII-4 CALCUL DES PROPRIETES RADIATIVES D'UNE GRANULOMETRIE D'AEROSOLS MONO-MODALE	118
VII-4.1 Cas de particules sphériques	118
VII.4.1.a Données de Mie initiales	118
VII.4.1.b Estimation des paramètres radiatifs pour une granulométrie et une longueur d'onde fixées	118
VII-4.2 Décomposition de la matrice de phase en fonctions de Legendre	120
VII-4.3 Application d'une troncature	123
VII-5 CALCUL DES PROPRIETES RADIATIVES D'UNE GRANULOMETRIE D'AEROSOLS SELON LES MODELES DE LA WMO ...	126
VII-5.1 Principe théorique	126
VII.5.1.a Méthode générale de calcul des propriétés radiatives d'un mélange de particules	126
VII.5.1.b Adaptation aux modèles de la WMO	127
VII-5.2 Validation des calculs	130
VII-6 CALCUL DES PROPRIETES RADIATIVES D'UNE GRANULOMETRIE D'AEROSOLS SELON LES MODELES DE SHETTLE ET FENN	132
VII-6.1 Principe théorique	132
VII-6.2 Validation des calculs	135
VII-7 CALCUL DES PROPRIETES RADIATIVES DE MODELES BI-MODAUX D'AEROSOLS	137
VII-7.1 Principe théorique	137
VII-7.2 Introduction de la valeur des coefficients $C_{v,i}$	138
VII-7.3 Validation des calculs	139
VII-8 UTILISATION DE FONCTIONS DE PHASE DE SOURCE EXTERNE	140
VII-8.1 Format du fichier de fonctions de phase externes	140
VII-8.2 Traitements spécifiques	141
VII-9 ROLE DES ROUTINES ASSOCIEES AU PROGRAMME SOS_AEROSOLS	142
VII-9.1 Procédures du fichier SOS_AEROSOLS	142
VII-9.2 Procédures du fichier SOS_MIE	144
VIII- DEFINITION DU PROFIL ATMOSPHERIQUE	145
VIII-1 PROFIL ATMOSPHERIQUE POUR LE CODE DES OS	145
VIII-2 CONTENU ET FORMAT D'UN FICHIER DE PROFIL POUR LE CODE DES OS	146
VIII-3 CHOIX DE SIMULATION DU PROFIL	146

<h1>CS SI</h1>	<h2>Manuel utilisateur du code des OSD</h2>	<p>Nomenclature SOS-MU-001-II PAGE : i.10 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017</p>
----------------	---	---

VIII-4 PASSAGE DES PARAMETRES A L'EXECUTABLE SOS_PROFIL.EXE.....	147
VIII-5 DEFINITION DU PROFIL ATMOSPHERIQUE ETABLI PAR ECHELLES DE HAUTEUR	149
VIII-6 COUCHE D'AEROSOLS ENTRE DEUX ALTITUDES VARIABLES	151
VIII-6.1 <i>But du traitement</i>	151
VIII-6.2 <i>Description du profil</i>	152
VIII-6.3 <i>Détermination du nombre de sous-couches par couche</i>	153
VIII-6.4 <i>Estimation de la proportion des espèces pour l'extinction</i> :.....	153
VIII-7 DESCRIPTION DES FICHIERS DE SORTIE.....	154
VIII-8 ROLE DES ROUTINES ASSOCIEES AU PROGRAMME SOS_PROFIL	155

IX- REFLEXION DE SURFACE.....156

IX-1 CARACTERISATION DES REFLEXIONS DE SURFACE PAR LE CODE DES OS.....	156
IX-1.1 <i>Expression de la luminance par réflexion de surface</i>	156
IX.1.1.a Réflexion lambertienne.....	156
IX.1.1.b réflexion directionnelle pour un modèle de BRDF.....	157
IX.1.1.c Réflexion directionnelle pour un modèle de BPDF.....	157
IX.1.1.d Application au formalisme des OS	158
IX-1.2 <i>Propriétés des surfaces requises pour le code des OS</i>	159
IX-1.3 <i>Contenu et format d'un fichier SURFACE pour le code des OS</i>	160
IX-1.4 <i>Choix de simulation des conditions de surface</i>	161
IX-1.5 <i>Passage des paramètres à l'exécutable SOS_SURFACE.exe</i>	162
IX-2 REFLEXION DE FRESNEL SUR MER PLATE.....	164
IX-2.1 <i>Expression théorique de la matrice de réflexion de Fresnel</i>	164
IX.2.1.a Coefficients de réflexion de Fresnel	164
IX.2.1.b Paramètres de Stokes	169
IX.2.1.c Matrice de réflexion.....	170
IX-2.2 <i>Introduction de la réflexion de Fresnel dans les OS</i>	172
IX.2.2.a Formalisme sans séparation de la dépendance azimutale et zénithale	172
IX.2.2.b Application au formalisme des OS	174
IX.2.2.c Implémentation dans le code des OS	177
IX-3 REFLEXION POUR LE MODELE DE BRDF DE ROUJEAN	179
IX-3.1 <i>Modèle de BRDF de Roujean</i>	179
IX-3.2 <i>Application au formalisme des OS</i>	180
IX-4 REFLEXION POUR DES MODELES DE BPDF	181
IX-4.1 <i>Fonctions G de probabilité d'orientation des facettes de surface</i>	181
IX.4.1.a Formalisme classique.....	181
IX.4.1.b Formalisme pour les OS	182
IX-4.2 <i>Formalisme de décomposition en séries de Fourier de la matrice de réflexion de surface</i>	183
IX.4.2.a Décomposition en séries de Fourier de la fonction g.....	183
IX.4.2.b Décomposition en séries de Fourier de la matrice de réflexion de Fresnel.....	183
IX.4.2.c Matrice de réflexion.....	186
IX.4.2.d Spécificités d'implémentation	187
IX-5 ROLE DES ROUTINES ASSOCIEES AU PROGRAMME SOS_SURFACE	189
IX-5.1 <i>Procédures du fichier SOS_SURFACE</i>	189
IX-5.2 <i>Procédures du fichier SOS_NOM_FIC_SURFACE</i>	190
IX-5.3 <i>Procédures du fichier SOS_ROUJEAN</i>	193
IX-5.4 <i>Procédures du fichier SOS_GLITTER</i>	194
IX-5.5 <i>Procédures du fichier SOS_RONDEAUX_BREON</i>	194
IX-5.6 <i>Procédures du fichier SOS_NADAL</i>	194

<p>CS SI</p>	<p>Manuel utilisateur du code des OSD</p>	<p>Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 11 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017</p>
---------------------	--	--

I- Introduction

Le code des Ordres Successifs de Diffusion (OSD) est un code de transfert radiatif simulant la luminance diffuse et polarisée du système {surface – atmosphère} par ciel clair et sans absorption gazeuse.

Les premiers développements du code des OSD datent des travaux de thèse de M. Deuzé, portant sur la polarisation du rayonnement par les milieux diffusants [Laboratoire d'Optique Atmosphérique, 1974, DR4]. Le programme s'est ensuite enrichi par la possibilité de simuler la réflexion spéculaire du rayonnement sur la mer [1989, DR5].

La présente version du code des OSD reprend ces fonctionnalités initiales et les complète par de nouvelles possibilités de simulations :

- La base des modèles d'aérosols utilisables a été élargie : il est possible de simuler des granulométries mono-modales (loi log-normale ou de Junge) ainsi que des modèles plus complexes comme des distributions bimodales [DR6] ou les modèles prédéfinis de la WMO [DR19] et de Shettle & Fenn [DR15] (modèles continentaux, urbains, maritime ou côtier, avec une prise en compte de l'humidité relative de l'air). Il est également possible d'utiliser des fonctions de phase provenant d'une source externe, ce qui permet notamment de simuler la diffusion d'aérosols non-sphériques (d'orientation aléatoire). Le positionnement de la couche d'aérosols peut être modifié.
- La possibilité d'utiliser de nouvelles conditions de surface a également été introduite : modèle de réflexion de Roujean [DR14], modèles de réflexion en polarisation de Rondeaux [DR13] pour le cas de couverts végétaux ou de Bréon [DR2] pour des sols nus, modèle semi-empirique de Nadal [DR12].

Le codage du logiciel a été repris et contrôlé : corrections d'anomalies pour les traitements sur mer, introduction de commentaires dans les fichiers sources et remise en forme des codes. Les performances des traitements ont été améliorées. La réalisation d'une simulation a été simplifiée : les paramètres de traitements sont définis par couples « -Keyword *Value* », la définition des angles et des ordres de développements associés est gérée par le code.

Ce document constitue le manuel d'utilisation de la **version 6.0 du code des Ordres Successifs de Diffusion**. Il a pour objectif de présenter la démarche d'installation du logiciel, son mode opératoire et son fonctionnement. Les spécificités de chaque programme sont présentées à travers les sections dédiées au formalisme théorique du logiciel, à la gestion des angles et des ordres de développement, au calcul des propriétés radiatives des aérosols, à la définition du profil atmosphérique, au calcul de matrices de réflexion de surface, et au calcul du champ de luminance par les OSD.

La description des diverses routines se veut aussi proche que possible de l'implémentation des programmes afin d'assurer la pérennité du logiciel malgré sa complexité théorique.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 12 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Les principales évolutions apportées au logiciel (par rapport à la version 5 précédente) sont :

- La possibilité d'utiliser le code sur linux avec une compilation par gfortran.
- La correction d'une sensibilité du code au type des paramètres en entrée (qui présentait un risque de mauvais décodage de la valeur d'un paramètre si la valeur renseignée ne respectait pas strictement le type attendu).
- Une modification du format des fichiers à usage interne : fichiers « Angles » et « Aérosols ». Avec pour conséquence, si l'utilisateur souhaite utiliser un fichier de paramètres radiatifs des aérosols de respecter le nouveau format de ces fichiers (option `-AER.UserFile`) : voir le chapitre VII-2.2.
- Une modification du format des fichiers de fonctions de phase dans le cas de l'utilisation de cette donnée externe (option `-AER.Model 4` avec usage d'un fichier défini par `-AER.ExtData`) : voir le chapitre VII-8.1.
- La correction de sorties en erreur par manque de définition de certains paramètres non utiles pour quelques cas de simulation.
- La correction de quelques valeurs d'indice de réfraction dans les fichiers de paramètres radiatifs des modèles WMO (cf. chapitre VII.5.1.b) et Shettle et Fenn (cf. chapitre VII-6.1). Les fichiers sous le répertoire `fic/` de l'arborescence du code ont été corrigés (fichiers : `IRefrac_LU_cor_2015_12_16`, `IRefrac_OM_cor_2015_12_16`, `IRefrac_SR_cor_2015_12_16`, `IRefrac_SU_cor_2015_12_16`, `Data_SF_cor_2015_12_16`, `Data_WMO_cor_2015_12_16`). Le fichier `SOS.h` a été mis à jour pour préciser l'usage de ces nouveaux fichiers.
- La modification de la définition des granulométries LND pour se ramener à la définition usuelle :
L'ancienne définition : $N(r) = \frac{1}{r \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{\log_{10}^2(r/r_m)}{2\sigma_{anc}^2}\right)$ est donc abandonnée,
en faveur de la définition classique : $N(r) = \frac{1}{r \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{\ln^2(r/r_m)}{2\sigma^2}\right)$
Il convient d'adapter les valeurs de paramètres (`-AER.MMD.SDparam2`, `-AER.BMD.CM.SDvar` ou `-AER.BMD.FM.SDvar`) par la relation : $\sigma = \sigma_{anc} \times \ln(10)$
- La correction du terme de réflexion du faisceau solaire direct sur mer plate, avec l'introduction d'une nouvelle constante dans `SOS.h` : `SOS_SOLAR_DISC_SOLID_ANGLE`: cf. chapitre IX-2.2.
Attention : le calcul de ce terme de réflexion direct sur mer plate correspond à une distance Terre-Soleil en lien avec l'angle solide du disque solaire apparent (distance Terre-Soleil moyenne pour la valeur par défaut de la constante `SOS_SOLAR_DISC_SOLID_ANGLE`).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 13 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

II- Installation

II-1 Environnement matériel et logiciel

L'environnement nécessaire à l'installation et à l'exécution du code des OS est le suivant :

- Le logiciel a été testé sur les machines suivantes :
 - station SUN sous système d'exploitation SOLARIS,
 - PC LINUX sous système d'exploitation RedHat.
- compilateur Fortran (g77, f77 ou gfortran)

NB : Le logiciel génère des fichiers binaires (calculs de Mie et des matrices de réflexion de surface). Le format d'enregistrement des données binaires n'étant pas le même entre le monde Unix et Linux, ces fichiers ne sont pas compatibles d'un système d'exploitation à l'autre.

II-2 Arborescence SOS

Il faut copier l'arborescence SOS sur son compte utilisateur.

Cette arborescence se compose des sous répertoires suivants :

-src : contient les sources

SOS_ANGLES.F : programmes de gestion des angles et des ordres de développement.

SOS_AEROSOLS.F : programmes de calcul des paramètres radiatifs des aérosols.

SOS_MIE.F : routines de calcul des fichiers de MIE.

SOS_PROFIL.F : programmes de définition du profil atmosphérique.

SOS_SURFACE.F : programmes de calcul des fichiers de BRDF / BPDF de surface.

SOS_GLITTER.F : routines de calcul des matrices de réflexion du Glitter.

SOS_ROUJEAN.F : routines de calcul des matrices de BRDF de Roujean.

SOS_RONDEAUX_BREON.F : routines de calcul des matrices de BPDF des modèles de Rondeaux ou Bréon.

SOS_NADAL.F : routines de calcul des matrices de BPDF du modèle de Nadal.

SOS_NOM_FIC_SURFACE.F : routines gérant la dénomination des fichiers contenant les matrices de réflexion de surface.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 14 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

SOS.F : programme principal du code des OSD.

SOS_OS.F : calcul du champ de rayonnement diffus polarisé (I, Q, U) dans une atmosphère diffusante.

SOS_TRPHI.F : génère les fichiers résultats des paramètres de Stokes I, Q et U.

-obj : espace de compilation.

-exe : contient les exécutables et la procédure KSH permettant de lancer ces exécutables.

5 exécutables :

SOS_ANGLES.exe pour le calcul des fichiers d'angles,
SOS_AEROSOLS.exe pour le calcul des fichiers Aérosols,
SOS_PROFIL.exe pour le calcul des fichiers du profil atmosphérique,
SOS_SURFACE.exe pour le calcul des fichiers de matrice de réflexion sur la surface,
SOS.exe pour le calcul des OS.

2 fichiers ksh (KornShell) :

runOS.ksh permettant la sélection des paramètres de simulation et passant les arguments au script de traitement main_SOS.ksh,
main_SOS.ksh gérant l'enchaînement des traitements et l'appel des différents exécutables.

1 fichier texte :

config.txt qui est une copie du fichier « SOS.h » des constantes du code qui ont été utilisées lors de la compilation des exécutables présents sous le répertoire.

-inc : contient le fichier « **SOS.h** » rassemblant les constantes du code des OS. Il est commun à l'ensemble des programmes. Il précise la taille des tableaux utilisés, les noms des fichiers de données sur les modèles d'aérosols de la WMO et de Shettle & Fenn, ainsi qu'un ensemble de valeurs seuils pour les traitements des programmes.

-gen : contient les Makefile (compilation et lien de l'applicatif).

-fic : contient les fichiers de données nécessaires aux traitements des programmes :

Fichiers de données Aérosols des modèles de la WMO et de Shettle & Fenn :

DataWMO_cor_2015_12_16,
DataSF_cor_2015_12_16, IRefrac_LR, IRefrac_LU_cor_2015_12_16,
IRefrac_OM_cor_2015_12_16, IRefrac_SR_cor_2015_12_16,
IRefrac_SU_cor_2015_12_16.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 15 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

-doc : contient 5 fichiers textes

Install.txt : installation du code des OS.

Fichier.txt : description du contenu des fichiers utilisés par le code des OS.

Manuel.txt : lancement / exécution du code des OS.

SOS-MU-001-II-E3-R0 : Manuel utilisateur (version française) au format Microsoft Word (.doc) et PDF (.pdf).

SOS-UG-001-II-E1-R0: Manuel utilisateur (version anglaise) au format Microsoft Word (.doc) et PDF (.pdf).

II-3 Génération de l'exécutable

a) par précaution, se positionner dans le répertoire SOS/obj et détruire les fichiers objets .o (rm *.o).

b) positionner la variable d'environnement RACINE : chemin d'accès à l'arborescence SOS.

Exemple : export RACINE=/users/username/SOS.

La commande ls \$RACINE permet d'afficher les sous-répertoires décrits dans le paragraphe II-2.

En pratique, il est recommandé de définir la variable \$RACINE dans le fichier « .profile » ou « .kshrc » de l'utilisateur pour ne pas devoir la redéfinir à chaque session.

c) se positionner dans le répertoire gen (cd \$RACINE/gen).

d) lancer le makefile :

make -f Makefile.xxx

avec xxx=g77 si l'on dispose du compilateur g77,

avec xxx=f77 si l'on dispose du compilateur f77.

avec xxx=gfortran pour l'usage du compilateur gfortran.

On trouve alors :

- dans le répertoire \$RACINE/obj : le résultat de la compilation,
- dans le répertoire \$RACINE/exe :
5 exécutables SOS.exe, SOS_AEROSOLS.exe, SOS_ANGLES.exe, SOS_PROFIL.exe et SOS_SURFACE.exe en plus des procédures KSH.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 16 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

III- Mode opératoire

Ce chapitre précise la démarche à suivre pour exécuter une simulation et pour modifier les paramètres de calculs. Ces paramètres se distinguent en deux lots :

- des paramètres propres à chaque simulation, précisés dans un fichier de lancement **runOS.ksh**,
- des constantes dimensionnantes et des valeurs seuils, rassemblées dans un fichier d'inclusions **SOS.h**.

Les paramètres sont renseignés par l'utilisateur à l'appel du script principal main_SOS.ksh. En pratique, on peut s'appuyer sur le **fichier de lancement runOS.ksh** (sous \$RACINE/exe) qui positionne les variables d'environnement et réalise l'appel du script main_SOS.ksh. Il précise l'ensemble des paramètres d'une simulation : paramètres physiques décrivant les propriétés des surfaces (albédo, BRDF, BPDF) et de l'atmosphère (molécules, aérosols), ainsi que la direction d'éclairement. Le fichier de lancement permet également de préciser le type de sortie souhaitée (plan de visée ou champ global, niveau du profil, ordre limite d'interactions, coupure de la polarisation) ainsi que les angles à utiliser (nombre d'angles de Gauss pour les intégrations spatiales et liste d'angles définis librement). L'utilisateur y précise le nom des fichiers résultats, des fichiers Trace et l'arborescence du stockage des fichiers de Mie et de BRDF ou BPDF.

Le **fichier des inclusions SOS.h** (sous \$RACINE/inc) contient l'ensemble des constantes de simulations. Il précise toutes les grandeurs dimensionnantes. Leurs valeurs sont associées au logiciel à la compilation.

Toute modification des constantes demande une nouvelle compilation du logiciel pour être effectivement prise en compte.

Ces constantes peuvent être communes à l'ensemble des programmes ou spécifiques à certains. Le fichier SOS.h distingue six types de constantes :

- Constantes communes telles que la longueur de chaînes de caractères.
- Constantes spécifiques aux routines du programme SOS_AEROSOLS.
- Constantes spécifiques à la définition du profil atmosphérique.
- Constantes spécifiques aux programmes de calculs des matrices de réflexion de surface.
- Constantes spécifiques aux routines du programme SOS, précisant notamment la valeur des paramètres seuils intervenant pour les tests d'arrêt du logiciel
- Constantes spécifiques à la définition des angles et des ordres de développements en séries de Fourier et en polynômes de Legendre.

Le fichier SOS.h est en pratique rarement modifié. Tout changement de son contenu demande une bonne connaissance du logiciel.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 17 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

III-1 Définition des variables d'environnement

Les chemins d'accès aux fichiers des exécutables, aux fichiers utilisés et aux fichiers résultats sont précisés par des variables d'environnement rappelées dans le fichier **runOS.ksh**.

Le fichier runOS.ksh requiert la définition de trois variables d'environnement :

- La variable **\$SOS_RACINE** pour laquelle on affecte \$RACINE qui pointe sur l'arborescence du programme (cf. II-3).
- La variable **\$SOS_RESULT** qui pointe sur le répertoire de stockage des résultats.
- La variable **\$SOS_RACINE_FIC** qui précise le répertoire de stockage des fichiers prédéfinis de données aérosols (modèles WMO et Shettle&Fenn).

Variables d'environnement		runOS.ksh
<i>Nom</i>	<i>Description</i>	
SOS_RACINE	Chemin d'accès à l'arborescence SOS	
SOS_RESULT	Répertoire de stockage des fichiers résultats	
SOS_RACINE_FIC	Chemin d'accès aux fichiers définissant les modèles WMO et Shettle&Fenn	

III-2 Définition des paramètres de simulation

On distingue cinq blocs de paramètres :

- Les paramètres définissant les angles à utiliser.
- Les paramètres de base de simulation du champ de rayonnement.
- Les paramètres définissant les conditions de surface.
- Les paramètres définissant le profil atmosphérique (épaisseurs optiques).
- Les paramètres définissant les aérosols.

Ces paramètres sont renseignés à l'appel du script main_SOS.ksh par **couples** : « **-Keyword Value** ».

Le chapitre III-2.1 liste l'ensemble des paramètres de simulation.

Le chapitre III-2.2 (p. 30) précise les paramètres définissant les conditions angulaires.

Le chapitre III-2.3 (p. 31) précise les paramètres relatifs à la définition des conditions de surface.

Le chapitre III-2.4 (p. 35) précise les paramètres atmosphériques.

Le chapitre III-2.5 (p. 41) précise les types de sorties possibles.

Le chapitre III-2.6 (p. 45) précise les fichiers de sorties disponibles.

Enfin, le chapitre III-2.7 (p. 46) illustre un exemple de simulation.

III-2.1 Liste des paramètres

Les croquis suivants indiquent les paramètres (Keyword) en entrée du script main_SOS.ksh.

Le tableau 111 précise l'ensemble des paramètres.

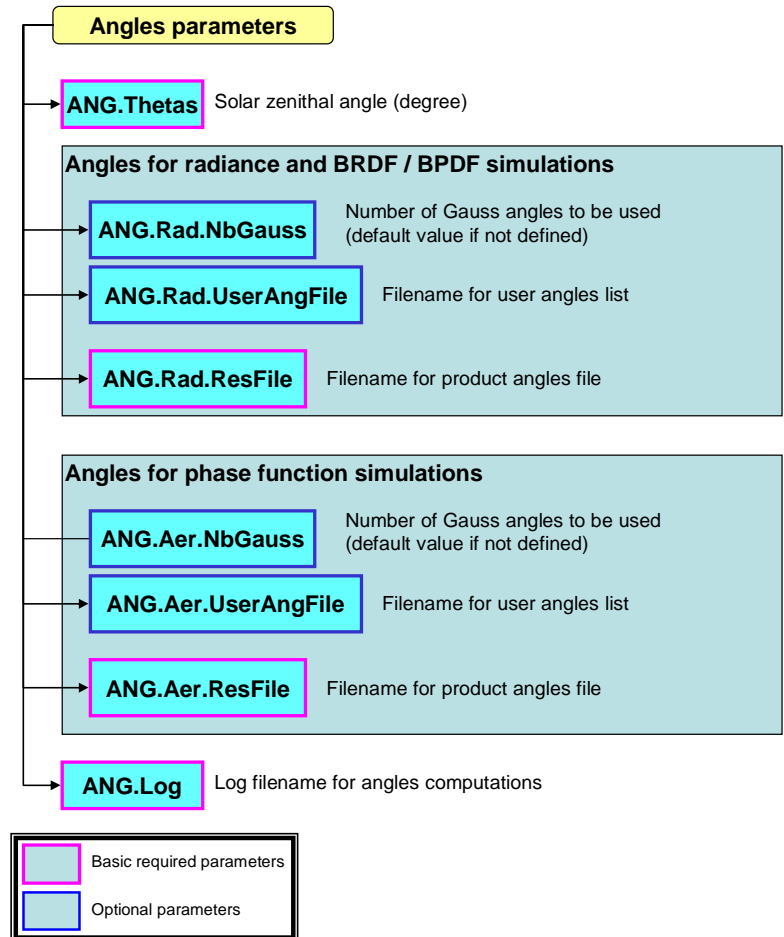


Figure 1 : Paramètres de définition des angles pour l'appel du script main_SOS.ksh

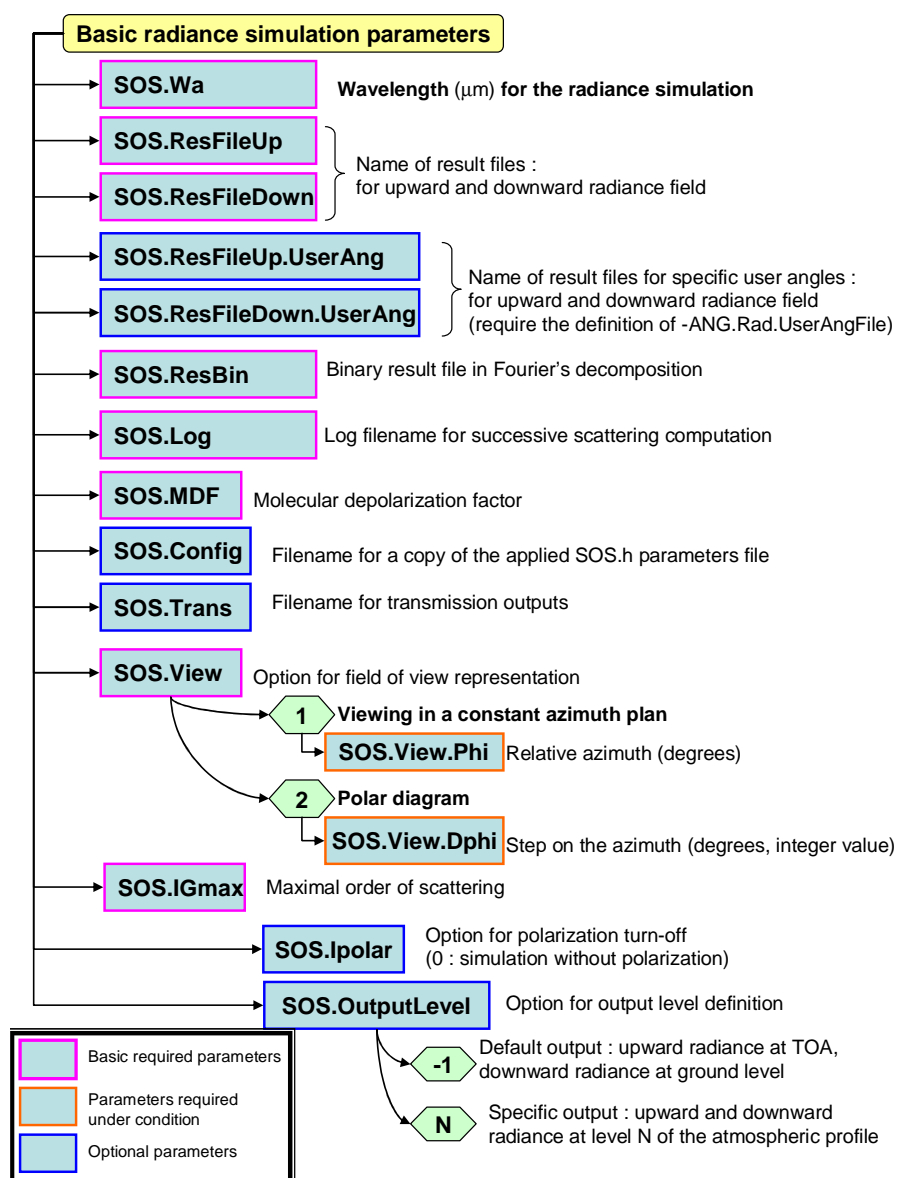


Figure 2 : Paramètres de base de simulation du champ de rayonnement pour l'appel du script main_SOS.ksh

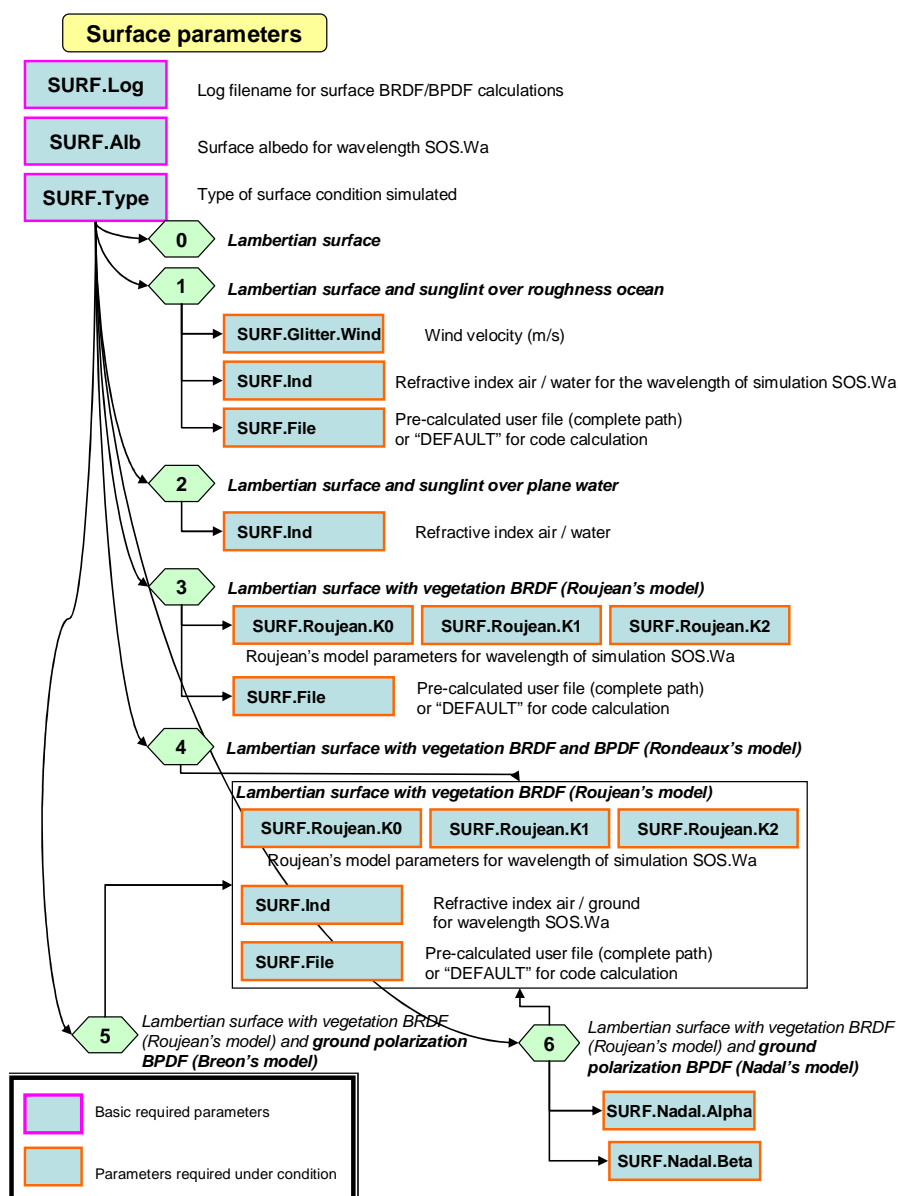


Figure 3 : Paramètres de surface pour l'appel du script main_SOS.ksh

Atmospheric Profile

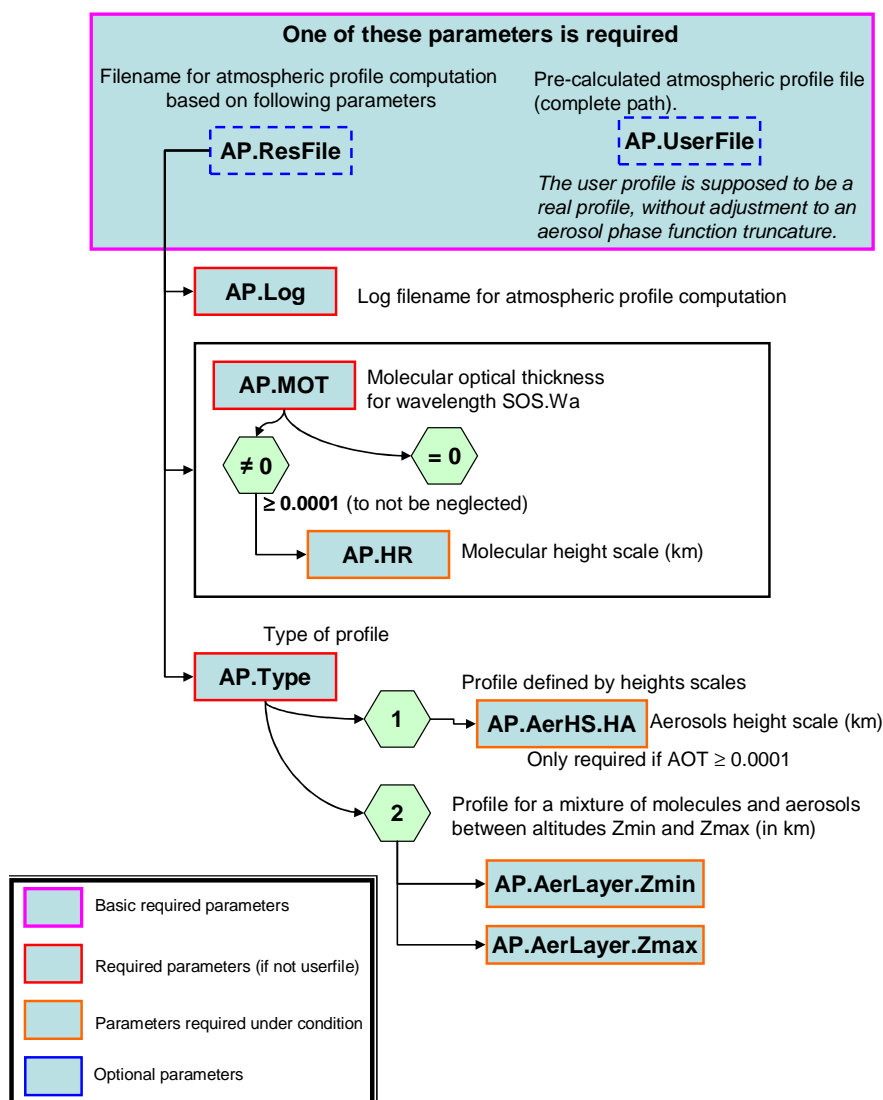


Figure 4 : Paramètres du profil atmosphérique pour l'appel du script main_SOS.ksh

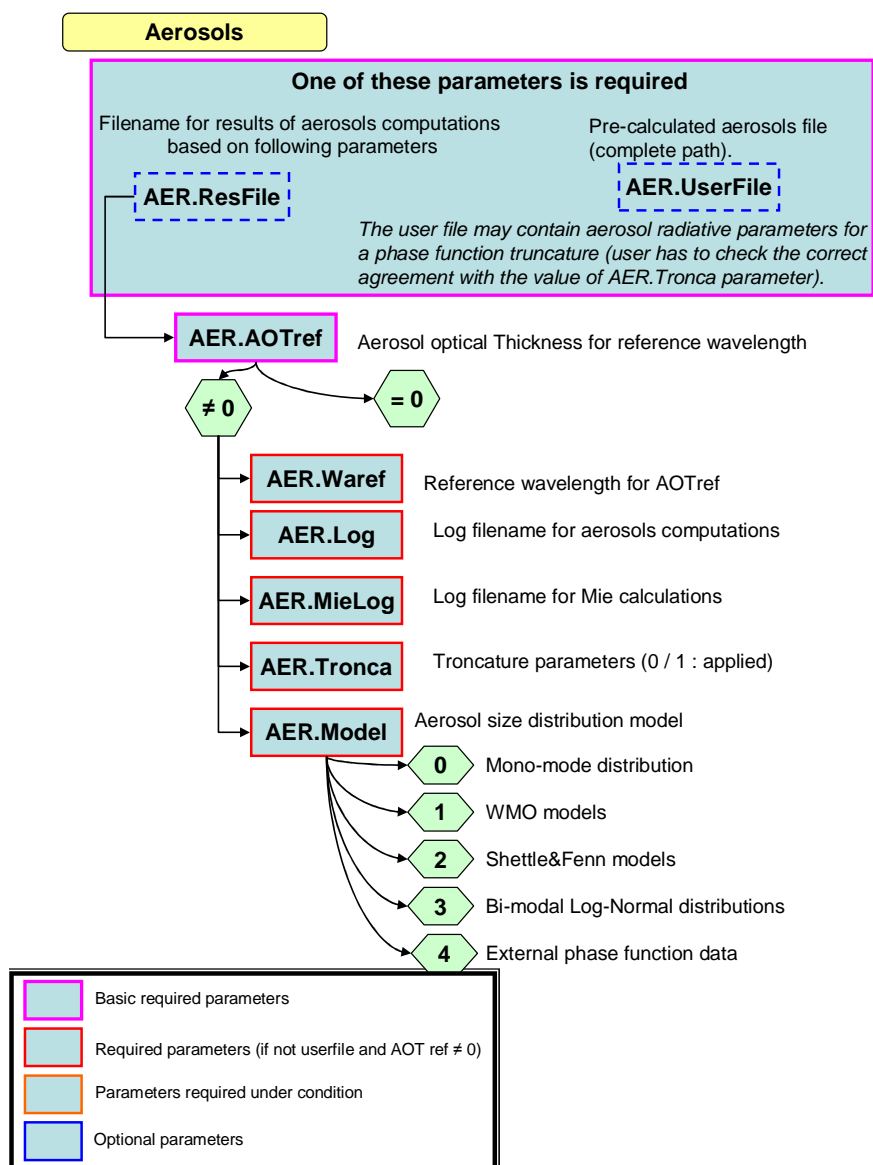


Figure 5 : Paramètres aérosols pour l'appel du script main_SOS.ksh (1/2)

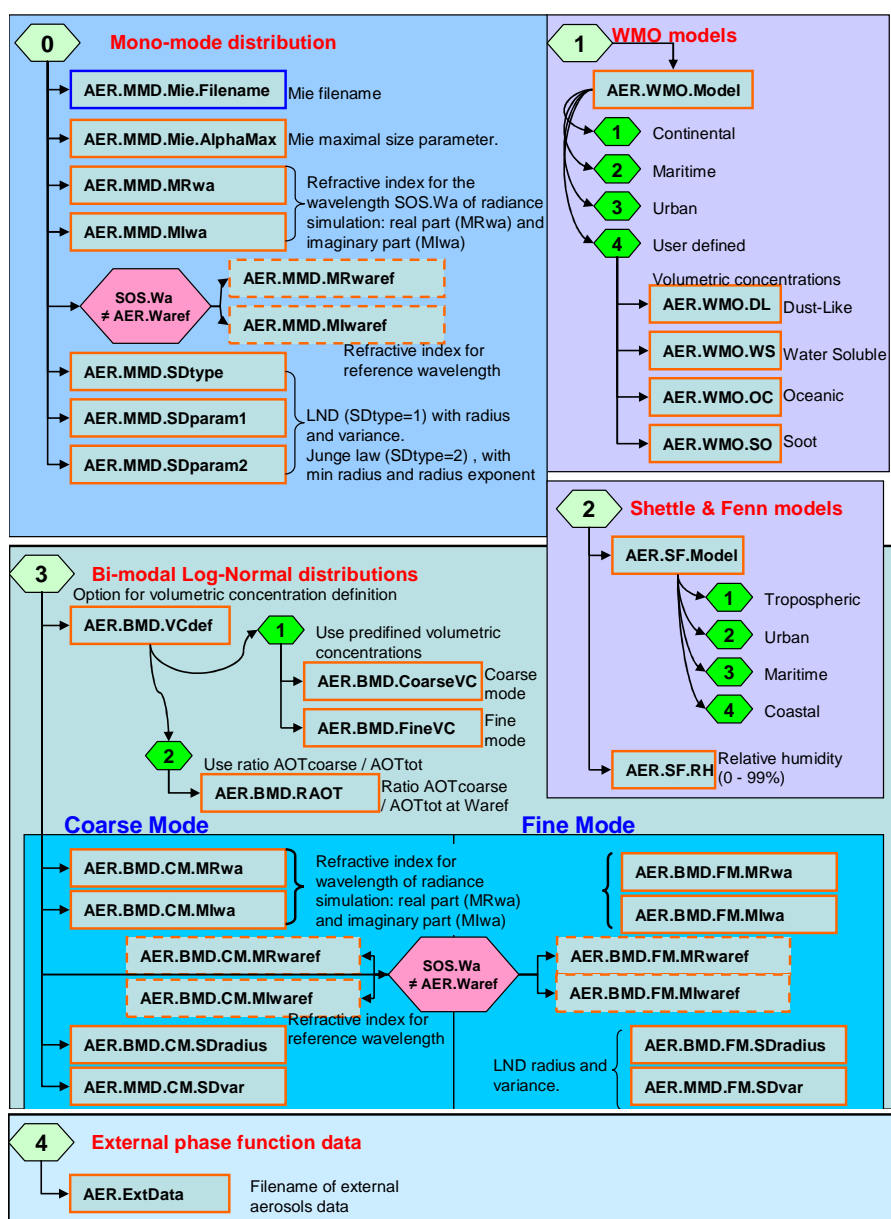
AER.Model Aerosol size distribution model

Figure 6 : Paramètres aérosols – détail des options du modèle - pour l'appel du script main_SOS.ksh (2/2)

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 24 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Tableau 1 : Paramètres de simulations

Paramètres de simulation :	
Description des entrées – sorties, paramètres physiques et options de traitements	
<i>Répertoires de la base des fichiers de réflexion de surface, des fichiers de Mie, des fichiers Trace et des fichiers résultats</i>	
dirSUNGLINT	Répertoire de stockage des fichiers de réflexion du modèle du Glitter
dirROUJ	Répertoire de stockage des fichiers de réflexion du modèle de Roujean
dirRH	Répertoire de stockage des fichiers de réflexion du modèle de Rondeaux – Herman
dirBREON	Répertoire de stockage des fichiers de réflexion du modèle de Bréon
dirNADAL	Répertoire de stockage des fichiers de réflexion du modèle de Nadal
dirMIE	Répertoire de stockage des fichiers de Mie
dirLOG	Répertoire de stockage des fichiers trace
dirRESULTS	Répertoire de stockage des fichiers résultats
<i>PARAMETRES D'INCIDENCE SOLAIRE ET DE DEFINITION DES ANGLES</i>	
ANG.Thetas	Angle zénithal solaire en degrés ($0 < \theta < 90^\circ$)
ANG.Rad.NbGauss	Nombre d'angles de Gauss pour les simulations de luminance et BRDF/BPDF
ANG.Rad.UserAngFile	Nom du fichier des angles « utilisateur » complémentaires pour les calculs de luminance.
ANG.Rad.ResFile	Nom du fichier créé contenant les angles et les ordres maximums des développements à utiliser pour les calculs de luminance.
ANG.Aer.NbGauss	Nombre d'angles de Gauss pour les calculs de fonctions de phase
ANG.Aer.UserAngFile	Nom du fichier des angles « utilisateur » complémentaires pour les calculs de fonctions de phase.
ANG.Aer.ResFile	Nom du fichier créé contenant les angles et les ordres maximums des développements à utiliser pour les calculs de fonctions de phase.
ANG.Log	Nom du fichier trace des calculs du programme ANGLES <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
<i>LONGUEUR D'ONDE POUR LA SIMULATION DU CHAMP DE RAYONNEMENT</i>	
SOS.Wa	Longueur d'onde de simulation du champ de rayonnement (μm)
<i>PARAMETRES DU PROFIL ATMOSPHERIQUE</i>	
AP.Log	Nom du fichier trace des calculs du programme PROFIL <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
AP.ResFile	Nom du fichier PROFIL qui sera créé par le code : <i>Utilisé en absence de fichier Utilisateur</i> NB : Fichier écrasé à chaque simulation
AP.userFile	Nom du fichier utilisateur précalculé de profil atmosphérique (arborescence complète). <i>NB : le profil utilisateur est supposé être un profil vrai, c'est à dire sans ajustement par rapport à une troncature de la fonction de phase des aérosols.</i>
<i>Molécules</i>	
AP.MOT	Epaisseur optique Rayleigh
<i>Si AP.MOT ≥ 0.0001</i>	
AP.HR	Echelle de hauteur du profil moléculaire (km)

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 25 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

<i>Type de profil</i>	
AP.Type	Type de profil simulé : 1 : profil défini par simples échelles de hauteur 2 : profil défini avec trois couches distinctes : molécules, molécules + aérosols, molécules
<i>Si AP.Type = 1 et AOT ≥ 0.0001 (pas toujours estimable puisqu'on définit une AOT de référence à une autre longueur d'onde)</i>	
AP.AerHS.HA	Echelle de hauteur du profil d'aérosols (km)
<i>Si AP.Type = 2</i>	
AP.AerLayer.Zmin	Altitude minimale de la couche du mélange molécules + aérosols (en km) <i>NB : 0 possible pour un cas à deux couches : molécules + aérosols, molécules</i>
AP.AerLayer.Zmax	Altitude maximale de la couche du mélange molécules + aérosols (en km)

PARAMETRES DE MODELISATION DES AEROSOLS	
AER.MieLog	Nom du fichier trace des calculs de Mie <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
AER.Log	Nom du fichier trace des calculs du programme AEROSOLS <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
AER.ResFile	Nom par défaut du fichier AEROSOLS créé par le code Fichier écrasé à chaque simulation
AER.UserFile	Nom du fichier Aérosols Nom du fichier utilisateur précalculé (arborescence complète). <i>NB : le fichier Aérosols contient l'éventuelle information de troncature. Il <u>ne peut</u> être utilisé que si les traitements se font directement pour la longueur d'onde de simulation (longueur d'onde de référence identique à celle de simulation du champ de rayonnement).</i>
AER.Waref	Longueur d'onde de référence (en µm) pour la simulation des propriétés radiatives des aérosols
AER.AOTref	Epaisseur optique d'extinction des aérosols pour la longueur d'onde de référence
AER.Tronca	Indice de troncature 0 : pas de troncature 1 : application d'une troncature
<i>Aérosols : granulométrie</i>	
AER.Model	Type de modèle d'aérosols 0 : modèle mono-modal 1 : modèle multi-modal de la WMO 2 : modèle bi-modal de Shettle & Fenn 3 : modèle bi-modal de Log-Normale 4 : fonctions de phase de source externe

<h1>CS SI</h1>	<h2>Manuel utilisateur du code des OSD</h2>	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 26 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
----------------	---	--

Si AER.Model = 0 : paramètres de Mie (granulométrie mono-modale)	
AER.MMD.Mie.FileName	Nom du fichier de Mie qui sera stocké sous dirMIE Nom utilisateur ou DEFAULT pour que le code définisse le nom par défaut
AER.MMD.Mie.AlphaMax	Valeur maximale du paramètre de taille
AER.MMD.MRwa	Partie réelle de l'indice de réfraction pour la longueur d'onde de simulation
AER.MMD.MIwa	Partie imaginaire de l'indice de réfraction (valeur négative) pour la longueur d'onde de simulation
Si AER.Waref ≠ SOS.Wa	
AER.MMD.MRwaref	Partie réelle de l'indice de réfraction pour la longueur d'onde de référence
AER.MMD.MIwaref	Partie imaginaire de l'indice de réfraction pour la longueur d'onde de référence
Si AER.Model = 0 : paramètres de la granulométrie mono-modale	
AER.MMD.SDtype	Numéro du modèle 1 : granulométrie Log-Normale 2 : loi de Junge
AER.MMD.SDparam1	Paramètre de la granulométrie Si LND : rayon modal (en µm) Si Junge : rayon minimal (en µm)
AER.MMD.SDparam2	Paramètre de la granulométrie Si LND : log népérien de la variance de la LND Si Junge : puissance appliquée au rayon
Si AER.Model = 1 modèle de la WMO	
AER.WMO.Model	Modèle de la WMO 1 : Continental 2 : Maritime 3 : Urbain 4 : Défini par l'utilisateur
Si AER.WMO.Model = 4 : proportions de l'utilisateur (somme=1)	
AER.WMO.DL	Proportion volumique du composant « Dust-Like » (valeur entre 0 et 1)
AER.WMO.WS	Proportion volumique du composant « Water Soluble » (valeur entre 0 et 1)
AER.WMO.OC	Proportion volumique du composant « Oceanic » (valeur entre 0 et 1)
AER.WMO.SO	Proportion volumique du composant « Soot » (valeur entre 0 et 1)
Si AER.Model = 2 : modèle de Shettle & Fenn	
AER.SF.Model	Modèle de Shettle & Fenn 1 : Troposphérique 2 : Urbain 3 : Maritime 4 : Côtier
AER.SF.RH	Pourcentage d'humidité relative (de 0 à 99%)
Si AER.Model = 3 : modèle bimodal de LND	
AER.BMD.CVdef	Choix du mode de description du mélange 1 : Utilisation de concentrations volumiques prédéfinies 2 : Utilisation du rapport de l'épaisseur optique du mode grossier / épaisseur optique totale
Si AER.BMD.Option= 1 : concentrations volumiques de l'utilisateur	
AER.BMD.CoarseVC	Concentration volumique des particules du mode grossier
AER.BMD.FineVC	Concentration volumique des particules du mode fin

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 27 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

<i>Si AER.BMD.Option= 2 :</i> Utilisation du rapport d'épaisseurs optiques mode grossier / totale	
AER.BMD.RAOT	Rapport de l'épaisseur optique du mode grossier / épaisseur optique totale pour la longueur d'onde de référence.
<i>Paramètres de la LND du mode grossier</i>	
AER.BMD.CM.MRwa	Partie réelle de l'indice de réfraction des particules du mode grossier pour la longueur d'onde de simulation
AER.BMD.CM.MIwa	Partie imaginaire de l'indice de réfraction des particules du mode grossier pour la longueur d'onde de simulation
AER.BMD.CM.SDradius	Rayon modal de la granulométrie LND du mode grossier (en µm)
AER.BMD.CM.SDvar	Log népérien de la variance de la granulométrie LND du mode grossier
<i>Si AER.Waref ≠ SOS.Wa</i>	
AER.BMD.CM.MRwaref	Partie réelle de l'indice de réfraction des particules du mode grossier pour la longueur d'onde de référence
AER.BMD.CM.MIwaref	Partie imaginaire de l'indice de réfraction des particules du mode grossier pour la longueur d'onde de référence
<i>Paramètres de la LND du mode fin</i>	
AER.BMD.FM.MRwa	Partie réelle de l'indice de réfraction des particules du mode fin pour la longueur d'onde de simulation
AER.BMD.FM.MIwa	Partie imaginaire de l'indice de réfraction des particules du mode fin pour la longueur d'onde de simulation
AER.BMD.FM.SDradius	Rayon modal de la granulométrie LND du mode fin (en µm)
AER.BMD.FM.SDvar	Log népérien de la variance de la granulométrie LND du mode fin
<i>Si AER.Waref ≠ SOS.Wa</i>	
AER.BMD.FM.MRwaref	Partie réelle de l'indice de réfraction des particules du mode fin pour la longueur d'onde de référence
AER.BMD.FM.MIwaref	Partie imaginaire de l'indice de réfraction des particules du mode fin pour la longueur d'onde de référence
<i>Si AER.Model = 4 : fonctions de phase de source externe</i>	
AER.ExtData	Nom du fichier des données externes de fonctions de phase (chemin complet)

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 28 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

CONDITIONS DE SURFACE	
SURF.Log	Nom du fichier trace des calculs du programme SURFACE <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
SURF.Alb	Albédo de surface
SURF.Type	Numéro de type de surface 0 : surface lambertienne d'albédo SURF.Alb 1 : surface lambertienne + glitter (mer agitée) 2 : surface lambertienne + réflexion de Fresnel (mer plate) 3 : surface lambertienne + BRDF de Roujean 4 : surface lambertienne + BRDF de Roujean + BPDF du modèle de Rondeaux 5 : surface lambertienne + BRDF de Roujean + BPDF du modèle de Bréon 6 : surface lambertienne + BRDF de Roujean + BPDF du modèle de Nadal
<i>Si SURF.Type = 1 ou ≥ 3</i>	
SURF.File	Nom du fichier de réflexion de surface - Nom utilisateur (arborescence complète). <i>NB : n'exclut pas de définir les paramètres correspondants qui seront utiles pour le calcul analytique de réflexion directe.</i> - DEFAULT pour que le code définisse le nom par défaut
<i>Si SURF.Type ≠ 3: pour tous les modèles, excepté celui de Roujean</i>	
SURF.Ind	Indice de réfraction surface / air
<i>Si SURF.Type = 1 : glitter</i>	
SURF.Glitter.Wind	Vitesse du vent en m/s
<i>Si SURF.Type ≥ 3 : modèle de BRDF de Roujean</i>	
SURF.Roujean.K0	Paramètre k_0 du modèle de Roujean (exprimé en réflectance)
SURF.Roujean.K1	Paramètre k_1 du modèle de Roujean (exprimé en réflectance)
SURF.Roujean.K2	Paramètre k_2 du modèle de Roujean (exprimé en réflectance)
<i>Si SURF.Type = 6 : modèle de BPDF de Nadal</i>	
SURF.Nadal.Alpha	Paramètre α du modèle de Nadal
SURF.Nadal.Beta	Paramètre β du modèle de Nadal

PARAMETRE DE DIFFUSION MOLECULAIRE	
SOS.MDF	Facteur de dépolarisation moléculaire

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 29 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

CONDITIONS DE VISEE	
SOS.View	Indice de type de sortie 1 : plan de visée 2 : diagramme polaire (fichier ascii)
SOS.View.Phi	Azimut relatif (en degrés) Utilisé si SOS.View = 1
SOS.View.Dphi	Pas sur l'azimut en degrés (valeur entière) Utilisé si si SOS.View = 2
CHOIX DU TYPE DE SORTIE	
SOS.OutputLevel	Niveau du profil (optionnel) Si non défini : sortie standard (L_{\uparrow} TOA, L_{\downarrow} sol) n : luminance montante et descendante au niveau n du profil ($0 \leq n \leq \text{SOS_OS_NT}$)
SOS.IGmax	Ordre maximal de diffusion
SOS.Ipolar	Indice de coupure de la polarisation (optionnel) 0 : simulation des OS sans polarisation Si non défini : simulation avec polarisation
NOM DES FICHIERS RESULTATS DES OS	
SOS.Log	Nom du fichier trace SOS : <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
SOS.ResBin	Nom du fichier binaire résultat des OS en décomposition en séries de Fourier
SOS.ResFileUp	Nom du fichier ascii résultat pour le champ montant
SOS.ResFileDown	Nom du fichier ascii résultat pour le champ descendant
SOS.ResFileUp.UserAng	Nom du fichier ascii résultat pour le champ montant, uniquement pour les angles « utilisateur »
SOS.ResFileDown.UserAng	Nom du fichier ascii résultat pour le champ descendant, uniquement pour les angles « utilisateur »

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 30 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

III-2.2 Définition des conditions angulaires

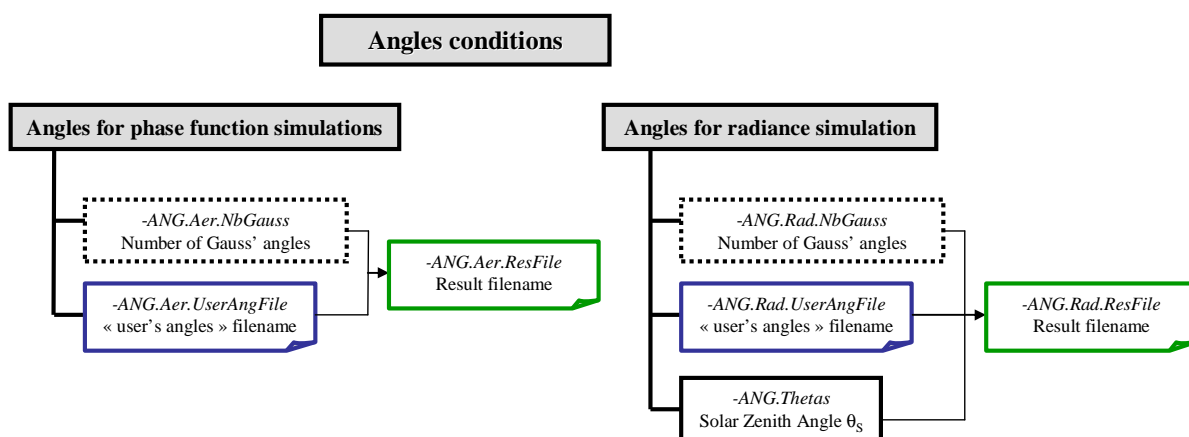
La source de rayonnement provient de l'éclairement solaire. On exprime la hauteur du Soleil en fonction de l'angle zénithal solaire θ_s (degrés) : 0 pour le Soleil au zénith.

La luminance est calculée pour une discrétisation du champ de rayonnement en angles de Gauss. L'utilisateur précise l'ordre de la quadrature qu'il souhaite utiliser : il peut le faire en renseignant le paramètre `-ANG.Rad.NBGauss` dans sa ligne de commande (nombre de μ_G positifs), sinon c'est la valeur `SOS_DEFAULT_NBMU_LUM` définie par défaut dans le fichier `SOS.h` qui est utilisée.

L'utilisateur peut définir une liste d'angles complémentaires pour lesquels il souhaite obtenir la valeur de luminance. Cette liste est définie dans un fichier texte, contenant une valeur d'angle (en degrés) par ligne.

L'utilisateur précise le fichier de résultat à produire. Ce fichier contient les angles à utiliser par le code OSD, ainsi que les ordres limites des développements à appliquer aux traitements (cf. §V-2.1, p. 58).

Il en est de même pour le calcul des propriétés des aérosols.



CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 31 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

III-2.3 Conditions de surface

Le code des OS peut simuler différents modèles de surfaces homogènes : surfaces marines avec ou sans vagues, surfaces terrestres lambertiennes ou à BRDF / BPDF.

III.2.3.a SURFACES MARINES

Une surface marine est caractérisée par un terme lambertien de réflectance diffuse et par un terme directionnel de réflexion spéculaire du rayonnement solaire direct et diffus éclairant la mer. Les propriétés de réflexion de surface sont caractérisées par les lois de Fresnel. Elles dépendent de l'indice de réfraction de l'eau (valeur réelle dans le domaine du visible) et de l'inclinaison des vagues. Le logiciel permet de simuler le cas d'une mer plate (vent nul) et le cas d'une mer agitée pour laquelle la statistique d'inclinaison des vagues est fonction de la vitesse du vent (cas du glitter) [cf. DR5, DR9].

III.2.3.b SURFACES TERRESTRES

Le code des OS simule la réflexion de la lumière sur un sol plat. La réflectance peut être lambertienne ou suivre une loi de réflexion directionnelle en intensité (BRDF) comme en polarisation (BPDF).

Il est possible de simuler la BRDF d'un couvert végétal ou d'un sol nu selon le modèle de Roujean [DR14]. Seuls trois paramètres (k_0 , k_1 , k_2) suffisent à caractériser ce modèle. Ils sont estimés par l'utilisateur en fonction des conditions de surface qu'il souhaite simuler. Ces paramètres tiennent donc compte de la nature de la surface. Leurs valeurs doivent avoir une dimension permettant de simuler une réflectance.

Les modèles de BPDF disponibles sont :

- le modèle de Rondeaux, permettant de simuler la polarisation de la végétation [DR13],
- le modèle de Bréon, adapté pour simuler la polarisation d'un sol nu [DR2],
- le modèle semi-empirique de Nadal [DR12] fonction de deux paramètres α et β .

Nous avons convenu d'exprimer la BRDF associée à ces modèles par le modèle de Roujean (BRDF additionnée au terme d'intensité de la matrice de réflexion en polarisation).

Ces modèles nécessitent de connaître l'indice de réfraction du dioptré surface / air pour le calcul de la réflexion de Fresnel.

L'utilisateur est invité à se reporter au chapitre IX- pour une complète description des modèles de BRDF et BPDF simulés.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 32 EDIT. : 04 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

III.2.3.c FICHIERS DES MATRICES DE REFLEXION DE SURFACE

Le calcul d'une matrice de réflexion de surface est réalisé selon un formalisme propre au fonctionnement du code des OS (voir en section IX-1.3). Ce calcul peut être coûteux en temps de calcul et redondant d'une simulation à l'autre. Aussi, il a été choisi de conserver les matrices de réflexion de surface simulées plutôt que de les calculer systématiquement. Les fichiers correspondant sont enregistrés sous une arborescence définie par l'utilisateur dans le fichier runOS.ksh.

Le programme SOS_SURFACE génère les matrices de réflexion des modèles. Dans le cas d'une simulation de BRDF / BPDF, l'utilisateur peut préciser le nom du fichier SURFACE résultat de l'appel du programme. Il peut également laisser le logiciel définir automatiquement le nom de ce fichier en saisissant DEFAULT en place de la variable. Le nom du fichier sera alors fonction des paramètres de simulation. Par exemple, dans le cas d'une simulation du glitter le nom du fichier sera fonction de l'indice de l'eau, de la vitesse du vent et des angles de visée utilisés, sous la forme « **GLITTER**-indice-vent-MU_{nnn}-ficUser ». Pour un indice de 1.5, un vent de 12.5 m.s⁻¹ et en travaillant avec 24 angles de Gauss complétés par les angles d'un fichier utilisateur nommé « MesAngles » (indépendamment de sa localisation), le nom du fichier créé sera « GLITTER-1.500-12.5-MU24-MesAngles ». Le logiciel contrôlera si ce fichier existe déjà et, le cas échéant, il n'exécutera pas à nouveau les calculs de préparation de la matrice de réflexion.

Avertissements :

- Bien que corrélées, les valeurs des paramètres physiques des surfaces et de la longueur d'onde de simulation sont saisies dans le fichier runOS.ksh indépendamment les unes des autres. L'utilisateur doit veiller à leur cohérence physique.
- Une modification du contenu du fichier des « angles utilisateur », sans changement de son nom, n'entraînera pas un nouveau calcul du fichier SURFACE. Il convient d'utiliser des dénominations différentes pour les fichiers d'angles modifiés ou de supprimer les fichiers SURFACE existants, pour éviter des erreurs de simulations.
- Dans le cas où un fichier d'« angles utilisateur » est utilisé, le nom d'un fichier SURFACE généré automatiquement ne renseigne que sur le nom du fichier d'« angles utilisateur » utilisé, et non pas sur le répertoire où il se localise. Il est donc recommandé de n'avoir qu'un espace contenant les fichiers d'« angles utilisateurs » et/ou de respecter une nomenclature unique par fichier.

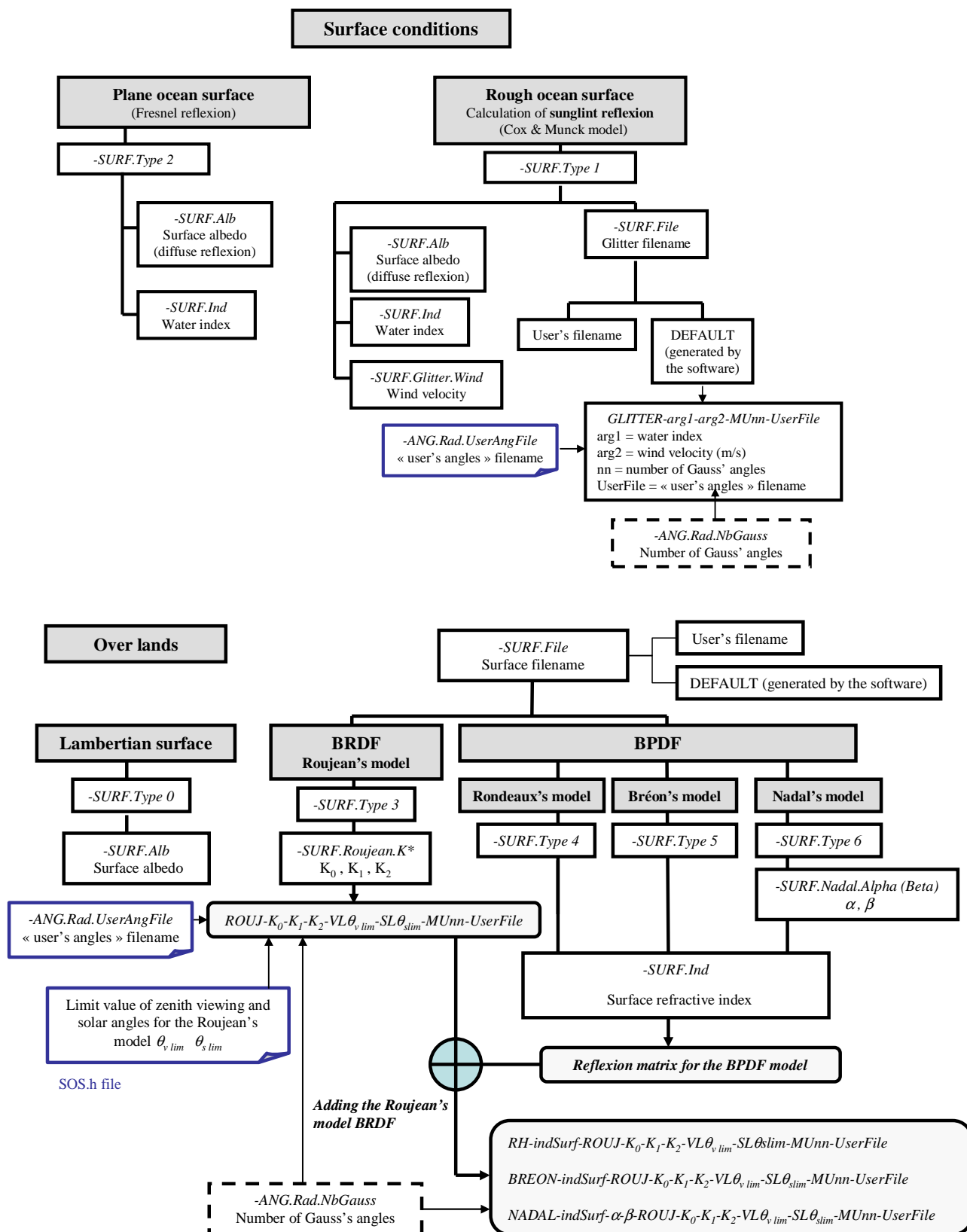
Tableau 2 : Format des paramètres relatifs à la nomenclature des fichiers SURFACE

Paramètre	Valeurs limites	Dernier chiffre significatif	Format associé
Vitesse du vent	< 100 m.s ⁻¹	Précision à 10 ⁻¹ près	F4.1
Indice de surface		Précision à 10 ⁻³ près	F5.3
K ₀ , K ₁ , K ₂ du modèle de Roujean		Précision à 10 ⁻³ près	F7.3
α du modèle de Nadal		Précision à 10 ⁻⁴ près	F6.4
β du modèle de Nadal		Précision à 10 ⁻¹ près	F4.1

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 33 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Tableau 3 : Format des paramètres relatifs à la nomenclature des fichiers SURFACE

Type de surface	Nom associé
Modèle de Roujean	ROUJ-k0-k1-k2-VL-SL-MU nnn -ficUser NB : VL, SL sont des constantes du fichier SOS.h (angles de visée et solaire limites). nnn : nombre d'angles de Gauss ficUser : nom du fichier des « angles utilisateur » (optionnel) Ex : ROUJ-000.243-000.073-000.642-VL60-SL60-MU24
Modèle de Rondeaux	RH-indSurf-ROUJ-k0-k1-k2-VL-SL-MU nnn -ficUser Ex : RH-1.500-ROUJ-000.243-000.073-000.642-VL60-SL60-MU24
Modèle de Bréon	BREON-indSurf-ROUJ-k0-k1-k2-VL-SL-MU nnn -ficUser Ex : BREON-1.500-ROUJ-000.243-000.073-000.642-VL60-SL60-MU24
Modèle de Nadal	NADAL-indSurf-α-β-ROUJ-k0-k1-k2-VL-SL-MU nnn -ficUser Ex : NADAL-1.500-0.0229-38.0-ROUJ-000.243-000.073-000.642-VL60-SL60-MU24



CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 35 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

III-2.4 Conditions atmosphériques

Le code des Ordres Successifs de Diffusion calcule la propagation de la lumière dans une atmosphère diffusante, par ciel clair. Les constituants atmosphériques considérés sont les molécules et les aérosols. Il n'y a pas de prise en compte d'absorption gazeuse.

III.2.4.a DIFFUSION MOLECULAIRE

La diffusion moléculaire dépend du profil de la pression atmosphérique et de la longueur d'onde considérée. Plutôt qu'un calcul de l'épaisseur optique moléculaire par le logiciel, pour une pression et une longueur d'onde données, l'utilisateur est libre de la saisir (épaisseur optique moléculaire intégrée sur une colonne verticale). Il peut ainsi simuler le rayonnement intrinsèque d'une couche d'aérosols en supprimant la composante moléculaire avec une épaisseur optique nulle.

Le profil de pression est estimé par une décroissance exponentielle en $\exp(-z / h_m)$, caractérisée par une échelle de hauteur h_m (6 à 8 km). Les propriétés de la diffusion moléculaire sont bien connues et sont inscrites dans le code. On prend en compte l'anisotropie des molécules par un facteur de dépolariation [DR9]. Sa valeur proposée par défaut est de 0,0279.

L'épaisseur optique moléculaire peut être estimée selon le formalisme classique de Hansen & Travis [DR8] au niveau de la surface sous une pression atmosphérique standard de 1013 mb :

$$\tau_m = \left(\frac{84,35}{\lambda^4} + \frac{-1,225}{\lambda^5} + \frac{1,4}{\lambda^6} \right) \times 10^{-4} \text{ pour } \lambda \text{ en } \mu\text{m} \quad (1)$$

Une formulation plus récente de Bodhaine et al. [DR1], prenant en compte l'augmentation du taux de gaz carbonique, pourrait être préférée.

III.2.4.b DIFFUSION ET ABSORPTION DES AEROSOLS

• Profil vertical des aérosols :

Le profil vertical des aérosols peut être caractérisé par une décroissance exponentielle de l'épaisseur optique en $\exp(-z / h_a)$, avec une échelle de hauteur h_a typiquement de l'ordre de 2 km. L'utilisateur peut aussi simuler une couche d'aérosols entre deux couches purement moléculaires (mélange homogène de molécules et d'aérosols). L'épaisseur optique totale des aérosols, τ_a , dépend du type et de l'abondance des particules, pour la longueur d'onde λ . Sa valeur est fixée librement par l'utilisateur. Il est ainsi possible de simuler la diffusion moléculaire pure en prenant $\tau_a = 0$.

• Modèle d'aérosols :

La définition des propriétés radiatives des aérosols peut se faire des façons suivantes :

- L'utilisateur peut sélectionner un type de modèle : il est possible de simuler des granulométries mono-modales (loi log-normale ou de Junge) ainsi que des modèles plus complexes comme des

Mode opératoire

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 36 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

distributions bimodales ou les modèles prédéfinis de la WMO [DR19] et de Shettle & Fenn [DR15] (modèles continentaux, urbains, maritime, côtier, avec une prise en compte de l'humidité relative de l'air).

- L'utilisateur peut utiliser un fichier de fonctions de phase externes, ce qui donne la possibilité de simuler la diffusion de particules non sphériques (à orientation aléatoire, de sorte à respecter la symétrie du champ de rayonnement par rapport au plan principal solaire). Le format de ce fichier est précisé en section VII-8.1, p.140.
- L'utilisateur peut également réutiliser un fichier résultat d'un traitement antérieur du programme SOS_AEROSOLS (donnant les coefficients de diffusion et d'extinction, et les coefficients de la décomposition de la matrice de phase). Son format est précisé en section VII-2.2, p.98.

Les propriétés radiatives d'un type d'aérosols sont calculées pour une granulométrie $N(r)$, à une longueur d'onde λ donnée. Les aérosols sont considérés sphériques et de composition homogène. Leur nature chimique est définie par l'indice de réfraction $m = m_r + i.m_i$ ($m_i \leq 0$ exprime l'absorption des particules).

La théorie de Mie permet d'estimer les propriétés radiatives d'une particule sphérique de rayon r et d'indice m , pour un rayonnement incident de longueur d'onde λ . Les calculs de Mie sont réalisés en fonction du paramètre de taille $\alpha = 2.\pi.r / \lambda$, entre les valeurs α_{\min} et α_{\max} . Les résultats de ces calculs sont ensuite appliqués à la granulométrie $N(r)$, de sorte à estimer les propriétés radiatives à l'échelle macroscopique sur la distribution de particules et pour la longueur d'onde considérée.

Les calculs de Mie sont coûteux en temps de traitements. Aussi, les résultats de ces calculs sont stockés sous forme de fichiers sous un répertoire précisé par l'utilisateur. Si le fichier de Mie a déjà été créé, il est reconnu par son nom et n'est pas recalculé. Dans le cas de la simulation d'une granulométrie d'aérosols mono-modale, l'utilisateur peut préciser le nom du fichier MIE résultat des traitements du programme SOS_AEROSOLS, ou peut laisser le logiciel définir automatiquement le nom de ce fichier en saisissant DEFAULT. Si l'utilisateur simule un modèle bi-modal ou un modèle multi-modal de la WMO [DR19] ou de Shettle & Fenn [DR15], la nomenclature des fichiers de Mie générés est définie automatiquement par le logiciel. Le nom des fichiers de Mie sera alors fonction de l'indice de réfraction, des paramètres de taille limites, du nombre d'angles de Gauss utilisé (nnn) et éventuellement du nom du fichier d'« angles utilisateur » ($ficUser$ sans son arborescence), sous la forme **MIE- m_r - $|m_i|$ - α_{\min} - α_{\max} -MU nnn - $ficUser$** . La précision associée à chaque argument est donnée dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Format des paramètres relatifs à la nomenclature des fichiers de MIE

Paramètre	Valeurs limites	Précision	Format	Argument pour le nom du fichier
m_r		à 10^{-3} près	F5.3	x.xxx (ex : $m_r=1.53 \Rightarrow 1.530$)
m_i	grandeur négative	à 10^{-5} près	F8.5	x.xxxxx (ex : $m_i=-0.008 \Rightarrow 0.002800$)
α_{\min}	$10^{-4} < \alpha_{\min} < 10$	à 10^{-4} près	F6.4	x.xxxx (ex : $\alpha_{\min} = 0.0001 \Rightarrow 0.0001$)
α_{\max}	$10^{-2} < \alpha_{\max} < 10^5$	à 10^{-2} près	F9.2	xxxxx.xx (ex : $\alpha_{\max} = 500 \Rightarrow 00500.00$)

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 37 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Par exemple, pour un indice $m = 1,53 - i \times 0,008$ et un calcul de $\alpha_{\min} = 0,0001$ à $\alpha_{\max} = 500$, en utilisant 40 angles de Gauss, le fichier créé sera nommé : « MIE-1.530-0.00800-0.0001-00500.00-MU40 ».

Avertissements :

- La valeur de l'épaisseur optique des molécules étant saisie dans le fichier runOS.ksh, l'utilisateur doit veiller à sa cohérence par rapport à la longueur d'onde de simulation.
- Une modification du contenu du fichier des « angles utilisateur », sans changement de son nom, n'entraînera pas un nouveau calcul du fichier de MIE. Il convient d'utiliser des dénominations différentes pour les fichiers d'angles modifiés ou de supprimer les fichiers de MIE existants, pour éviter des erreurs de simulations.
- Dans le cas où un fichier d'« angles utilisateur » est utilisé, le nom d'un fichier de MIE généré automatiquement ne renseigne que sur le nom du fichier d'« angles utilisateur » utilisé, et non pas sur le répertoire où il se localise. Il est donc recommandé de n'avoir qu'un espace contenant les fichiers d'« angles utilisateurs » et/ou de respecter une nomenclature unique par fichier.

•Renseignement des informations sur les aérosols pour une longueur d'onde de référence :

L'utilisateur renseigne les propriétés des aérosols :

- pour une longueur d'onde de référence :
 - L'épaisseur optique d'extinction des aérosols.
 - L'indice de réfraction (partie réelle et imaginaire) de chaque mode de particules.
- pour la longueur d'onde de simulation du champ de rayonnement :
 - L'indice de réfraction (partie réelle et imaginaire) de chaque mode de particules.

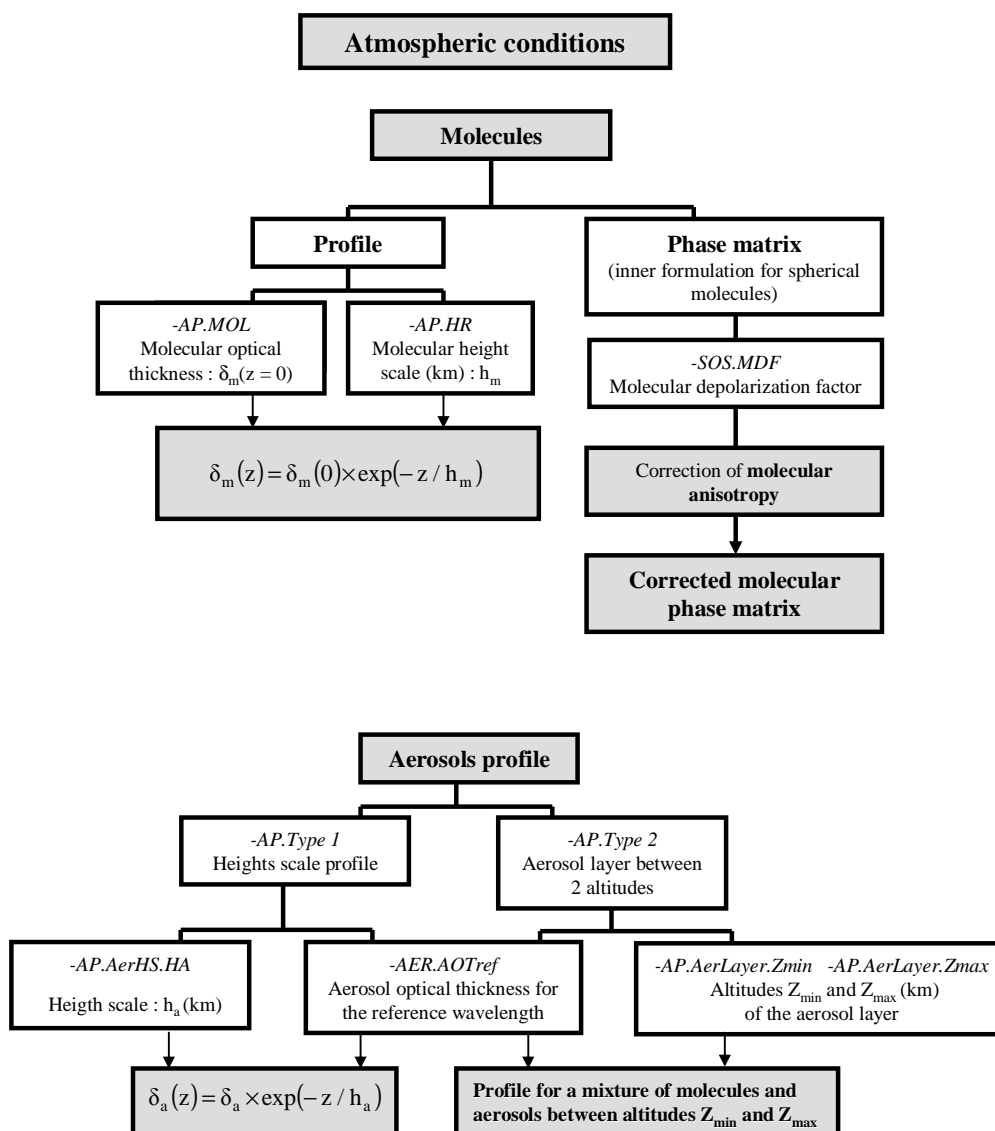
Le logiciel calcule les coefficients d'extinction du modèle pour la longueur d'onde de référence et pour la longueur d'onde de simulation du champ de rayonnement. Il en déduit l'épaisseur optique aérosols pour la longueur d'onde de simulation.

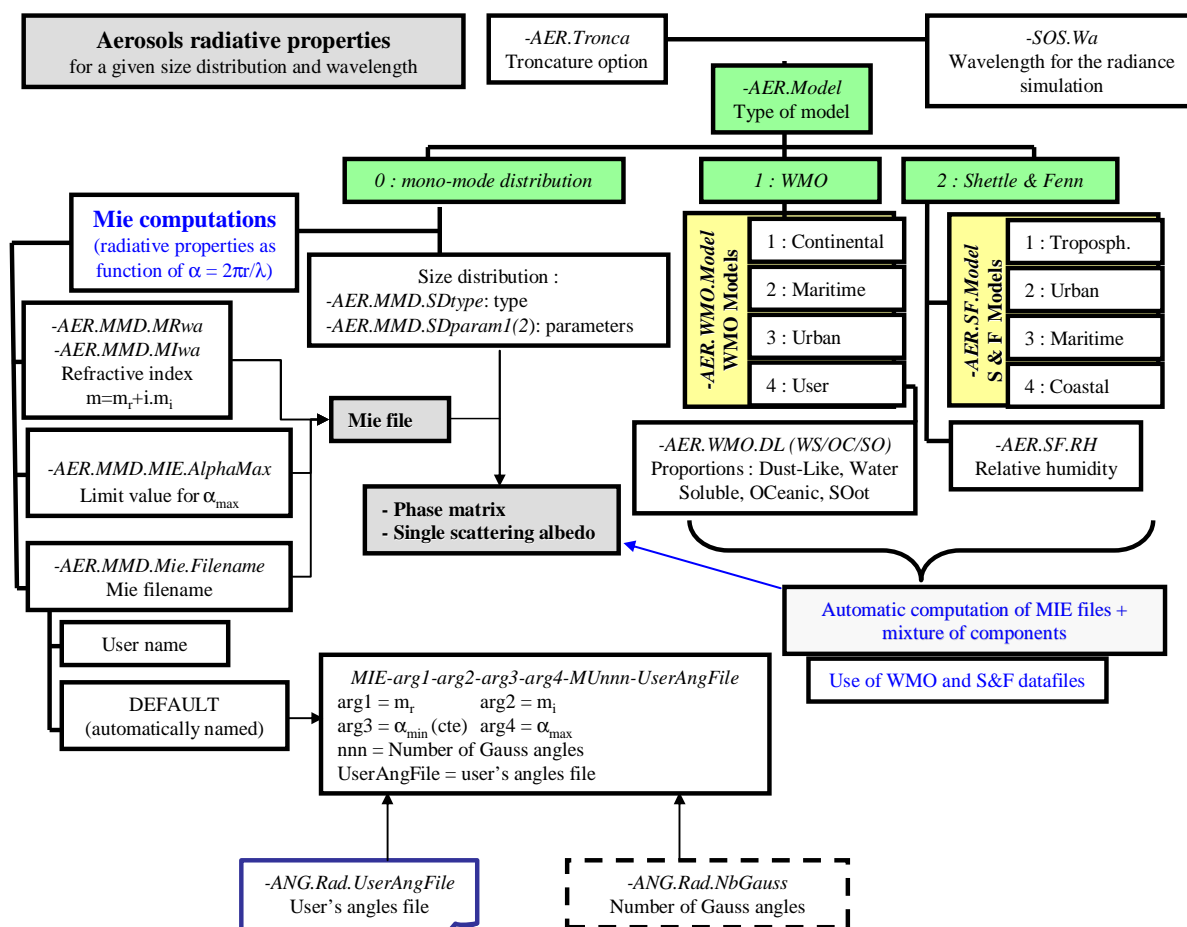
•Troncature de la fonction de phase des aérosols :

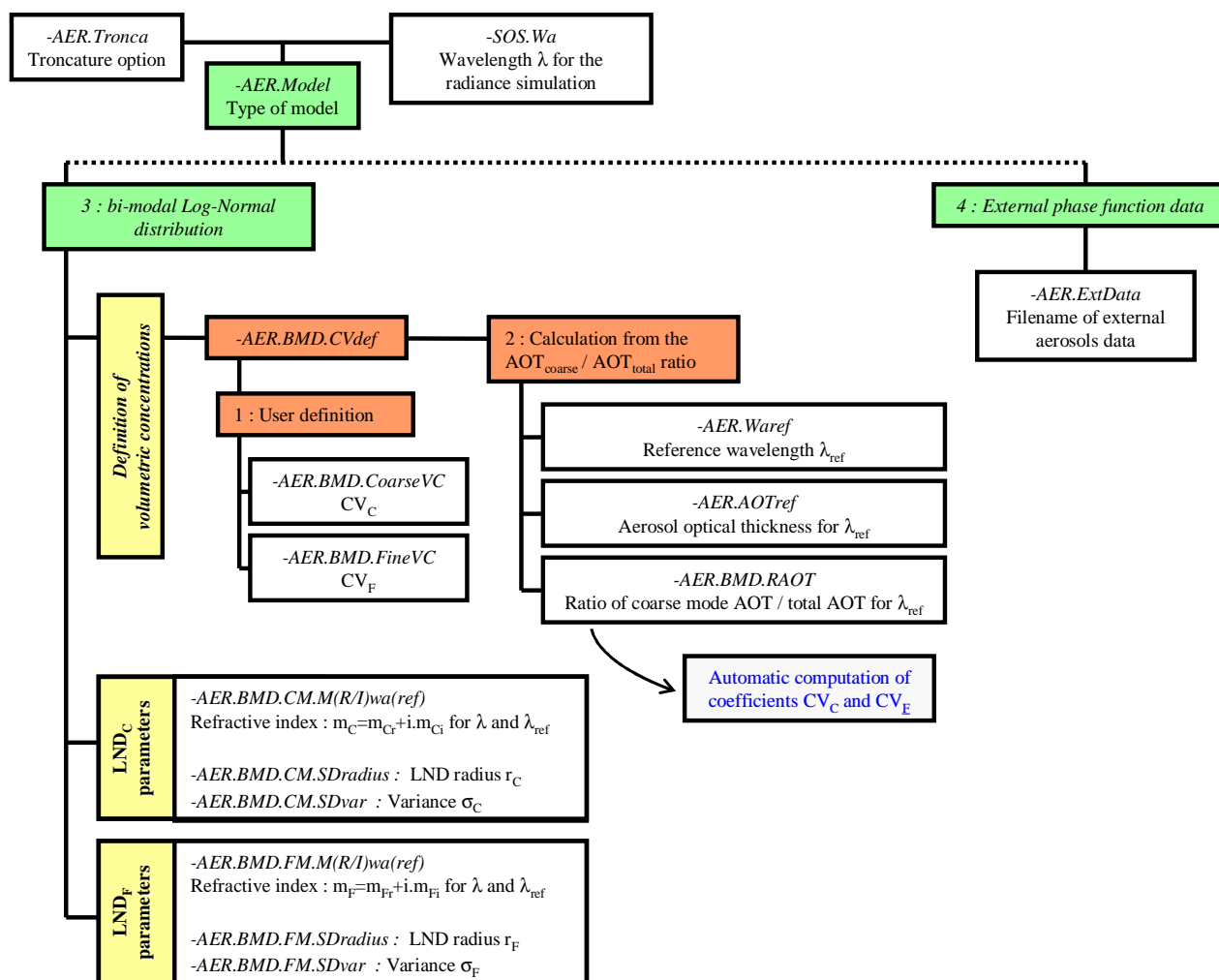
Quand les particules diffusantes sont grandes, la majeure partie de la diffusion se produit vers l'avant, dans un cône d'ouverture de quelques degrés. Cette forte anisotropie de la diffusion complique le développement mathématique de la fonction de phase. Physiquement, le rayonnement diffusé vers l'avant n'est pas dissociable du rayonnement transmis. Il est possible de supposer que cette énergie diffusée à petits angles est en fait une énergie transmise. La fonction de phase peut ainsi être tronquée de sa valeur pour les petits angles de diffusion, ce qui permet de réduire la taille des développements nécessaires à son expression et donc de réduire les temps de calculs. Cette troncature de la fonction de phase modifie la répartition de l'énergie. Les

autres paramètres radiatifs décrivant la couche atmosphérique doivent alors être ajustés pour que les propriétés radiatives globales restent inchangées.

Il est fortement recommandé à l'utilisateur de demander systématiquement la réalisation d'une troncature. Les grandeurs physiques saisies dans le fichier runOS.ksh ne doivent pas être tronquées. Le logiciel applique lui-même une troncature à la fonction de phase et ajuste les différents paramètres radiatifs. Les résultats en sortie de code sont équivalents à ceux qu'on devrait obtenir en absence de troncature. Par contre, les calculs sans troncature nécessiteraient un développement beaucoup plus grand des fonctions radiatives des aérosols et seraient par conséquent nettement moins rapides.







<p>CS SI</p>	<p>Manuel utilisateur du code des OSD</p>	<p>Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 41 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017</p>
---------------------	--	---

III-2.5 Type de sortie

- Le résultat d'une simulation est un **champ diffus de luminance normalisée** par l'éclairement solaire. Nommons L^* la luminance et E_s l'éclairement solaire, la luminance normalisée est : $L = \pi \times L^* / E_s$ (la réflectance est $\rho = L / \cos \theta_s$).

- Niveau dans le profil atmosphérique du champ de luminance normalisée :**

Ce champ de luminance normalisée est calculé par le code pour une gamme de niveaux du profil atmosphérique. En résultat des traitements, on obtient un champ émergeant et un champ descendant pour le niveau que l'on souhaite. L'utilisateur doit ainsi préciser :

- Le niveau de sortie du champ de luminance :
 - Saisir `SOS.OutputLevel = -1` pour une sortie du champ émergeant au sommet de l'atmosphère (TOA) et du champ incident au sol,
 - Saisir `SOS.OutputLevel = n` avec $0 \leq n \leq \text{SOS_OS_NT}$ pour une sortie au niveau n : 0 pour le TOA, `SOS_OS_NT` pour le sol (constante du fichier `SOS.h`),
- Le nom des fichiers résultats :
 - fichier pour le champ montant.
 - fichier pour le champ descendant.

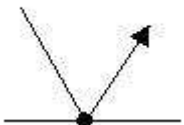
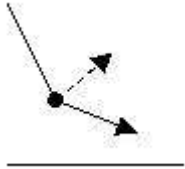
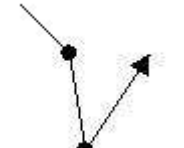
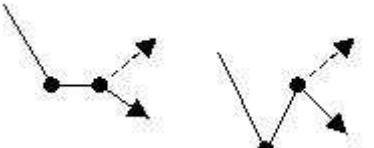
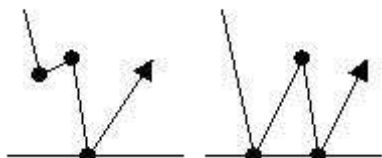
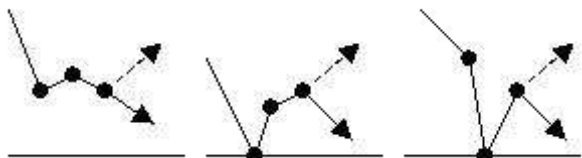
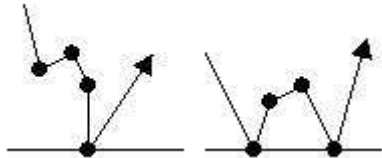
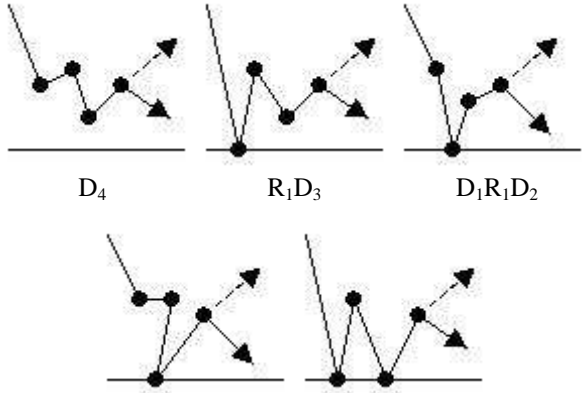
- Coupure de la polarisation :**

Le code des Ordres Successifs permet de simuler la polarisation de la lumière. Il est cependant possible de réaliser une simulation sans prise en compte de la polarisation. La coupure de la polarisation n'est appliquée que dans le suivi de la propagation du rayonnement par le code des OS, mais ne modifie pas les fichiers de MIE ou de BPDF de surface produits.

- Ordre maximal d'interaction**

Le code des OS, comme son nom l'indique, suit les ordres successifs d'interaction (diffusions et réflexions). Il est possible de préciser l'ordre maximal « `SOS.IGmax` » pour lequel on souhaite arrêter les calculs. En fonctionnement normal, le logiciel détermine lui-même l'ordre à partir duquel les diffusions suivantes deviennent insignifiantes. Typiquement, on observe une convergence dès quelques diffusions, pour une valeur usuelle de l'épaisseur optique des aérosols. On peut alors poser `SOS.IGmax > 20`, par exemple, pour laisser le code s'arrêter automatiquement. Par contre, il est possible de suivre les interactions successives en posant `SOS.IGmax = 1, 2, 3 ...`. Le tableau 5 schématise les premiers ordres d'interaction.

Tableau 5 : termes d'ordre I_g calculés par le code des OSD. La colonne de gauche schématise la luminance montante au niveau du sol, celle de droite la luminance descendante. Au TOA, on retrouve le terme de réflexion de surface (colonne de gauche) atténué et le terme de diffusion atmosphérique (colonne de droite) mais pour une diffusion vers le haut.

I_g	Lumière montante au sol	Lumière descendante au sol ou montante au TOA
1	 R_1	 D_1
2	 D_1R_1	 D_2 R_1D_1
3	 D_2R_1 $R_1D_1R_1$	 D_3 R_1D_2 $D_1R_1D_1$
4	 D_3R_1 $R_1D_2R_1$	 D_4 R_1D_3 $D_1R_1D_2$ $D_2R_1D_1$ $R_1D_1R_1D_1$

• **Transmissions :**

A la demande de l'utilisateur, le code des OSD fournit les transmissions correspondant à l'atmosphère simulée (pour son épaisseur optique vraie, et non pas pour celle associée à la troncature de la fonction de phase des aérosols) :

- Transmission directe du TOA au sol pour l'incidence solaire.
- Transmission diffuses du TOA au sol pour l'incidence solaire.
- Transmission diffuses du sol au TOA pour l'ensemble des angles de visée.

• **Conditions de visée :**

Les calculs du code des OSD sont établis pour l'ensemble des angles de Gauss et des angles complémentaires de la liste optionnelle définie par l'utilisateur. Le champ de luminance est fourni pour l'ensemble des angles comme pour uniquement les angles de la liste de l'utilisateur (option).

La décomposition en séries de Fourier par rapport à l'azimut relatif entre la direction d'éclairement et de visée, permet de restituer la luminance simulée pour toute direction azimutale. L'utilisateur a la possibilité de demander la sortie des luminances simulées dans un plan azimutal donné ou pour un ensemble de directions azimutales.

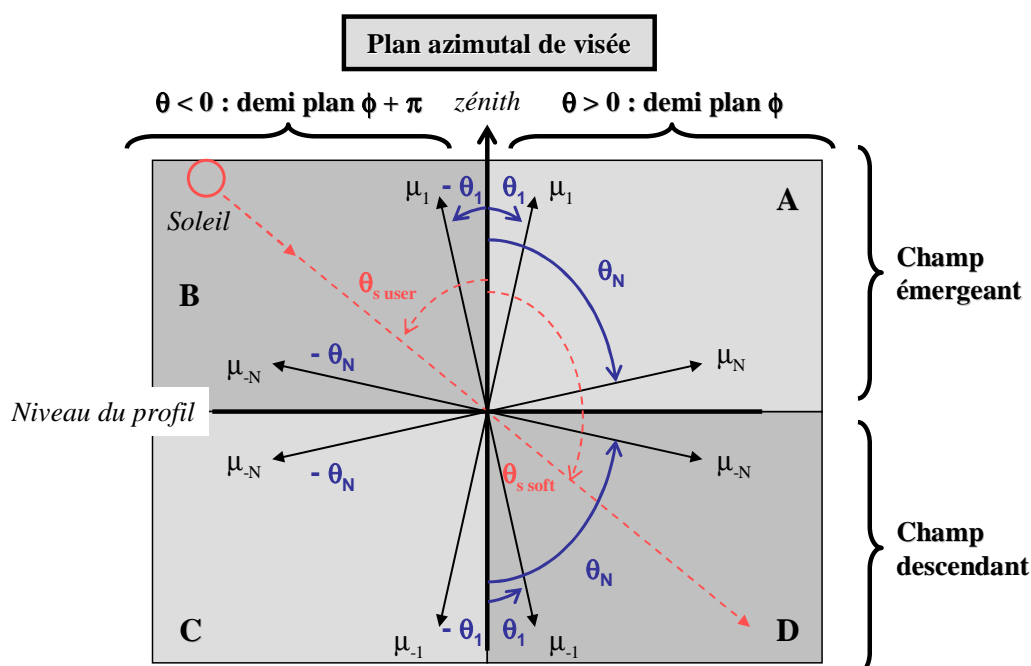
Cas 1 : Sortie d'un plan de visée

Si l'utilisateur souhaite obtenir une sortie pour un plan azimutal fixé, il renseigne l'option correspondante (SOS.View = 1) et fixe la valeur de l'angle azimutal relatif ϕ .

Les fichiers de sortie donnent la luminance normalisée correspondante aux angles du fichier de Gauss utilisé.

Convention :

- Signe des angles :
 - L'angle de visée est positif dans le demi-plan d'azimut relatif ϕ .
 - Il est négatif dans le demi-plan $\phi + \pi$.
- Valeur des angles :
 - Pour le champ émergent, l'angle de visée est nul pour une visée au zénith.
 - Pour le champ descendant, l'angle de visée est nul pour une visée au nadir.
 - L'angle de visée vaut $\pm 90^\circ$ au limbe.

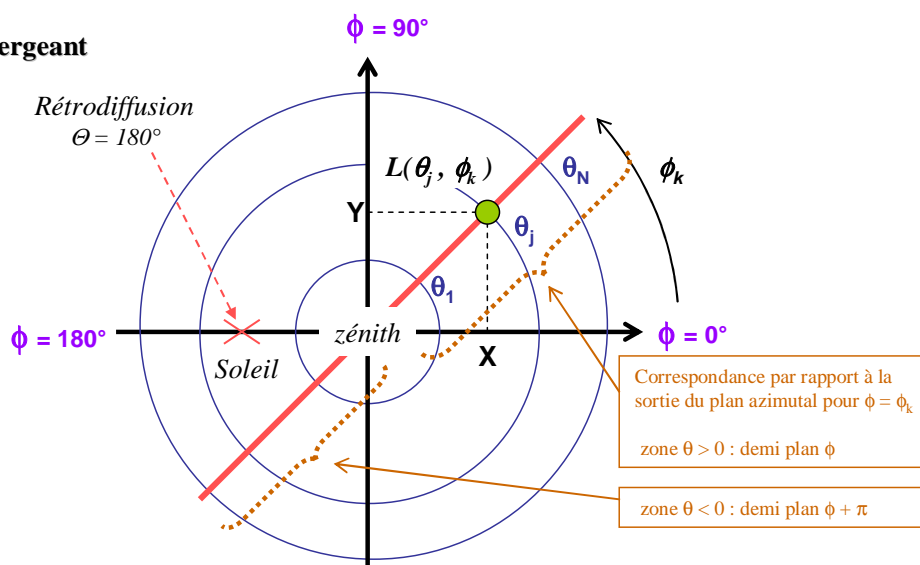
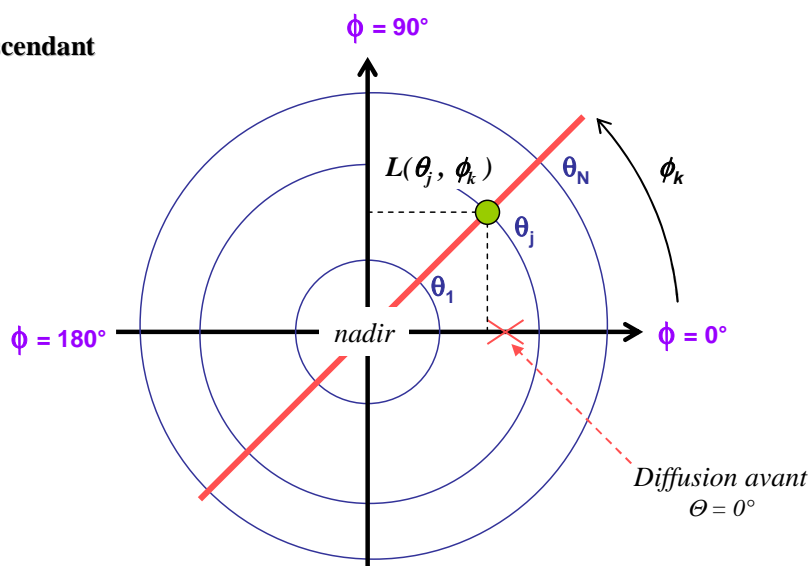


Cas 2 : Sortie pour un ensemble de directions azimutales

Il est possible d'obtenir une sortie complète du champ émergent et descendant pour le niveau du profil sélectionné (SOS.View = 2). Il faut préciser le pas en azimutal de l'échantillonnage : $\Delta\phi$ en valeur entière.

Les fichiers de sortie contiennent cinq colonnes :

- 1^{er} colonne : $X = \phi$
- 2nde colonne : $Y = \theta_v > 0$ (angle zénithal non signé pour le champ montant, angle défini par rapport au nadir pour le champ descendant).
- 3^{ème} à 5^{ème} colonne : $Z_I = I(\theta_v, \phi)$ $Z_Q = Q(\theta_v, \phi)$ $Z_U = U(\theta_v, \phi)$

Visualisation du champ de rayonnement**Champ émergent****Champ descendant**

<p>CS SI</p>	<p>Manuel utilisateur du code des OSD</p>	<p>Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 45 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017</p>
---------------------	--	---

III-2.6 Définition des fichiers de sortie

Le logiciel génère plusieurs types de fichiers :

- **Fichiers formant une « base de données »** (pour le choix d'une gestion automatique des noms des fichiers) dont l'utilisateur précise l'arborescence de stockage de ces fichiers :
 - Fichiers contenant le développement en séries de Fourier des matrices de réflexion,
 - Fichiers des calculs de MIE.
- **Fichiers temporaires** qui sont automatiquement détruits en fin de traitement :
 - Fichier « RES_FRESNEL » : décomposition en séries de Fourier de la matrice de Fresnel,
 - Fichier « RES_GSF » : décomposition en séries de Fourier de la fonction G caractéristique du modèle de surface, pondérant la matrice de Fresnel,
 - Fichier « RES_MAT_REFLEX » : décomposition en séries de Fourier de la matrice de réflexion de surface,
 - Fichiers « *_BPDF » : fichier de BPDF avant l'ajout de la BRDF de Roujean.
- **Fichiers d'entrée des OS, propres à une simulation** (écrasés à chaque nouvelle simulation) :
 - Fichier des angles et ordres de développement utilisés par les codes,
 - Fichier de profil atmosphérique de l'épaisseur optique,
 - Fichier descriptif des propriétés radiatives du modèle d'aérosols.
- **Fichiers de sorties des OS** : Résultat final d'une simulation du logiciel.
 - Fichier binaire du champ polarisé émergeant et descendant décomposé en séries de Fourier,
 - Fichier Ascii du champ émergeant, pour tous les angles ou uniquement les « angles utilisateur »,
 - Fichier Ascii du champ descendant, pour tous les angles ou uniquement les « angles utilisateur ».
 - Fichier Ascii des transmissions directes et diffuses.
- **Fichiers Trace des traitements** qui permettent d'avoir une information sur les traitements réalisés par chaque programme. Ces fichiers peuvent être volumineux, aussi il est recommandé de ne pas les générer sans un besoin spécifique.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 46 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
-------	------------------------------------	--

III-2.7 Exemple de fichier de lancement : Simulation sur océan

Supposons vouloir simuler la réflexion du glitter à 440 nm, pour un vent de 2 m.s⁻¹, sur une mer d'albédo de 0,02 dont l'indice de l'eau vaut 1,34. L'atmosphère est supposée légèrement turbide avec une présence d'aérosols d'épaisseur optique de 0,05 à 550-nm, d'indice 1,4 (non absorbant) à 440 nm et 1,45 à 550 nm, de granulométrie Log-Normale (de rayon modal r_m valant 0,3 μ m et de variance σ dont $|\ln(\sigma)| = 0,4$). On appliquera une troncature à la fonction de phase. La couche d'aérosols sera étendue de la surface au TOA avec une décroissance exponentielle de l'épaisseur optique. L'épaisseur optique moléculaire vaut 0,23 à 440 nm. L'angle zénithal solaire est de 30°. On souhaite produire un champ de luminance global du rayonnement émergeant au TOA et éclairant la surface, par pas de 5 degrés en azimuth relatif. On souhaite obtenir les valeurs de transmissions.

```

$RACINE/exe/main_SOS.ksh -SOS.Wa 0.440 \
-ANG.Rad.NbGauss 24 -ANG.Rad.ResFile ${dirRESULTS}/SOS_UsedAngles.txt \
-ANG.Aer.NbGauss 40 -ANG.Aer.ResFile ${dirRESULTS}/AER_UsedAngles.txt \
-ANG.Log ${dirLOG}/Angles.Log \
-ANG.Thetas 30. -SOS.View 2 -SOS.View.Dphi 5 \
-SOS.IGmax 30 \
-SOS.ResFileUp ${dirRESULTS}/SOS_Up.txt -SOS.ResFileDown ${dirRESULTS}/SOS_Down.txt \
-SOS.ResBin ${dirRESULTS}/SOS_Result.bin \
-SOS.Log ${dirLOG}/SOS.Log \
-SOS.Config ${dirRESULTS}/SOS_config.txt \
-SOS.Trans ${dirRESULTS}/SOS_transm.txt \
-AP.ResFile ${dirRESULTS}/Profile.txt -AP.Log ${dirLOG}/Profile.Log \
-AP.MOT 0.230 -SOS.MDF 0.0279 \
-AP.Type 1 -AP.HR 8.0 -AP.AerHS.HA 2.0 \
-AER.Waref 0.550 -AER.AOTref 0.05 \
-AER.ResFile ${dirRESULTS}/Aerosols.txt -AER.Log ${dirLOG}/Aerosols.Log -AER.MieLog 0 \
-AER.Tronca 1 -AER.Model 0 \
-AER.MMD.Mie.AlphaMax 300 -AER.MMD.MRwa 1.4 -AER.MMD.MIwa 0. \
-AER.MMD.MRwaref 1.45 -AER.MMD.MIwaref 0. \
-AER.MMD.SDtype 1 -AER.MMD.SDparam1 0.3 -AER.MMD.SDparam2 0.4 \
-SURF.Log ${dirLOG}/Surface.Log -SURF.File DEFAULT \
-SURF.Type 1 -SURF.Alb 0.02 -SURF.Ind 1.34 \
-SURF.Glitter.Wind 2.0

```

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 47 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

III-3 Constantes de simulation

III-3.1 Liste des constantes du fichier SOS.h

Associés aux paramètres de simulation que nous venons de voir, nous avons également besoin de définir des paramètres intervenant dans le mode de calcul du code. Ils se distinguent en un ensemble de constantes dimensionnant la taille des tableaux utilisés dans les calculs et en des valeurs seuils nécessaires pour les tests d'arrêt du code. Ces paramètres sont introduits dans le code à la compilation par l'attribution des valeurs aux constantes, par le biais d'un fichier **SOS.h** d'inclusions (sous \$RACINE/inc). Leur modification demande une bonne connaissance du fonctionnement du logiciel.

Avertissement : Une modification de la valeur d'une constante ne sera prise en compte par le logiciel que s'il est recompilé.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 48 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Tableau 6 : constantes du logiciel

Constantes		SOS.h
Nom	Description	Par défaut
1) Constantes communes aux différents programmes		
SOS_LENDIR	Longueur des chaînes de caractères relatives aux noms des répertoires.	150
SOS_LENFIG1	Longueur des chaînes de caractères relatives aux noms des fichiers (sans arborescence).	150
SOS_LENFIG2	Longueur des chaînes de caractères relatives aux noms des fichiers (avec arborescence).	300
SOS_LENKEYWORD	Taille maximale des Keywords pour le passage des arguments	30
SOS_PI	Valeur de π	3.14159265358
2) Constantes spécifiques aux routines du programme SOS_AEROSOLS		
SOS_MIE_DIM	Dimension des tableaux pour le calcul sur n des fonctions de Ricatti-Bessel (ψ_n , χ_n), des fonctions dérivées (D_n et G_n) et des coefficients A_n et B_n . (SOS_MIE)	10000 (pour un calcul jusqu'à $\alpha_{\max} \approx 4990$)
SOS_MAXNB_ANG_EXT	Taille maximale des tableaux de fonctions de phase externes (SOS_AEROSOLS)	200
SOS_MIE_ALPHAMIN	Valeur minimale du paramètre de taille Alpha des calculs de MIE. Doit être comprise entre 0,0001 et 10. NB : Impérativement en double précision. (SOS_AEROSOLS)	0.0001D+00
SOS_ALPHAMAX_WMO_DL	Valeur limite du paramètre de taille pour les calculs de Mie du constituant WMO « Dust-Like ». (SOS_AEROSOLS)	4000
SOS_ALPHAMAX_WMO_WS	Idem pour le constituant WMO « Water Soluble ».	50
SOS_ALPHAMAX_WMO_OC	Idem pour le constituant WMO « Oceanic ».	800
SOS_ALPHAMAX_WMO_SO	Idem pour le constituant WMO « Soot ».	10
SOS_ALPHAMAX_SF_SR	Idem pour le constituant Shettle & Fenn « Small Rural ».	70
SOS_ALPHAMAX_SF_SU	Idem pour le constituant Shettle & Fenn « Small Urban ».	90
SOS_COEF_NRMAX	Valeur minimale du rapport de granulométries $n(r) / N_{\max}$ pour la détermination du paramètre de taille limite utile aux calculs de Mie. (SOS_AEROSOLS)	0.0001
SOS_AER_DATAWMO	Nom du fichier de données WMO contenant le rayon modal, le log de la variance, la concentration volumique et les valeurs des indices de réfraction (partie réelle et partie imaginaire) en fonction de la longueur d'onde. Fichier localisé sous \$RACINE/fic (SOS_AEROSOLS)	Data_WMO
SOS_AER_DATASF	Nom du fichier de données Shettle & Fenn contenant le log de la variance et les valeurs du rayon modal en fonction de l'humidité relative. Fichier localisé sous \$RACINE/fic (SOS_AEROSOLS)	Data_SF

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 49 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

SOS_AER_SR_SF	Nom du fichier de données « Small Rural » de Shettle & Fenn contenant les valeurs des indices de réfraction (réel et imaginaire) en fonction de la longueur d'onde et de l'humidité relative. Fichier localisé sous \$RACINE/fic (SOS_AEROSOLS)	IRefrac_SR
SOS_AER_LR_SF	Idem pour les données « Large Rural » de Shettle & Fenn.	IRefrac_LR
SOS_AER_SU_SF	Idem pour les données « Small Urban » de Shettle & Fenn.	IRefrac_SU
SOS_AER_LU_SF	Idem pour les données « Large Urban » de Shettle & Fenn.	IRefrac_LU
SOS_AER_OM_SF	Idem pour les données « Oceanic Model » de Shettle & Fenn.	IRefrac_OM
SOS_PH_SEUIL_TRONCA	Valeur seuil pour le coefficient de troncature (SOS_AEROSOLS)	0.1
3) Constantes spécifiques à la définition du profil atmosphérique		
SOS_OS_NT	Nombre de couches du profil atmosphérique (SOS_PROFIL, SOS, SOS_OS)	26
SOS_PROFIL_MIN_NBC	Nombre minimal de sous-couches moléculaires pour un profil avec positionnement variable des aérosols entre deux altitudes. (SOS_PROFIL)	3
SOS_DZTRANSI	Définition de l'épaisseur de la couche de transition (km). (SOS_PROFIL)	0.010
4) Constantes spécifiques aux calculs des matrices de réflexion de surface		
SOS_PH_TEST	Facteur pour la comparaison de Gmin et Gmax. (SOS_GLITTER)	10000
SOS_PH_NU	Nombre d'angles azimutaux ($2^{SOS_PH_NQ}$) (SOS_GLITTER, SOS_ROUJEAN, SOS_NADAL)	1024
SOS_PH_NQ	Puissance de 2 de SOS_PH_NU. (SOS_GLITTER)	10
SOS_SEUIL_SF_NADAL	Valeur seuil pour l'arrêt de la décomposition en séries de Fourier de la fonction (F21 Nadal) / (F21 Fresnel). (SOS_NADAL)	0.001
SOS_SEUIL_SF_ROUJEAN	Valeur seuil pour l'arrêt de la décomposition en séries de Fourier de la BRDF de Roujean. (SOS_ROUJEAN)	0.001
SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN	Angle zénithal solaire limite de calcul de la BRDF de Roujean (en degrés). (SOS_ROUJEAN, SOS_NOM_FIC_SURFACE)	60
SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN	Angle zénithal de visée limite de calcul de la BRDF de Roujean (en degrés). (SOS_ROUJEAN, SOS_NOM_FIC_SURFACE)	60
5) Constantes spécifiques aux routines du programme sos		
SOS_OS_IBOR	Ordre minimal du développement en séries de Fourier (SOS_OS)	0
SOS_PH_SEUIL_CV_SG	Seuil de convergence en série géométrique (SOS_OS)	0.01
SOS_PH_SEUIL_SUMDIF	Seuil d'arrêt de boucle sur les diffusions multiples (SOS_OS)	0.00001
SOS_PH_SEUIL_SF	Seuil pour l'arrêt de la décomposition en séries de Fourier (SOS_OS)	0.0001
SOS_SEUIL_Z	Valeur seuil pour le calcul des angles de rotation (SOS_TRPHI)	0.0001
SOS_SEUIL_X	Valeur seuil pour le calcul des éléments M21 et M31 de la matrice de réflexion exprimée dans un repère lié au plan méridien. (SOS_TRPHI)	0.00001
SOS_SOLAR_DISC_SOLID_ANGLE	Angle solide du disque solaire (sr) pour la distance Terre - Soleil moyenne. (SOS_TRPHI)	6.8D-05

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 50 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

6) Constantes spécifiques à la définition des angles et ordres des développements		
6.1) Constantes pour le dimensionnement des tableaux en angles et ordres limites des développements en séries de Fourier et polynômes de Legendre		
SOS_MIE_NBMU_MAX	<p>Nombre maximal d'angles (positifs) pour le dimensionnement des tableaux de fonctions de phase.</p> <p>Valeur minimale : nombre d'angles de Gauss par défaut + nombre maximal d'angles utilisateur :</p> <p>SOS_DEFAULT_NBMU_MIE + SOS_NBMAX_USER_ANGLES.</p> <p>Ne pas définir une valeur abusivement grande pour ne pas allonger les temps de traitement</p> <p>(SOS_ANGLES, SOS_AEROSOLS, SOS_MIE)</p>	100
SOS_OS_NBMU_MAX	<p>Nombre maximal d'angles (positifs) pour le dimensionnement des tableaux de champs de luminance et de réflexion de surface.</p> <p>Valeur minimale : nombre d'angles de Gauss par défaut + nombre maximal d'angles utilisateur :</p> <p>SOS_DEFAULT_NBMU_LUM + SOS_NBMAX_USER_ANGLES.</p> <p>Ne pas définir une valeur abusivement grande pour ne pas allonger les temps de traitement</p> <p>(SOS_ANGLES, SOS_SURFACE, SOS_GLITTER, SOS_ROUJEAN, SOS_RONDEAUX_BREON, SOS_NADAL, SOS, SOS_OS, SOS_TRPHI)</p>	68
SOS_OS_NB_MAX	<p>Ordre maximal du développement des fonctions de phase en polynômes de Legendre et des développements en séries de Fourier, pour le dimensionnement des tableaux.</p> <p>Prendre $SOS_OS_NB_MAX \geq 2 \times SOS_MIE_NBMU_MAX$</p> <p>(SOS, SOS_OS, SOS_AEROSOLS, SOS_SURFACE, SOS_ROUJEAN, SOS_NADAL)</p>	200
SOS_OS_NS_MAX	<p>Ordre maximal du développement en polynômes de Legendre des éléments de la matrice de Fresnel pour le dimensionnement des tableaux.</p> <p>Prendre $SOS_OS_NS_MAX = 2 \times SOS_OS_NBMU_MAX$</p> <p>(SOS_SURFACE)</p>	136
SOS_OS_NM_MAX	<p>Ordre maximal du développement en séries de Fourier de la fonction G, pondérant la matrice de Fresnel, pour le dimensionnement des tableaux.</p> <p>Prendre $SOS_OS_NM_MAX = SOS_OS_NB_MAX + SOS_OS_NS_MAX$</p> <p>(SOS_SURFACE, SOS_GLITTER, SOS_RONDEAUX_BREON)</p>	336

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 51 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

6.2) nombre d'angles et ordres maximaux des développements à utiliser en absence d'une définition des angles par l'utilisateur		
SOS_DEFAULT_NBMU_MIE	Nombre d'angles de Gauss (positifs) par défaut pour les calculs des propriétés radiatives des aérosols. (SOS_ANGLES)	40
SOS_DEFAULT_NBMU_LUM	Nombre d'angles de Gauss (positifs) par défaut pour les calculs de champs de luminance. (SOS_ANGLES)	24
SOS_DEFAULT_OS_NB	Valeur par défaut de l'ordre limite du développement des fonctions de phase en polynômes de Legendre et des développements en séries de Fourier du champ de luminance. Prendre $SOS_DEFAULT_OS_NB \geq 2 \times SOS_DEFAULT_NBMU_MIE$ (SOS_ANGLES)	80
SOS_DEFAULT_OS_NS	Valeur par défaut de l'ordre limite du développement en polynômes de Legendre des éléments de la matrice de Fresnel. Prendre $SOS_DEFAULT_OS_NS = 2 \times SOS_DEFAULT_NBMU_LUM$ (SOS_ANGLES)	48
SOS_DEFAULT_OS_NM	Valeur par défaut de l'ordre limite du développement en séries de Fourier de la fonction G, pondérant la matrice de Fresnel. Prendre $SOS_DEFAULT_OS_NM \geq SOS_DEFAULT_OS_NB + SOS_DEFAULT_OS_NS$ (SOS_ANGLES)	128
6.3) limitation du nombre d'angles pour le calcul des fichiers précisant les angles à utiliser		
SOS_NBMAX_USER_ANGLES	Nombre maximal d'angles utilisateurs, complémentaires aux angles de Gauss (SOS_ANGLES)	20
SOS_NBANGLES_MAX	Nombre maximal d'angles positifs pour les calculs des angles utilisés par les codes (angles de Gauss + angles utilisateur + 1 = angle zénithal solaire). Doit correspondre au max de SOS_MIE_NBMU_MAX et SOS_OS_NBMU_MAX. (SOS_ANGLES)	100
SOS_SEUIL_ECART_MUS	Seuil entre l'écart de $\cos(X)$ et $\cos(\theta_s)$ pour considérer que $\theta_s=X$ (SOS_ANGLES)	0.00001

III-3.2 Modification du nombre de couches des profils

Afin d'affiner la description d'un profil d'épaisseur optique (dans le cas d'une atmosphère dense par exemple), on peut souhaiter augmenter le nombre de couches intervenant dans la découpe du profil. S'agissant d'un paramètre dimensionnant la taille des tableaux des programmes, le nombre de couches du profil est une constante : SOS_OS_NT. L'utilisateur peut en changer la valeur dans le fichier SOS.h. Une nouvelle compilation est nécessaire pour la prise en compte de cette modification.

La précision des calculs d'intégration verticale est discutée en section VI-7.1.

IV- Descriptif du logiciel

Ce paragraphe a pour objectif de préciser sommairement la structure du logiciel. Un descriptif complet des programmes et routines est disponible dans les chapitres suivants.

IV-1 Structure du code

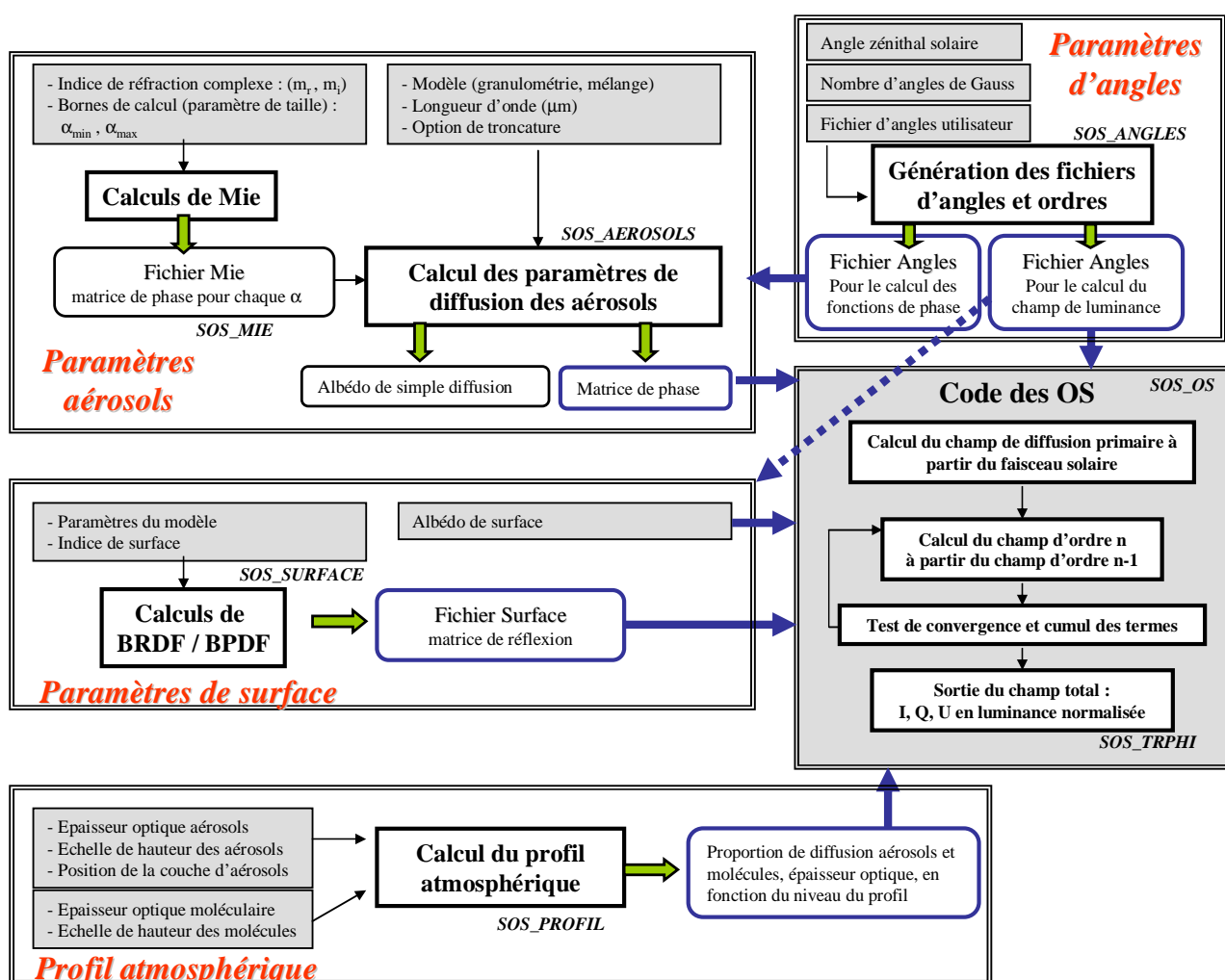


Figure 7 : Vue générale des étapes de traitements gérés par le script main_SOS

Le code se structure en cinq blocs de traitements :

- Préparation des angles à utiliser et des ordres limites de développement associés.
- Calcul de la matrice de réflexion de surface pour une simulation sur mer (calcul du glitter) ou sur terre émergée (calcul de BRDF et BPDF).
- Calcul des propriétés de diffusion des aérosols : calculs de Mie en fonction de la nature chimique des particules (indice de réfraction) et calcul de la matrice de phase pour un modèle et une longueur d'onde.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 53 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

- Calcul du profil atmosphérique en fonction de l'épaisseur optique totale des molécules et des aérosols : contribution relative à la diffusion pour les aérosols et les molécules en fonction du niveau du profil, épaisseur optique totale du mélange en fonction du niveau.
- Calcul des diffusions atmosphériques et des réflexions « surface - atmosphère » successives.

Le fonctionnement des différents blocs se trouve exposé dans les sections suivantes :

V-	Définition des conditions angulaires	page 56
VI-	Calcul du champ de luminance par le code des OS	page 64
VII-	Propriétés radiatives des aérosols	page 95
VIII-	Définition du profil atmosphérique	page 145
IX-	Réflexion de surface	page 156

Le script main_SOS.ksh gère l'appel des différentes étapes de calcul.

Dans le cas d'une simulation de la luminance pour une longueur d'onde λ_{simu} avec une définition de l'épaisseur optique des aérosols pour la longueur d'onde λ_{ref} , le script calcule la section efficace d'extinction des aérosols pour les deux longueurs d'onde afin de pouvoir estimer l'épaisseur optique pour λ_{simu} .

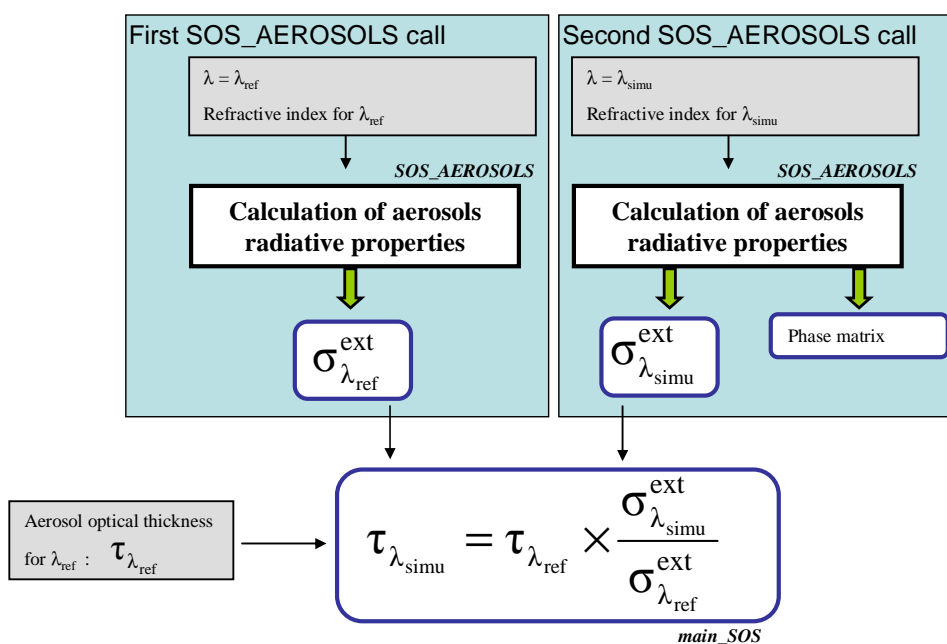


Figure 8 : Estimation de l'épaisseur optique des aérosols à la longueur de simulation du champ de luminance

IV-2 Liste des programmes et routines

Programmes utilisés		
Fichier source	Programme / routine	Pages
SOS_ANGLES.F	SOS_ANGLES : programme principal	63
	SOS_ANGLES_GAUSS_USER	63
	SOS_GAUSS	63
SOS_AEROSOLS.F	SOS_AEROSOLS : programme principal	95, 142
	SOS_NOM_FICMIE	142
	SOS_GRANU	118, 142
	SOS_DECOMPO_LEGENDRE	120, 142
	SOS_INIT_PARAMWMO	142
	SOS_INIT_PARAMSF	142
	SOS_INTERPOL	142
	SOS_INTERPOSPLINT	142
	SOS_SPLINE	142
	SOS_SPLINT	142
SOS_MIE.F	SOS_MIE	107, 144
	SOS_XERO	144
	SOS_FPHASE_MIE	144
SOS_PROFIL.F	SOS_PROFIL : programme principal	145
	SOS_DISC	155
SOS_SURFACE.F	SOS_SURFACE : programme principal	156, 181, 189
	SOS_MAT_FRESNEL	189
	SOS_MAT_REFLEXION	189
	SOS_NOYAUX_FRESNEL	189
	SOS_MISE_FORMAT	189
	SOS_BPDPF_AJOUT_BRDF	189
	SOS_COMPLETE_NOM_FIC_SURF	189
SOS_GLITTER.F	SOS_GLITTER	194
	SOS_GSF	194
	SOS_CALCG	194
SOS_NADAL.F	SOS_NADAL	194
	SOS_F21SF_NADAL	194
	SOS_CALC_F21_NADAL_SUR_FRESNEL	194
SOS_RONDEAUX_BREON.F	SOS_RONDEAUX_BREON	194
	SOS_GSF_RONDEAUX_BREON	194

SOS_ROUJEAN.F	SOS_ROUJEAN	193
	SOS_FSF_ROUJEAN	193
	SOS_CALC_F_ROUJEAN	193
	SOS_MISE_FORMAT_RJ	193
SOS_NOM_FIC_SURFACE.F	SOS_NOM_FICGLITTER	190
	SOS_NOM_FICROUJ	190
	SOS_NOM_FICRH	190
	SOS_NOM_FICBREON	190
	SOS_NOM_FICNADAL	190
SOS.F	SOS : programme principal	83
SOS_OS.F	SOS_OS	83
	SOS_MAT_FRESNEL_PLAN_REFL	92
	SOS_NOYAUX	70, 92
	SOS_INTEGR_EPOPT	77, 92
	SOS_FSOURCE_ORDRE1	75, 92
	SOS_FSOURCE_ORDREIG	76, 92
	SOS_FSOURCE_DIFF_FRESNEL1	76, 164, 92
	SOS_PARAM_CONV	78, 92
	SOS_ARRET_DIFFUS	78, 92
	SOS_ARRET_FOURIER	80, 92
	SOS_AJOUT_QUEUE	78, 92
SOS_TRPHI.F	SOS_TRPHI_OPTION	94
	SOS_TRPHI	94
	SOS_GLITTE	94
	SOS_ANGLE	94
	SOS_REFLEX	94
	SOS_MATRIC	94

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 56 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

V- Définition des conditions angulaires

Que ce soit pour les calculs de fonction de phase des aérosols ou de la diffusion du champ de rayonnement, il convient de définir les angles qui sont nécessaires aux traitements. Il s'agit, d'une part, des angles de Gauss et de leurs poids associés, permettant l'expression des intégrations spatiales en sommes finies, et, d'autre part, d'angles spécifiques pour lesquels l'utilisateur souhaite avoir un résultat.

Le programme **SOS_ANGLE.exe** est en charge de définir les tables d'angles utilisées par les différents programmes du code OSD et d'estimer automatiquement les ordres limites des développements, dépendant du nombre d'angles de Gauss utilisés.

V-1 Passage des paramètres à l'exécutable SOS_ANGLES.exe

Le script `main_SOS.ksh` gère le passage des paramètres au programme **SOS_ANGLES**, appelé systématiquement à la réalisation d'une simulation.

Il est nécessaire de lui préciser :

- le nom des fichiers d'angles à produire (pour les calculs de Mie et pour les calculs de luminance),
- la valeur de l'angle zénithal solaire,
- le nom du fichier Trace.

De manière optionnelle, l'utilisateur peut définir :

- le nombre d'angles de Gauss à utiliser pour les calculs de Mie.
→ S'il n'est pas précisé, le code utilise la valeur par défaut définie dans le fichier `SOS.h` : `SOS_DEFAULT_NBMU_MIE`.
- le nombre d'angles de Gauss à utiliser pour les calculs de luminance et de BRDF/BPDF.
→ S'il n'est pas précisé, le code utilise la valeur par défaut définie dans le fichier `SOS.h` : `SOS_DEFAULT_NBMU_LUM`.
- un fichier d'angles complémentaires souhaités par l'utilisateur (un fichier pour les calculs de fonctions de phase et un pour les calculs de luminance).

Le tableau et le croquis suivants précisent les paramètres de SOS_ANGLES.

PARAMETRES DU PROGRAMME SOS_ANGLES	
ANG.Rad.Thetas	Angle zénithal solaire en degrés ($0 < \theta < 90^\circ$)
ANG.Rad.NbGauss	Nombre d'angles de Gauss pour les simulations de luminance et BRDF/BPDF
ANG.Rad.UserAngFile	Nom du fichier des « angles utilisateur » complémentaires pour les calculs de luminance.
ANG.Rad.ResFile	Nom du fichier créé contenant les angles et les ordres maximums des développements à utiliser pour les calculs de luminance.
ANG.Aer.NbGauss	Nombre d'angles de Gauss pour les calculs de fonctions de phase
ANG.Aer.UserAngFile	Nom du fichier des angles « utilisateur » complémentaires pour les calculs de fonctions de phase.
ANG.Aer.ResFile	Nom du fichier créé contenant les angles et les ordres maximums des développements à utiliser pour les calculs de fonctions de phase.
ANG.Log	Nom du fichier trace des calculs du programme ANGLES <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>

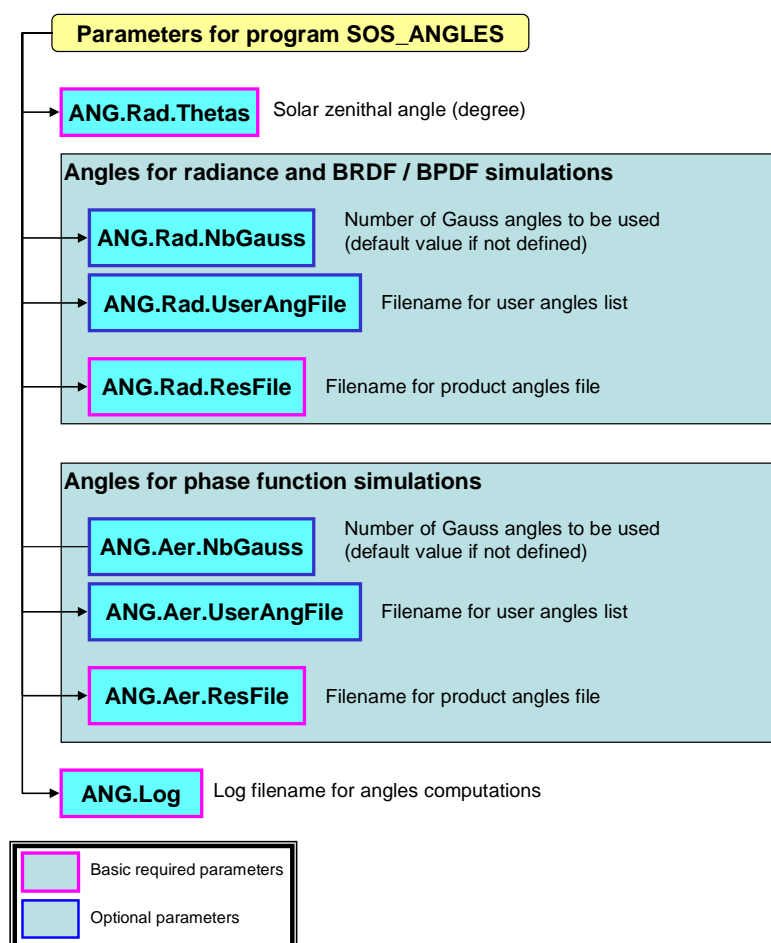


Figure 9 : Paramètres pour l'appel du programme SOS_ANGLES

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 59 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Exemple de fichier d'angles pour le calcul des luminances :

NB_TOTAL_ANGLES : 24 NB_GAUSS_ANGLES : 24 ANGLES_USERFILE : NO_USER_ANGLES SOLAR_ZENITH_ANGLE : 32.479 INTERNAL_IMUS : 9 INTERNAL_OS_NB : 80 INTERNAL_OS_NS : 48 INTERNAL_OS_NM : 128			
INDEX	COS_ANGLE	WEIGHT	OUTPUT
1	0.99877100725243E+00	0.31533460522976E-02	0
2	0.99353017226635E+00	0.73275539012758E-02	0
3	0.98412458372283E+00	0.11477234579235E-01	0
4	0.97059159254625E+00	0.15579315722944E-01	0
5	0.95298770316043E+00	0.19616160457356E-01	0
6	0.93138669070655E+00	0.23570760839325E-01	0
7	0.90587913671557E+00	0.27426509708357E-01	0
8	0.87657202027425E+00	0.31167227832799E-01	0
9	0.84358826162439E+00	0.34777222564771E-01	0
10	0.80706620402944E+00	0.38241351065831E-01	0
11	0.76715903251574E+00	0.41545082943465E-01	0
12	0.72403413092381E+00	0.44674560856694E-01	0
13	0.67787237963266E+00	0.47616658492491E-01	0
14	0.62886739677651E+00	0.50359035553855E-01	0
15	0.57722472608397E+00	0.52890189485194E-01	0
16	0.52316097472223E+00	0.55199503699984E-01	0
17	0.46690290475096E+00	0.57277292100403E-01	0
18	0.40868648199072E+00	0.59114839698396E-01	0
19	0.34875588629216E+00	0.60704439165894E-01	0
20	0.28736248735546E+00	0.62039423159893E-01	0
21	0.22476379039469E+00	0.63114192286254E-01	0
22	0.16122235606889E+00	0.63924238584648E-01	0
23	0.97004699209463E-01	0.64466164435950E-01	0
24	0.32380170962869E-01	0.64737696812684E-01	0

V.2.1.b FICHER POUR LE CALCUL DES FONCTIONS DE PHASE

Le programme SOS_ANGLES génère un fichier des angles et ordres de développement pour les calculs de fonction de phase aérosols. Il est utilisé par le programme SOS_AEROSOLS pour le calcul des propriétés radiatives et la génération de la matrice de phase.

Le fichier produit contient les informations suivantes :

NB_TOTAL_ANGLES	Nombre total d'angles à utiliser		
NB_GAUSS_ANGLES	Nombre d'angles de Gauss		
ANGLES_USERFILE	Nom du fichier d'angles utilisateur (NO_USER_ANGLES si pas de fichier défini).		
INTERNAL_OS_NB	Ordre maximal à utiliser pour le développement des fonctions de phase en polynômes de Legendre		
INDEX	COS_ANGLE	WEIGHT	Lignes donnant l'indice d'angle, son cosinus et son poids. Format: I4,X,2D21.14,X,I4.
	.		
	.		
	.		

Exemple de fichier d'angles pour le calcul des propriétés radiatives des aérosols :

```

NB_TOTAL_ANGLES : 40
NB_GAUSS_ANGLES : 40
ANGLES_USERFILE : NO_USER_ANGLES
INTERNAL_OS_NB : 80
INDEX      COS_ANGLE      WEIGHT
 1 0.19511383256794E-01 0.39017813656307E-01
 2 0.58504437152421E-01 0.38958395962770E-01
 3 0.97408398441585E-01 0.38839651059052E-01
 4 0.13616402280914E+00 0.38661759774076E-01
 5 0.17471229183265E+00 0.38424993006959E-01
 6 0.21299450285767E+00 0.38129711314478E-01
 7 0.25095235839227E+00 0.37776364362001E-01
 8 0.28852805488451E+00 0.37365490238731E-01
 9 0.32566437074770E+00 0.36897714638276E-01
10 0.36230475349949E+00 0.36373749905836E-01
11 0.39839340588197E+00 0.35794393953416E-01
12 0.43387537083176E+00 0.35160529044748E-01
13 0.46869661517054E+00 0.34473120451754E-01
14 0.50280411188878E+00 0.33733214984612E-01
15 0.53614592089713E+00 0.32941939397646E-01
16 0.56867126812271E+00 0.32100498673488E-01
17 0.60033062282975E+00 0.31210174188115E-01
18 0.63107577304687E+00 0.30272321759558E-01
19 0.66085989898612E+00 0.29288369583267E-01
20 0.68963764434203E+00 0.28259816057277E-01
21 0.71736518536210E+00 0.27188227500486E-01
22 0.74400029758360E+00 0.26075235767565E-01
23 0.76950242013504E+00 0.24922535764116E-01
24 0.79383271750461E+00 0.23731882865930E-01
25 0.81695413868146E+00 0.22505090246332E-01
26 0.83883147358026E+00 0.21244026115782E-01
27 0.85943140666311E+00 0.19950610878142E-01
28 0.87872256767821E+00 0.18626814208300E-01
29 0.89667557943877E+00 0.17274652056270E-01
30 0.91326310257176E+00 0.15896183583725E-01
31 0.92845987717245E+00 0.14493508040509E-01
32 0.94224276130987E+00 0.13068761592400E-01
33 0.95459076634363E+00 0.11624114120797E-01
34 0.96548508904380E+00 0.10161766041103E-01
35 0.97490914058573E+00 0.86839452692619E-02
36 0.98284857273863E+00 0.71929047681184E-02
37 0.98929130249976E+00 0.56909224514043E-02
38 0.99422754096569E+00 0.41803131246912E-02
39 0.99764986439824E+00 0.26635335895143E-02
40 0.99955382265163E+00 0.11449500031887E-02

```

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 61 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

V-2.2 Fichiers de définition des « angles utilisateurs »

L'utilisateur peut préciser une liste d'angles pour lesquels il souhaite obtenir un résultat (valeur de luminance ou de fonction de phase). Ce fichier est précisé par :

- Pour les calculs des propriétés radiatives des aérosols : - ANG.Aer.UserAngFile
- Pour les calculs de luminance : - ANG.Rad.UserAngFile

Le fichier contient une liste d'angles (en degrés) avec une valeur d'angle par ligne d'enregistrement.

Exemple de fichier d'angles « utilisateurs »

```
5.
10.
20.
25.
30.
```

Contraintes :

- Les angles doivent être compris entre 0 et 90 degrés (pour définir des valeurs $\mu > 0$, les valeurs opposées étant ajoutées automatiquement par le code).
- Le nombre d'enregistrements ne doit pas excéder SOS_NBMAX_USER_ANGLES (de SOS.h).

V-3 Fonctionnement de SOS_ANGLES

Soit, NB_{MIE}^{GAUSS} le nombre d'angles de Gauss pour les calculs de fonctions de phase et NB_{LUM}^{GAUSS} le nombre d'angles de Gauss pour les calculs de luminance.

V-3.1 Gestion des angles

Angles de Gauss :

Le nombre d'angles de Gauss à utiliser peut être défini par l'utilisateur. A défaut, le programme SOS_ANGLE utilise les valeurs par défaut, définies dans le fichier des constantes (SOS.h) :

- SOS_DEFAULT_NBMU_MIE pour le calcul des propriétés radiatives des aérosols.
- SOS_DEFAULT_NBMU_LUM pour le calcul du champ de rayonnement.

Le programme SOS_ANGLE fait appel à une fonction de quadrature de Gauss qui calcule les NB_{LUM}^{GAUSS} (ou NB_{MIE}^{GAUSS}) angles et poids de Gauss.

Angles « utilisateurs » :

De manière optionnelle, l'utilisateur peut définir un fichier d'angles complémentaires.

Les NB_{LUM}^{USER} (ou NB_{MIE}^{USER}) angles complémentaires, choisis par l'utilisateur, sont ajoutés à la table des angles, en leur attribuant un poids nul de sorte à ce qu'ils restent neutres dans les calculs d'intégration.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 62 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Angle zénithal solaire θ_s :

La définition de l'angle zénithal solaire passe par le renseignement du paramètre :

- -ANG.Rad.Thetas pour un appel direct du programme SOS_ANGLES.
- -ANG.Thetas pour un appel de main_SOS.ksh (cas général).

En interne au code, il faut que cet angle fasse partie de la table des angles pour les simulations de matrice de réflexion. Aussi, le code SOS_ANGLES l'ajoute à la table et précise dans le fichier produit l'indice IMUS correspondant à sa position dans la table.

NB : Si l'angle zénithal solaire est déjà un angle de la table (à SOS_SEUIL_ECART_MUS près) alors le code se contente d'attribuer l'indice de cet angle comme valeur de IMUS.

Nombre total d'angles :

Le nombre d'angles utiles aux traitements correspond à :

- Pour le calcul des fonctions de phase : $NB_{MIE}^{ANGLES} = NB_{MIE}^{GAUSS} + NB_{MIE}^{USER}$
- Pour le calcul du champ de luminance :
 - $NB_{LUM}^{ANGLES} = NB_{LUM}^{GAUSS} + NB_{LUM}^{USER} + 1$ si $\theta_s \neq \theta_v$ (différent de tous les angles de visée)
 - $NB_{LUM}^{ANGLES} = NB_{LUM}^{GAUSS} + NB_{LUM}^{USER}$ si $\theta_s = \theta_v$ (égal à un des angles de visée)

Ces angles sont définis pour des cosinus positif ($\mu > 0$). Les valeurs opposées sont attribuées en interne aux codes les exploitant.

Les tables du code OSD sont dimensionnées sur des tailles limites qui doivent supporter le nombre d'angles effectivement à utiliser. Les constantes suivantes dimensionnent ces tables (définies dans SOS.h) :

SOS_OS_NBMU_MAX	Nombre maximal d'angles (positifs) pour le dimensionnement des tableaux de champs de luminance et de réflexion de surface. Doit au moins valoir la valeur par défaut SOS_DEFAULT_NBMU_LUM + le nombre max d'angles utilisateur SOS_NBMAX_USER_ANGLES
SOS_MIE_NBMU_MAX	Nombre maximal d'angles (positifs) pour le dimensionnement des tableaux de fonctions de phase. Doit au moins valoir la valeur par défaut SOS_DEFAULT_NBMU_MIE le nombre max d'angles utilisateur SOS_NBMAX_USER_ANGLES

NB : Ces constantes doivent être suffisamment grandes pour permettre une modification aisée du nombre d'angles utilisés (notamment pour l'adjonction d' « angles utilisateurs »), sans nécessiter de recompilation. Cependant, elles ne doivent pas être définies avec une taille trop importante pour ne pas saturer la mémoire vive et pénaliser les temps de traitements. Il est préférable de les ajuster à l'usage commun de l'utilisateur.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 63 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Le programme s'assure que
$$\begin{cases} NB_{LUM}^{ANGLES} \leq SOS_OS_NBMU_MAX \\ NB_{MIE}^{ANGLES} \leq SOS_MIE_NBMU_MAX \end{cases}$$

V-3.2 Ordres limites des développements

Les ordres limites des développements des décompositions en fonction de Legendre dépendent du nombre d'angles de Gauss utilisés. Modifier leur nombre impose de devoir adapter les ordres limites des développements. Aussi, ils sont calculés automatiquement selon le principe suivant :

Il a été retenu de prendre :

- Ordre limite des développements pour la décomposition de la matrice de phase :

$$OS_NB = 2 \times NB_{MIE}^{GAUSS}$$
- Ordre limite des développements pour la décomposition de la matrice de réflexion de Fresnel :

$$OS_NS = 2 \times NB_{LUM}^{GAUSS}$$
- Ordre limite des développements pour la décomposition des fonctions de statistiques d'orientation des facettes pour la réflexion de surface :
$$OS_NM = OS_NB + OS_NS$$

Si l'utilisateur n'a pas défini le nombre d'angles de Gauss à utiliser, les ordres limites retenus sont alors ceux définis par défaut dans SOS.h : SOS_DEFAULT_OS_NB, SOS_DEFAULT_OS_NS et SOS_DEFAULT_OS_NM.

V-4 Rôle des routines associées au programme ANGLES

- **SOS_ANGLES** : Programme principal gérant l'ensemble des traitements de définition des angles et des ordres limites de développement.

- **Routine SOS_ANGLES_GAUSS_USER** :

L'objectif de cette routine est de produire une table des angles de Gauss et des angles complémentaires de l'utilisateur.

La table est bâtie à partir des cosinus positifs uniquement.

La table est triée selon l'usage qui en sera fait :

- Trie par ordre croissant des cosinus pour un usage destiné aux calculs de fonctions de phase, de sorte à fournir directement une fonction de phase de 0 à 180° d'angle de diffusion.
- Trie par ordre décroissant des cosinus pour un usage destiné aux calculs de luminance, de sorte à décrire directement un plan azimutal de -90° à +90° d'angles de visée.

- **Routine SOS_GAUSS** :

Cette routine, provenant du Laboratoire d'Optique Atmosphérique, calcule les cosinus (valeurs positives) et poids des angles de Gauss, pour un ordre donné de la quadrature.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 64 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

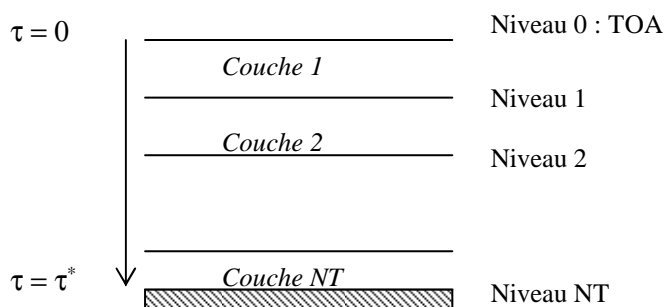
VI- Calcul du champ de luminance par le code des OS

VI-1 Principe de fonctionnement

Le code des Ordres Successifs de Diffusion est un code de transfert radiatif simulant la luminance diffuse et polarisée du système {surface – atmosphère} par ciel clair et sans absorption gazeuse.

Le profil de concentration des particules atmosphériques (aérosols et molécules) est rendu par une découpe de l'atmosphère en niveaux d'épaisseurs optiques. Pour chaque niveau, une matrice de phase, tenant compte du mélange des particules, caractérise les propriétés de diffusion de la couche immédiatement au-dessus.

Découpe de l'atmosphère



Pour chaque niveau de ce profil, le code commence par calculer le champ de rayonnement dû à la diffusion du faisceau solaire direct. La constante solaire est prise égale à π de sorte à calculer des luminances normalisées. La propagation de la lumière au sein de l'atmosphère est décrite par l'Equation de Transfert Radiatif. A partir de ce premier champ de rayonnement, on peut calculer le champ global de diffusion primaire. En intégrant l'Equation de Transfert Radiatif par couche, pour le champ montant (en considérant la réflexion de surface du faisceau solaire direct) ou pour le champ descendant, on calcule de proche en proche la luminance de diffusion primaire globale émergeant au TOA ou bien éclairant le sol. La luminance polarisée est également calculée.

Ce champ d'ordre 1 est la source de la diffusion d'ordre 2 et de la seconde réflexion de surface. On reprend le même type de calcul que pour la diffusion primaire afin d'obtenir le champ de rayonnement d'ordre 2. En calculant ainsi de suite les termes successifs d'interaction et en les ajoutant, on obtient le champ global de rayonnement pour chaque couche.

La complexité du programme repose sur son formalisme mathématique, faisant intervenir une séparation de la dépendance zénithale de celle azimutale par une décomposition en séries de Fourier de l'expression de la luminance. L'intérêt de ce formalisme est d'augmenter considérablement la rapidité des simulations.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 65 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-2 Equation de Transfert Radiatif pour une décomposition en séries de Fourier

Le formalisme mathématique du code des OS est discuté dans la notice scientifique [DR9]. Nous le rappelons ici pour présenter les équations telles qu'elles apparaissent dans le code.

VI-2.1 Formalisme de Stokes

Le champ de luminance polarisée est représenté par la forme vectorielle $\bar{L}(\tau, \mu, \phi)$. On peut séparer la dépendance zénithale en $\mu = \cos \theta$ de la dépendance azimutale ϕ par une décomposition en séries de Fourier :

$$\bar{L}(\tau, \mu, \phi) = \begin{pmatrix} I(\tau, \mu, \phi) \\ Q(\tau, \mu, \phi) \\ U(\tau, \mu, \phi) \end{pmatrix} = \sum_{s=0}^S (2 - \delta_{0s}) \times \begin{pmatrix} \cos(s\phi) \times \sum_n I_n^s(\tau, \mu) \\ \cos(s\phi) \times \sum_n Q_n^s(\tau, \mu) \\ \sin(s\phi) \times \sum_n U_n^s(\tau, \mu) \end{pmatrix} \quad (2)$$

où :

- I, Q et U sont les paramètres de Stokes,
- τ est l'épaisseur optique verticale dans l'atmosphère,
- μ est le cosinus de l'angle zénithal de visée (positif ou négatif),
- ϕ est l'azimut de visée (on suppose que l'azimut solaire est nul),
- s est l'ordre de la décomposition en séries de Fourier,
- n est l'ordre d'interaction (diffusion, réflexion),
- la fonction $\delta_{0s} = 1$ si $s = 0$, et vaut 0 sinon.

Pour chaque ordre de la décomposition en séries de Fourier, le code des OSD travaille en distinguant les différentes interactions. L'expression du champ utile dans les traitements est alors :

$$\bar{L}_n^s(\tau, \mu) = \begin{pmatrix} I_n^s(\tau, \mu) \\ Q_n^s(\tau, \mu) \\ U_n^s(\tau, \mu) \end{pmatrix} \quad (3)$$

La grandeur délivrée en sortie des traitements (fichier résultat) est le cumul des interactions successives, pour une position dans le profil (c'est à dire pour une valeur de l'épaisseur optique fixée) :

$$\bar{L}^s(\tau, \mu) = \sum_n \bar{L}_n^s(\tau, \mu) \quad (4)$$

La recomposition pour un angle azimutal ϕ est effectuée après les calculs d'interactions successives.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 66 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-2.2 Forme intégrro-différentielle de l'ETR

Pour l'ordre n d'interaction, l'Equation de Transfert Radiatif, sous sa forme intégrro-différentielle, s'exprime en fonction des paramètres de Stokes et de la matrice de phase par :

$$\mu. \frac{\partial \bar{L}_n^s(\tau, \mu)}{\partial \tau} = \bar{L}_n^s(\tau, \mu) - \bar{S}_n^s(\tau, \mu) \quad (5)$$

avec pour l'ordre 1 (diffusion primaire) :

$$\bar{S}_1^s(\tau, \mu) = \frac{\omega_0(\tau)}{4.\pi} . \bar{P}_{ST}^s(\tau, \mu, \mu') . \begin{pmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} . \exp(\tau / \mu_0) \quad (6)$$

et pour l'ordre $n > 1$:

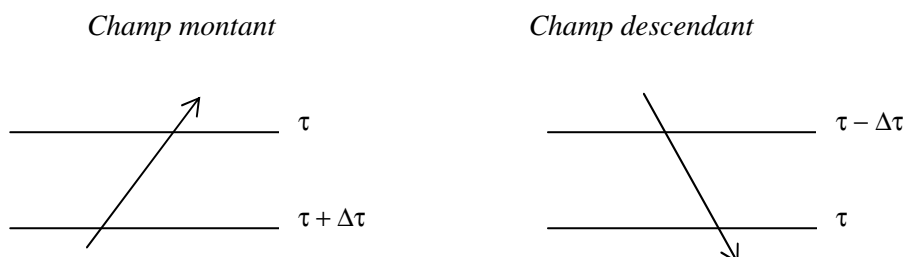
$$\bar{S}_n^s(\tau, \mu) = \frac{\omega_0(\tau)}{2} . \int_{-1}^1 \bar{P}_{ST}^s(\tau, \mu, \mu') . \bar{L}_{n-1}^s(\tau, \mu') . d\mu' \quad (7)$$

où

- $\bar{S}_n^s(\tau, \mu)$ est le vecteur fonction source de la diffusion d'ordre n pour l'ordre s de la décomposition en séries de Fourier,
- E est la constante solaire avec une incidence sous (μ_0, ϕ_0) .
- ω_0 est l'albédo de diffusion simple du mélange de diffusants,
- $\bar{P}_{ST}^s(\tau, \mu, \mu')$ est la matrice de phase entre les directions μ' et μ , pour une profondeur τ dans l'atmosphère, à l'ordre s de la décomposition en séries de Fourier.

VI-2.3 Forme intégrée de l'ETR

En pratique pour un ordre d'interaction donné, la résolution de l'équation (5) se fait de proche en proche par intégration entre deux niveaux consécutifs du profil atmosphérique.



- **Pour le champ montant** ($\mu > 0$), on écrit :

$$\begin{aligned} \bar{L}_n^{s\uparrow}(\tau, \mu) = & \bar{L}_n^{s\uparrow}(\tau + \Delta\tau, \mu) \cdot \exp(-\Delta\tau/\mu) \\ & + \frac{1}{\mu} \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} \bar{S}_n^s(\tau', \mu) \cdot \exp(-(\tau'-\tau)/\mu) \cdot d\tau' \end{aligned} \quad (8)$$

Avec pour condition limite au sol (réflexion sur un sol lambertien) :

- Pour l'ordre 1 :

$$\bar{L}_1^{s=0\uparrow}(\tau^*, \mu) = -\frac{\rho}{\pi} \cdot \mu_0 \cdot \begin{pmatrix} E \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \exp(\tau^*/\mu_0) \quad (9)$$

- Et pour l'ordre d'interaction $n > 1$:

$$I_n^{s=0\uparrow}(\tau^*, \mu) = 2\rho \cdot \int_{-1}^0 I_{n-1}^{s=0\downarrow}(\tau^*, \mu) \cdot \mu \cdot d\mu \quad (10)$$

où τ^* est l'épaisseur optique totale de la couche atmosphérique et ρ est l'albédo de surface.

- **Pour le champ descendant** ($\mu < 0$), on écrit :

$$\begin{aligned} \bar{L}_n^{s\downarrow}(\tau, \mu) = & \bar{L}_n^{s\downarrow}(\tau - \Delta\tau, \mu) \cdot \exp(\Delta\tau/\mu) \\ & - \frac{1}{\mu} \int_{\tau-\Delta\tau}^{\tau} \bar{S}_n^s(\tau', \mu) \cdot \exp(-(\tau'-\tau)/\mu) \cdot d\tau' \end{aligned} \quad (11)$$

La condition limite est d'avoir un champ diffus descendant qui est nul au sommet de l'atmosphère.

La fonction source est calculée exactement selon les équations (6) et (7) pour les différents niveaux du profil atmosphérique. Les intégrations sur l'épaisseur optique des équations (8) et (11) peuvent alors être calculées entre deux niveaux consécutifs en faisant une approximation de linéarité de la fonction source par rapport à l'épaisseur optique.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 68 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-3 Enchaînement des traitements du code des OSD : Routine SOS_OS

Les traitements réalisés reposent sur deux boucles principales imbriquées. La première boucle sur l'ordre de la décomposition en séries de Fourier. La seconde, pour un ordre s de la décomposition en séries de Fourier, boucle sur l'ordre n des interactions.

Les traitements sont schématiquement les suivants :

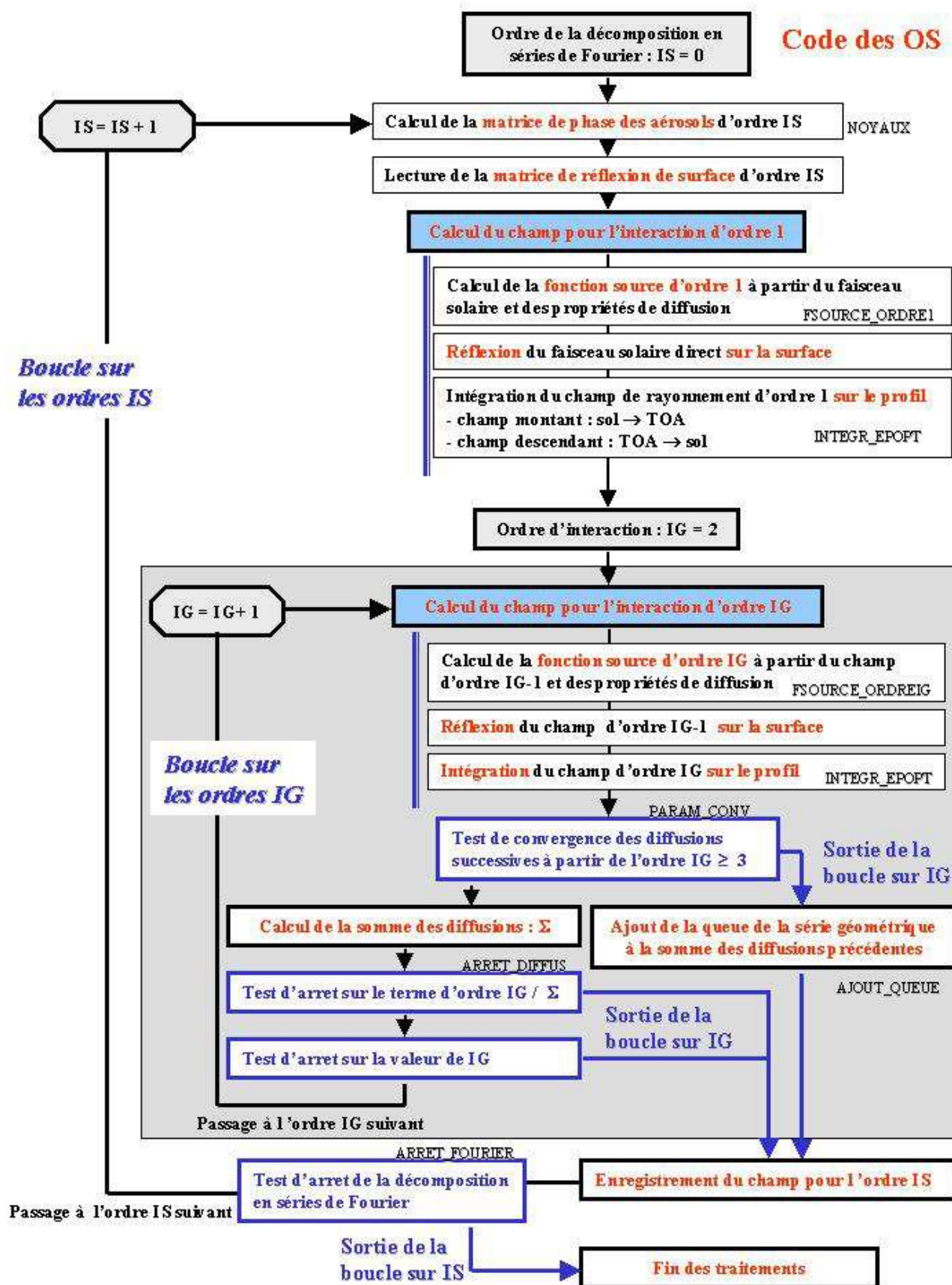
Initialisations :

- Lecture des angles de Gauss et des poids associés.
- Estimation des paramètres de la matrice de phase moléculaire après correction de la dépolarisation.
- Détermination de la valeur du cosinus de la direction d'incidence solaire.
- Calcul des paramètres de la matrice de Fresnel si l'option de simulation sur mer plate est retenue
⇒ routine SOS_MAT_FRESNEL.

Boucle sur l'ordre S de la décomposition en séries de Fourier :

de $S = \text{SOS_OS_IBOR}$ (0 en principe) à SOS_OS_IBORM

- Lecture des éléments d'ordre S de la matrice de réflexion de surface (si BRDF / BPDF retenue).
- Calcul du noyau de diffusion des aérosols pour l'ordre S :
préparation de la matrice de phase des aérosols ⇒ routine SOS_NOYAUX.
- ***Calculs de l'ordre 1 d'interaction :***
 - Calcul de la fonction source d'ordre 1 ⇒ routine SOS_FSOURCE_ORDRE1.
 - Calcul de la réflexion du faisceau solaire direct en surface (lambertienne + BRDF / BPDF)
 - Intégration du champ de rayonnement d'ordre 1 sur le profil atmosphérique
⇒ routine SOS_INTEGR_EPOPT
 - Champ montant : du sol au TOA
 - Champ descendant : du TOA (champ nul) au sol.
- ***Boucle sur les ordres d'interaction***
 - Calcul de la fonction source d'ordre n à partir du champ d'ordre $n-1$
⇒ routine SOS_FSOURCE_ORDREIG.
 - Calcul de la réflexion du champ d'ordre $n-1$ en surface (lambertienne + BRDF / BPDF)
 - Intégration du champ de rayonnement d'ordre n sur le profil atmosphérique
 - Tests de sortie de boucles : convergence des ordres successifs, contribution de l'ordre n devant la somme des ordres précédant, valeur de l'ordre limite
⇒ routines SOS_PARAM_CONV, SOS_ARRET_DIFFUS.
 - Enregistrement du champ I , Q et U d'ordre s pour les angles de visée du fichier d'angles.
 - Test d'arrêt de la décomposition en séries de Fourier ⇒ routine SOS_ARRET_FOURIER.



CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 70 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-4 Calcul des fonctions sources

La fonction source (équations 6 et 7) fait intervenir les propriétés de diffusion des particules. A l'ordre 1, c'est l'éclairement direct du Soleil qui apporte les photons qui vont être diffusés. Pour un ordre supérieur $n > 1$, c'est la lumière diffuse d'ordre $n-1$ qui alimente la diffusion d'ordre n .

La fonction source caractérise la contribution au signal de la diffusion en un point de l'atmosphère (niveau du profil). On l'exprime en fonction du champ de luminance incident en ce point et des propriétés de diffusion de l'atmosphère décrites par la matrice de phase.

VI-4.1 Noyaux de diffusion : SOS_NOYAUX

La routine SOS_NOYAUX assure le calcul de la matrice de phase pour un ordre S de la décomposition en séries de Fourier.

Pour un angle d'incidence μ' et d'émergence μ , et pour une profondeur τ , la matrice de phase s'écrit :

$$\overline{P}_{ST}^S(\mu, \mu') = \begin{pmatrix} BP^S(\mu, \mu') & GR^S(\mu, \mu') & -GT^S(\mu, \mu') \\ GR^S(\mu', \mu) & ARR^S(\mu, \mu') & -ART^S(\mu', \mu) \\ -GT^S(\mu', \mu) & -ART^S(\mu, \mu') & ATT^S(\mu, \mu') \end{pmatrix} \quad (12.a)$$

avec

$$BP^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \beta_k^{11} \cdot P_S^k(\mu) \cdot P_S^k(\mu') \quad (12.b)$$

$$GR^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \gamma_k \cdot P_S^k(\mu) \cdot R_S^k(\mu') \quad (12.c)$$

$$GT^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \gamma_k \cdot P_S^k(\mu) \cdot T_S^k(\mu') \quad (12.d)$$

$$ARR^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \left[\alpha_k \cdot R_S^k(\mu) \cdot R_S^k(\mu') + \xi_k \cdot T_S^k(\mu) \cdot T_S^k(\mu') \right] \quad (12.e)$$

$$ART^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \left[\alpha_k \cdot R_S^k(\mu') \cdot T_S^k(\mu) + \xi_k \cdot T_S^k(\mu') \cdot R_S^k(\mu) \right] \quad (12.f)$$

$$ATT^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \left[\alpha_k \cdot T_S^k(\mu) \cdot T_S^k(\mu') + \xi_k \cdot R_S^k(\mu) \cdot R_S^k(\mu') \right] \quad (12.g)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 71 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

On exprime les éléments de la matrice de phase d'ordre S à partir des paramètres α_k , β_k , γ_k , δ_k et ξ_k associés aux développements en polynômes et en fonctions de Legendre d'ordre 2 (relations 75 et 79, en section VII-4.2).

Les fonctions $P_S^k(\mu)$, $R_S^k(\mu)$ et $T_S^k(\mu)$ sont définies à partir des fonctions généralisées de Legendre.

• Fonctions généralisées de Legendre :

Les fonctions généralisées de Legendre $P_{m,n}^k(\mu)$ sont définies par :

$$P_{m,n}^k(\mu) = \frac{(-1)^{k-m}}{2^k \times (k-m)!} \times \sqrt{\frac{(k-m)! (k+n)!}{(k+m)! (k-n)!}} \times (1-\mu)^{-(n-m)/2} \times (1+\mu)^{-(n+m)/2} \times \frac{\partial^{k-n}}{\partial \mu^{k-n}} \left[(1-\mu)^{k-m} \times (1+\mu)^{k+m} \right] \quad (13.a)$$

Elles vérifient la relation de récurrence suivante :

$$\mu \cdot P_{m,n}^k(\mu) = \frac{\sqrt{(k+m+1)(k-m+1)(k+n+1)(k-n+1)}}{(2k+1)(k+1)} \times P_{m,n}^{k+1}(\mu) + \frac{m \cdot n}{k(k+1)} \times P_{m,n}^k(\mu) + \frac{\sqrt{(k+m)(k-m)(k+n)(k-n)}}{(2k+1)k} \times P_{m,n}^{k-1}(\mu) \quad (13.b)$$

• Polynômes de Legendre :

Définition des polynômes de Legendre :

Les polynômes de Legendre sont les fonctions généralisées de Legendre pour lesquelles $m = n = 0$.

On note :

$$P_k(\mu) = P_{0,0}^k(\mu) \quad (14.a)$$

Récurrence sur les polynômes de Legendre :

$$\boxed{(k+1) \times P_{k+1}(\mu) + k \times P_{k-1}(\mu) = (2k+1) \mu \times P_k(\mu)} \quad (14.b)$$

avec pour conditions initiales : $\boxed{P_{-1}(\mu) = 0 \text{ et } P_0(\mu) = 1.}$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 72 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

• **Fonctions de Legendre d'ordre S :**

Définition des fonctions de Legendre d'ordre S :

Les fonctions de Legendre d'ordre S sont les fonctions de Legendre pour lesquelles $n=0$ et $m=S$:

On note :

$$P_S^k(\mu) = P_{S,0}^k(\mu) \quad (15.a)$$

Réurrence sur les fonctions de Legendre d'ordre S :

$$\begin{aligned} (2k+1)\mu P_S^k(\mu) = & \sqrt{(k+S+1)(k-S+1)} \times P_S^{k+1}(\mu) \\ & + \sqrt{(k+m)(k-m)} \times P_S^{k-1}(\mu) \end{aligned} \quad (15.b)$$

avec pour conditions initiales :

$$\begin{cases} P_S^{S-1}(\mu) = 0 \\ P_S^S(\mu) = \frac{\sqrt{(2.S)!}}{2^S \times S!} \times (1-\mu^2)^{S/2} \end{cases}$$

Cas particulier : Réurrence sur les fonctions de Legendre d'ordre 2 :

$$P_2^{k+1}(\mu) = \frac{2k+1}{\sqrt{(k+3)(k-1)}} \times \left[\mu \times P_2^k(\mu) - \frac{\sqrt{(k+2)(k-2)}}{2k+1} \times \mu \times P_2^{k-1}(\mu) \right] \quad (15.c)$$

avec pour conditions initiales :

$$\begin{cases} P_2^0(\mu) = P_2^1(\mu) = 0 \\ P_2^2(\mu) = \frac{3 \times (1-\mu^2)}{2\sqrt{6}} \end{cases} \quad (15.d)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 73 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

• **Fonctions $R_S^k(\mu)$ et $T_S^k(\mu)$:**

Définition :

$$\begin{cases} R_S^k(\mu) = \frac{P_{S,2}^k(\mu) + P_{S,-2}^k(\mu)}{2} \\ T_S^k(\mu) = \frac{P_{S,2}^k(\mu) - P_{S,-2}^k(\mu)}{2} \end{cases} \quad (16.a)$$

Réurrence :

$$\begin{cases} (2k+1)\mu R_S^k(\mu) = a_{k,S} \times R_S^{k+1}(\mu) + b_{k,S} \times R_S^{k-1}(\mu) + c_{k,S} \times T_S^k(\mu) \\ (2k+1)\mu T_S^k(\mu) = a_{k,S} \times T_S^{k+1}(\mu) + b_{k,S} \times T_S^{k-1}(\mu) + c_{k,S} \times R_S^k(\mu) \end{cases} \quad (16.b)$$

avec pour coefficients :

$$\begin{cases} a_{k,S} = \frac{\sqrt{(k+S+1)(k-S+1)(k+3)(k-1)}}{(k+1)} \\ b_{k,S} = \frac{\sqrt{(k+S)(k-S)(k+2)(k-2)}}{k} \\ c_{k,S} = \frac{2.S \times (2k+1)}{k(k+1)} \end{cases} \quad (16.c)$$

et avec pour premiers termes non nul (pour $S \geq 2$)

$$\begin{cases} R_S^S(\mu) = \frac{\sqrt{(2.S)!}}{2^S \times S!} \times \sqrt{\frac{S \times (S-1)}{(S+2) \times (S+1)}} \times (1-\mu^2)^{(S/2-1)} \times (1+\mu^2) \\ T_S^S(\mu) = 2 \times \frac{\sqrt{(2.S)!}}{2^S \times S!} \times \sqrt{\frac{S \times (S-1)}{(S+2) \times (S+1)}} \times \mu \times (1-\mu^2)^{(S/2-1)} \end{cases} \quad (16.d)$$

Cas particuliers :**- S = 0 :**

$$\boxed{T_0^k(\mu) = 0} \quad (17.a)$$

$$\boxed{\begin{cases} R_0^0(\mu) = R_0^1(\mu) = 0 \\ R_0^2(\mu) = \frac{3}{2\sqrt{6}} \times (1 - \mu^2) \end{cases}} \quad (17.b)$$

- S = 1 :

$$\boxed{\begin{cases} R_1^0(\mu) = R_1^1(\mu) = 0 \\ T_1^0(\mu) = T_1^1(\mu) = 0 \end{cases}} \quad (18.a)$$

$$\boxed{\begin{cases} R_1^2(\mu) = \frac{-\mu}{2} \times \sqrt{1 - \mu^2} \\ T_1^2(\mu) = \frac{-1}{2} \times \sqrt{1 - \mu^2} \end{cases}} \quad (18.b)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 75 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VI-4.2 Fonction source d'ordre 1 : SOS FSOURCE ORDRE1

La fonction source d'ordre 1 est calculée selon la relation (6). Le code des Ordres Successifs travaille en luminances normalisées correspondantes à un éclairage solaire valant π .

$$\begin{cases} S_{I_1}^s(\tau, \mu) = \frac{\exp(\tau/\mu_0)}{4} \cdot \omega_0(\tau) \times P_{11}^s(\tau, \mu, \mu_0) \\ S_{Q_1}^s(\tau, \mu) = \frac{\exp(\tau/\mu_0)}{4} \cdot \omega_0(\tau) \times P_{21}^s(\tau, \mu, \mu_0) \\ S_{U_1}^s(\tau, \mu) = \frac{\exp(\tau/\mu_0)}{4} \cdot \omega_0(\tau) \times P_{31}^s(\tau, \mu, \mu_0) \end{cases} \quad (19)$$

avec pour matrice de phase du mélange de molécules et d'aérosols (voir section VIII-1)

$$\omega_0(\tau) P_{ij}^s(\tau, \mu, \mu') = \omega_0^{\text{aer}}(\tau) \text{pcaer}(\tau) \times P_{A_{ij}}^s(\mu, \mu') + \text{pcmol}(\tau) \times P_{M_{ij}}^s(\mu, \mu') \quad (20)$$

La matrice de phase propre aux aérosols est exprimée par :

$$\begin{cases} P_{A_{11}}^s(\mu, \mu_0) = BP^S(\mu, \mu_0) = \sum_{k=S}^{\infty} \beta_k \cdot P_S^k(\mu) \cdot P_S^k(\mu_0) \\ P_{A_{21}}^s(\mu, \mu_0) = GR^S(\mu_0, \mu) = \sum_{k=S}^{\infty} \gamma_k \cdot P_S^k(\mu) \cdot R_S^k(\mu_0) \\ P_{A_{31}}^s(\mu, \mu_0) = -GT^S(\mu_0, \mu) = -\sum_{k=S}^{\infty} \gamma_k \cdot P_S^k(\mu) \cdot T_S^k(\mu_0) \end{cases} \quad (21)$$

et la matrice de phase moléculaire est calculée pour les ordres $S = 0, 1$ et 2 :

$$\begin{cases} P_{M_{11}}^0(\mu, \mu_0) = \beta_0^{\text{mol}} + \beta_2^{\text{mol}} \cdot P_0^2(\mu) \cdot P_0^2(\mu_0) \\ P_{M_{21}}^0(\mu, \mu_0) = \gamma_2^{\text{mol}} \cdot P_0^2(\mu) \cdot R_0^2(\mu_0) \\ P_{M_{31}}^0(\mu, \mu_0) = -\gamma_2^{\text{mol}} \cdot P_0^2(\mu) \cdot T_0^2(\mu_0) \end{cases} \quad (22.a)$$

$$\begin{cases} P_{M_{11}}^1(\mu, \mu_0) = \beta_2 \cdot P_1^2(\mu) \cdot P_1^2(\mu_0) \\ P_{M_{21}}^1(\mu, \mu_0) = \gamma_2 \cdot P_1^2(\mu) \cdot R_1^2(\mu_0) \\ P_{M_{31}}^1(\mu, \mu_0) = -\gamma_2 \cdot P_1^2(\mu) \cdot T_1^2(\mu_0) \end{cases} \quad (22.b)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 76 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

$$\begin{cases} P_{M_{11}}^2(\mu, \mu_0) = \beta_2^{\text{mol}} \cdot P_2^2(\mu) \cdot P_2^2(\mu_0) \\ P_{M_{21}}^2(\mu, \mu_0) = \gamma_2^{\text{mol}} \cdot P_2^2(\mu) \cdot R_2^2(\mu_0) \\ P_{M_{31}}^2(\mu, \mu_0) = -\gamma_2^{\text{mol}} \cdot P_2^2(\mu) \cdot T_2^2(\mu_0) \end{cases} \quad (22.c)$$

VI-4.3 Fonction source d'ordre n : SOS_FSOURCE_ORDREIG

La fonction source d'ordre n est calculée selon la relation (7).

$$\begin{cases} S_{I_n}^s(\tau, \mu) = \frac{\omega_0(\tau)}{2} \cdot \int_0^1 \left[\begin{aligned} &P_{11}^s(\tau, \mu, \mu') \cdot I_{n-1}^s(\tau, \mu') + P_{11}^s(\tau, \mu, -\mu') \cdot I_{n-1}^s(\tau, -\mu') \\ &+ P_{12}^s(\tau, \mu, \mu') \cdot Q_{n-1}^s(\tau, \mu') + P_{12}^s(\tau, \mu, -\mu') \cdot Q_{n-1}^s(\tau, -\mu') \\ &+ P_{13}^s(\tau, \mu, \mu') \cdot U_{n-1}^s(\tau, \mu') + P_{13}^s(\tau, \mu, -\mu') \cdot U_{n-1}^s(\tau, -\mu') \end{aligned} \right] d\mu' \\ S_{Q_n}^s(\tau, \mu) = \frac{\omega_0(\tau)}{2} \cdot \int_0^1 \left[\begin{aligned} &P_{21}^s(\tau, \mu, \mu') \cdot I_{n-1}^s(\tau, \mu') + P_{21}^s(\tau, \mu, -\mu') \cdot I_{n-1}^s(\tau, -\mu') \\ &+ P_{22}^s(\tau, \mu, \mu') \cdot Q_{n-1}^s(\tau, \mu') + P_{22}^s(\tau, \mu, -\mu') \cdot Q_{n-1}^s(\tau, -\mu') \\ &+ P_{23}^s(\tau, \mu, \mu') \cdot U_{n-1}^s(\tau, \mu') + P_{23}^s(\tau, \mu, -\mu') \cdot U_{n-1}^s(\tau, -\mu') \end{aligned} \right] d\mu' \\ S_{U_n}^s(\tau, \mu) = \frac{\omega_0(\tau)}{2} \cdot \int_0^1 \left[\begin{aligned} &P_{31}^s(\tau, \mu, \mu') \cdot I_{n-1}^s(\tau, \mu') + P_{31}^s(\tau, \mu, -\mu') \cdot I_{n-1}^s(\tau, -\mu') \\ &+ P_{32}^s(\tau, \mu, \mu') \cdot Q_{n-1}^s(\tau, \mu') + P_{32}^s(\tau, \mu, -\mu') \cdot Q_{n-1}^s(\tau, -\mu') \\ &+ P_{33}^s(\tau, \mu, \mu') \cdot U_{n-1}^s(\tau, \mu') + P_{33}^s(\tau, \mu, -\mu') \cdot U_{n-1}^s(\tau, -\mu') \end{aligned} \right] d\mu' \end{cases} \quad (23)$$

avec une expression des éléments de la matrice de phase selon la formulation (12) pour chaque composant et selon l'équation (20) pour la relation de mélange des aérosols et des molécules.

VI-4.4 Fonction source d'ordre 1 pour la prise en compte d'une réflexion sur mer plate

La réflexion sur mer plate est un cas particulier géré par la routine SOS_FSOURCE_DIFF_FRESNEL1. On prend en compte la réflexion du faisceau solaire direct par le calcul de la diffusion du rayonnement réfléchi. Le principe est décrit en section IX-2.2.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 77 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-5 Intégration sur le profil atmosphérique

La fonction source est calculée exactement selon les équations (6) et (7) pour les différents niveaux du profil atmosphérique. Les intégrations sur l'épaisseur optique des équations (8) et (11) peuvent alors être calculées entre deux niveaux consécutifs en faisant une approximation de linéarité de la fonction source par rapport à l'épaisseur optique.

$$\boxed{\begin{aligned}\bar{L}_n^{\uparrow}(\tau, \mu) = & \bar{L}_n^{\uparrow}(\tau + \Delta\tau, \mu)e^{-\Delta\tau/\mu} \\ & + (1 - e^{-\Delta\tau/\mu}).(\bar{a}.\mu + \bar{b}) - e^{-\Delta\tau/\mu}.\bar{a}.\Delta\tau\end{aligned}} \quad (24)$$

avec

$$\boxed{\begin{cases} \bar{a} = \frac{\bar{S}_n^s(\tau + \Delta\tau, \mu) - \bar{S}_n^s(\tau, \mu)}{\Delta\tau} \\ \bar{b} = \bar{S}_n^s(\tau, \mu) \end{cases}} \quad (25)$$

De même :

$$\boxed{\begin{aligned}\bar{L}_n^{\downarrow}(\tau, \mu) = & \bar{L}_n^{\downarrow}(\tau - \Delta\tau, \mu)e^{\Delta\tau/\mu} \\ & + (1 - e^{\Delta\tau/\mu}).(\bar{a}.\mu + \bar{b}) + e^{\Delta\tau/\mu}.\bar{a}.\Delta\tau\end{aligned}} \quad (26)$$

avec

$$\boxed{\begin{cases} \bar{a} = \frac{\bar{S}_n^s(\tau, \mu) - \bar{S}_n^s(\tau - \Delta\tau, \mu)}{\Delta\tau} \\ \bar{b} = \bar{S}_n^s(\tau, \mu) \end{cases}} \quad (27)$$

Ce principe d'intégration entre couches est appliqué dans le code des OS. Les intégrations sur le profil et pour les diffusions successives sont ainsi facilement prises en compte. La difficulté de ces calculs repose principalement dans la détermination de la fonction source $\bar{S}_n^s(\tau, \mu)$. La précision de la méthode est discutée en section VI-7.1.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 78 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-6 Tests d'arrêt des développements

Le code des Ordres Successifs fait ses calculs par ordre S de la décomposition en séries de Fourier. L'ordre S de la série est incrémentée à chaque boucle de traitements. Un test permet de stopper les traitements pour l'ordre à partir duquel les ordres supérieurs donnent des contributions insignifiantes.

Pour chaque ordre S de la décomposition en séries de Fourier, le programme distingue les interactions successives. Le cumul des interactions successives est stoppé à l'ordre « igmax » défini par l'utilisateur. Cependant, le logiciel peut trouver une convergence avant cet ordre limite ou constater un apport insignifiant des termes calculés. Dans ce cas, la boucle sur les ordres d'interactions est quittée plus rapidement.

VI-6.1 Tests d'arrêt de calcul des interactions successives

VI.6.1.a CONVERGENCE EN SERIE GEOMETRIQUE

A l'ordre n de diffusion, la routine SOS_PARAM_CONV recherche, sur toutes les directions du champ émergeant au TOA et du champ éclairant la surface, la valeur maximale du rapport suivant pour les fonctions I, Q et U :

$$V_{\max} = \max \left(\frac{\frac{X_n}{X_{n-1}} - \frac{X_{n-1}}{X_{n-2}}}{\left(1 - \frac{X_n}{X_{n-1}}\right)^2} \times \frac{X_n}{\sum_{k=1}^{n-1} X_k} \right) \quad (28)$$

Posons q la raison estimée entre les ordres n-1 et n. Posons q' la raison obtenue pour le rapport d'ordre précédent entre n-2 et n-1. S'il y a convergence dès l'ordre n-2, les valeurs de q et q' sont voisines. On peut réécrire l'équation précédente :

$$V_{\max} = \max \left(\frac{q - q'}{(1 - q)^2} \times \frac{X_n}{\sum_{k=1}^{n-1} X_k} \right) \text{ ou encore } V_{\max} = \max \left(\frac{q - q'}{(1 - q)} \times \frac{\sum_{k=n}^{\infty} X_k}{\sum_{k=1}^{n-1} X_k} \right)$$

Le premier terme du produit en (q-q') / (1-q) doit être petit en régime de convergence. Il en est de même pour le second terme correspondant au rapport des termes restants de la série géométrique sur les termes déjà cumulés.

On estime qu'il y a convergence en série géométrique si : $V_{\max} \leq \text{SOS_PH_SEUIL_CV_SG}$ (constante du fichier SOS.h). La routine SOS_AJOUT_QUEUE calcule alors la valeur de la queue de la série géométrique (somme des termes de l'ordre n à l'infini) qui est ajoutée au cumul des ordres de diffusion précédents. Le

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 79 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

programme arrête de boucler sur les ordres d'interactions et passe au test sur l'ordre S de la décomposition en séries de Fourier.

Pour un comportement en série géométrique à partir de l'ordre n, les valeurs des queues des séries géométriques sont :

$$I_{queue}^s = \frac{I_n^s}{1 - q_I} \quad Q_{queue}^s = \frac{Q_n^s}{1 - q_Q} \quad U_{queue}^s = \frac{U_n^s}{1 - q_U} \quad (29)$$

avec pour raisons : $q_I = I_n^s / I_{n-1}^s$ $q_Q = Q_n^s / Q_{n-1}^s$ $q_U = U_n^s / U_{n-1}^s$

Les valeurs calculées pour l'ordre S de la série de Fourier sont alors :

$$I^s = \sum_{ig=1}^{n-1} I_{ig}^s + I_{queue}^s \quad Q^s = \sum_{ig=1}^{n-1} Q_{ig}^s + Q_{queue}^s \quad U^s = \sum_{ig=1}^{n-1} U_{ig}^s + U_{queue}^s \quad (30)$$

VI.6.1.b IMPORTANCE DE LA CONTRIBUTION D'ORDRE N DE DIFFUSION

Si le premier test est passé, un test supplémentaire est réalisé sur l'importance de la contribution d'ordre n devant le cumul des termes précédents (routine SOS_ARRET_DIFFUS). Le programme recherche, sur toutes les directions du champ émergeant au TOA et du champ éclairant la surface, la valeur maximale des rapports suivants :

$$V_{\max} = \max \left(\begin{array}{l} \left| I_n^s / (I_1^s + I_2^s + \dots + I_n^s) \right| \\ \left| Q_n^s / (Q_1^s + Q_2^s + \dots + Q_n^s) \right| \\ \left| U_n^s / (U_1^s + U_2^s + \dots + U_n^s) \right| \end{array} \right) \quad (31)$$

Arrêt si : $V_{\max} \leq \text{SOS_PH_SEUIL_SUMDIF}$ (contenu dans le fichier SOS.h)

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 80 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-6.2 Test d'arrêt du développement en série de Fourier

Le test d'arrêt de la décomposition en séries de Fourier est réalisé par la routine SOS_ARRET_FOURIER. Le programme recherche, sur toutes les directions du champ émergeant au TOA et du champ éclairant la surface, la valeur maximale des rapports suivants :

$$A_{\max} = \max \left(\begin{array}{c} \left| I^S / \sum_{k=0}^S (2 - \delta_{0k}) \times I^k \right| \\ \left| Q^S / \sum_{k=0}^S (2 - \delta_{0k}) \times Q^k \right| \\ \left| U^S / \sum_{k=0}^S (2 - \delta_{0k}) \times U^k \right| \end{array} \right) \quad (32.a)$$

$$B_{\max} = \max \left(\begin{array}{c} \left| I^S / \sum_{k=0}^S (2 - \delta_{0k}) \times (-1)^k \cdot I^k \right| \\ \left| Q^S / \sum_{k=0}^S (2 - \delta_{0k}) \times (-1)^k \cdot Q^k \right| \\ \left| U^S / \sum_{k=0}^S (2 - \delta_{0k}) \times (-1)^k \cdot U^k \right| \end{array} \right) \quad (32.b)$$

Arrêt si : $\text{Max}(A_{\max}, B_{\max}) \leq \text{SOS_PH_SEUIL_SF}$ (contenu dans le fichier SOS.h)

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 81 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-7 Précision des calculs

Pour un profil d'atmosphère défini, les principales sources d'erreurs des simulations résident dans les calculs d'intégrations sur l'épaisseur optique τ et sur les directions d'incidence $\mu = \cos \theta$ pour le calcul des fonctions sources. Nous rappelons ici brièvement les conclusions sur la précision obtenus par J.L. Deuzé [DR4].

VI-7.1 Intégration sur l'épaisseur optique

Pour chaque ordre de diffusion, le code calcule le champ de rayonnement de proche en proche pour chaque niveau d'épaisseur optique. Ceci implique dans la résolution de l'équation de Transfert de faire des intégrations sur τ entre deux niveaux consécutifs. Ces intégrations font intervenir les fonctions sources de diffusion $S_n(\tau)$, pour l'ordre de diffusion considéré (après intégration sur μ'), qu'on linéarise sur la couche en fonction de l'épaisseur optique. Cette linéarisation entraîne principalement des erreurs pour les premières diffusions, puisque les diffusions multiples ont tendance à homogénéiser le rayonnement et à réduire la variation de la fonction $S_n(\tau)$. C'est pour la diffusion primaire que la source, exponentielle, varie le plus vite avec l'épaisseur optique. Aussi, la précision de l'intégration sur τ est évaluée pour ce cas défavorable.

L'erreur relative entre le calcul exact d'intégration de l'équation de Transfert sur une couche $\Delta\tau$ en diffusion primaire, I_f , par rapport au calcul par linéarisation, I_g , est donnée pour l'intensité par :

$$\frac{I_f - I_g}{I_f} \approx \frac{1}{\mu_0} \times \frac{\Delta\tau^2}{12} \quad (33)$$

pour un développement par rapport à $\Delta\tau$ jusqu'au troisième ordre [DR4], avec $\mu_0 = \cos \theta_s$.

La précision des intégrations sur le profil peut ainsi être estimée à partir de l'épaisseur optique des couches et de la direction d'éclairement. En pratique, pour une épaisseur optique de l'atmosphère valant 0.5 et pour une découpe en 26 couches identiques, l'épaisseur optique de chaque couche est $\Delta\tau \approx 0.02$. Aussi, pour un angle zénithal solaire θ_s compris entre 0 et 75°, au pire l'erreur relative d'intégration sur $\Delta\tau$ est comprise entre 0.003 % et 0.013 %. Le cumul des incertitudes de chaque couche donne une erreur globale d'intégration sur ce profil comprise entre environ 0.02 et 0.07%.

VI-7.2 Intégration spatiale

Le calcul des fonctions sources fait intervenir une intégration sur les directions d'incidence μ . Il utilise une discrétisation en quadrature de Gauss qui, pour 2N points de Gauss μ_k (avec $\mu_{-k} = -\mu_k$) et 2N poids a_k ($a_{-k} = a_k$), permet d'intégrer exactement, sur l'intervalle -1 à 1, un polynôme de μ d'ordre $M \leq 2N-1$. Bien que les fonctions $S_n(\tau)$ qu'intègre le code ne soient pas des polynômes, un critère de qualité repose sur l'ordre 2p du développement en polynômes de Legendre de la matrice de phase. Si $N > p$, on estime que l'intégration est très satisfaisante [DR4]. Pour des calculs typiques de matrice de phase où $2p = 48$, il suffit d'utiliser 24 points de Gauss pour faire une intégration angulaire de qualité (MU24).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 82 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-7.3 Longueur des développements

La précision des calculs dépend du nombre de diffusions successives prises en compte. Il n'est cependant pas nécessaire de pousser trop loin les développements et de calculer des termes de diffusion insignifiants. Nous avons fixé à 10^{-5} le seuil limite d'erreur relative sur I^s , Q^s et U^s pour chaque ordre du développement en séries de Fourier (constante SOS_PH_SEUIL_SUMDIF du fichier SOS.h, routines SOS_ARRET_DIFFUS et SOS_OS).

De même, le calcul des termes de ce développement en séries de Fourier a été poussé jusqu'à obtenir un rapport entre le dernier terme calculé et la somme des termes précédents inférieur à 10^{-4} (constante SOS_PH_SEUIL_SF du fichier SOS.h).

<p>CS SI</p>	<p>Manuel utilisateur du code des OSD</p>	<p>Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 83 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017</p>
---------------------	--	---

VI-8 Calculs des transmissions

VI-8.1 Principe de calcul des transmissions diffuses

Le logiciel permet de solliciter la génération d'un fichier spécifique contenant les valeurs de transmissions. Il faut définir le couple **–SOS.Trans NomDuFichier** pour produire le fichier *NomDuFichier* correspondant. Il s'agit d'un paramètre optionnel : s'il n'est pas défini, il n'y a pas de sortie de transmissions.

La **transmission diffuse descendante** est définie par :

$$t_{\text{dif}}(\theta_s) = \frac{E_{\text{sol}}^{\text{diffus}}}{E_s \times \cos\theta_s} \quad \text{Eclairement diffus du sol (noir) pour un éclairement unité au TOA}$$

Avec :

E_s : l'éclairement solaire au TOA (= π par convention dans le code des OS)

θ_s : l'angle zénithal solaire

$E_{\text{sol}}^{\text{diffus}}$: l'éclairement diffus du sol (noir)

$$\begin{aligned} E_{\text{sol}}^{\text{diffus}} &= \int_0^{2\pi} \int_{-1}^0 L(\mu, \phi)(-\mu).d\mu.d\phi \\ &= 2\pi \int_0^1 L^{\text{IS}=0}(\mu).\mu.d\mu \end{aligned} \quad \text{à calculer pour un sol noir}$$

La **transmission diffuse montante** $t_{\text{dif}}(\theta_v)$ est définie comme étant la luminance diffuse sortant de l'atmosphère pour un éclairement diffus unité étendu à la surface.

Selon le principe de réciprocité, son calcul peut être le même que celui de la transmission diffuse descendante en remplaçant θ_s par θ_v (pris alors comme une incidence).

Le principe d'implémentation est alors simple :

- Pour chacun des angles θ prédéfinis, dont l'angle zénithal solaire, il faut faire un appel de la routine SOS_OS (qui calcule le champ de luminance décomposé en séries de Fourier) pour un sol noir ($\rho_{\text{sol}} = 0$, pas de BRDF ou BPDF), sans modifier les conditions atmosphériques.
- Cette routine fournit alors la valeur $t_{\text{dif}}(\theta, \delta^{\text{tr}})$ (s'agissant d'une intégration limitée à l'ordre $S = 0$, le calcul est très rapide). Il s'agit de la transmission diffuse pour l'épaisseur optique ajustée à la troncature de la fonction de phase.
- Comme la transmission totale (diffuse + directe) doit être la même pour l'épaisseur optique vraie et pour l'épaisseur optique ajustée à la troncature, on en déduit :

$$t_{\text{dif}}(\theta, \delta^{\text{vraie}}) = t_{\text{dif}}(\theta, \delta^{\text{tr}}) + \exp\left(\frac{-\delta^{\text{tr}}}{\cos\theta}\right) - \exp\left(\frac{-\delta^{\text{vraie}}}{\cos\theta}\right)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 84 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Les fichiers de transmission sont de la forme :

```

Solar Zenithal Angle : 30.
Direct transmission TOA -> surface : 0.766760236

Diffuse transmittance : TOA -> surface
  thetas = 30.000    td(thetas) = 0.1154

Diffuse transmittance : surface -> TOA
  thetav = 1.712    td(thetav) = 0.1018
  thetav = 3.929    td(thetav) = 0.1020
  thetav = 6.159    td(thetav) = 0.1023
  thetav = 8.393    td(thetav) = 0.1028
  .
  .
  .
  thetav = 28.511    td(thetav) = 0.1139
  thetav = 30.000    td(thetav) = 0.1154
  thetav = 30.747    td(thetav) = 0.1161
  .
  .
  .
  thetav = 79.938    td(thetav) = 0.3470
  thetav = 82.174    td(thetav) = 0.3811
  thetav = 84.410    td(thetav) = 0.4133
  thetav = 86.646    td(thetav) = 0.4275
  thetav = 88.882    td(thetav) = 0.4040

```

VI-8.2 Validation

Afin de confirmer la justesse de l'implémentation, nous avons simulé le champ de luminance et les transmissions correspondantes pour :

- un sol lambertien d'albédo valant 0,1 – 0,2 – 0,3 ou 0,4.
- une épaisseur optique moléculaire de 0,23 à 440 nm.
- des aérosols du type WMO – modèle Maritime.
- une épaisseur optique aérosols nulle ou de 0,3 à 550 nm (soit 0,3175 à 440 nm).

Sur la base du formalisme 6S, nous avons estimé la valeur de l'albédo sphérique S obtenu pour chacune des directions de visée. Aux approximations prêtes du formalisme, la valeur de S doit être indépendante de la direction de visée. Nous limitons l'analyse aux angles de visée compris entre 0° et 40°.

$$\rho^{\text{TOA}} = \rho^{\text{ATM}} + \rho \times \frac{T_{\text{tot}}(\theta_s) \cdot T_{\text{tot}}(\theta_v)}{1 - \rho \cdot S} \quad \text{pour une réflectance de surface lambertienne } \rho.$$

$$S = \frac{1}{\rho} \times \left[1 - \frac{\rho \cdot T_{\text{tot}}(\theta_s) \cdot T_{\text{tot}}(\theta_v)}{\rho^{\text{TOA}} - \rho^{\text{ATM}}} \right]$$

Cette valeur est de plus comparée à celle estimée par le code 6S pour des conditions de simulations équivalentes.

Cas purement moléculaire :

Épaisseur optique vraie (à 440 nm) : 0,230

$$\theta_s = 32,48^\circ \Rightarrow t_{\text{dif}}(\theta_s) = 0,118$$

$$t_{\text{dir}}(\theta_s) = 0,761$$

$$t_{\text{tot}}(\theta_s) = 0,879$$

		Simulation luminance TOA pour 4 albédos sol ($\Phi=0$)											Dédution S pour 4 albédos sol			
		0,1	0,4	0,5	0,6								0,1	0,4	0,5	0,6
θ_v	Latm	Ltoa	Ltoa	Ltoa	Ltoa	t_{dif}	t_{dir}	t_{tot}	S	S	S	S	S	S	S	S
-39,9	0,110	0,176	0,387	0,462	0,541	0,128	0,741	0,869	0,178	0,170	0,170	0,169	0,178	0,170	0,170	0,169
-36,19	0,106	0,172	0,384	0,460	0,539	0,123	0,752	0,875	0,177	0,170	0,170	0,169	0,177	0,170	0,170	0,169
-32,48	0,102	0,168	0,382	0,458	0,538	0,118	0,761	0,879	0,175	0,170	0,169	0,169	0,175	0,170	0,169	0,169
-28,77	0,098	0,165	0,380	0,456	0,536	0,114	0,769	0,883	0,174	0,170	0,169	0,169	0,174	0,170	0,169	0,169
-25,06	0,095	0,162	0,377	0,454	0,534	0,111	0,776	0,887	0,173	0,170	0,169	0,169	0,173	0,170	0,169	0,169
-21,35	0,092	0,159	0,375	0,452	0,532	0,108	0,781	0,889	0,173	0,170	0,169	0,169	0,173	0,170	0,169	0,169
-17,64	0,088	0,156	0,372	0,450	0,530	0,106	0,786	0,892	0,172	0,170	0,169	0,169	0,172	0,170	0,169	0,169
-13,93	0,085	0,153	0,370	0,447	0,528	0,105	0,789	0,894	0,172	0,170	0,169	0,169	0,172	0,170	0,169	0,169
-10,22	0,083	0,150	0,367	0,445	0,526	0,103	0,792	0,895	0,172	0,170	0,169	0,169	0,172	0,170	0,169	0,169
-6,52	0,080	0,147	0,365	0,443	0,524	0,102	0,793	0,896	0,171	0,170	0,169	0,169	0,171	0,170	0,169	0,169
-2,84	0,077	0,145	0,363	0,440	0,521	0,102	0,794	0,896	0,172	0,170	0,169	0,169	0,172	0,170	0,169	0,169
2,84	0,074	0,141	0,359	0,437	0,518	0,102	0,794	0,896	0,172	0,170	0,169	0,169	0,172	0,170	0,169	0,169
6,52	0,071	0,139	0,357	0,434	0,515	0,102	0,793	0,896	0,171	0,170	0,169	0,169	0,171	0,170	0,169	0,169
10,22	0,069	0,137	0,354	0,432	0,513	0,103	0,792	0,895	0,172	0,170	0,169	0,169	0,172	0,170	0,169	0,169
13,93	0,068	0,135	0,352	0,430	0,510	0,105	0,789	0,894	0,172	0,170	0,169	0,169	0,172	0,170	0,169	0,169
17,64	0,066	0,133	0,350	0,428	0,508	0,106	0,786	0,892	0,172	0,170	0,169	0,169	0,172	0,170	0,169	0,169
21,35	0,065	0,132	0,348	0,425	0,505	0,108	0,781	0,889	0,173	0,170	0,169	0,169	0,173	0,170	0,169	0,169
25,06	0,064	0,131	0,346	0,423	0,503	0,111	0,776	0,887	0,173	0,170	0,169	0,169	0,173	0,170	0,169	0,169
28,77	0,063	0,130	0,345	0,421	0,501	0,114	0,769	0,883	0,174	0,170	0,169	0,169	0,174	0,170	0,169	0,169
32,48	0,063	0,130	0,343	0,420	0,499	0,118	0,761	0,879	0,175	0,170	0,169	0,169	0,175	0,170	0,169	0,169
36,19	0,063	0,130	0,342	0,418	0,497	0,123	0,752	0,875	0,177	0,170	0,170	0,169	0,177	0,170	0,170	0,169
39,9	0,064	0,130	0,341	0,417	0,495	0,128	0,741	0,869	0,178	0,170	0,170	0,169	0,178	0,170	0,170	0,169
Moyenne									0,174	0,170	0,169	0,169	0,174	0,170	0,169	0,169
Ecart-type									0,002	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,000

L'albédo sphérique du moléculaire (pour une épaisseur optique valant 0,23) estimé est de l'ordre de 0,169 à 0,174.

On note une sensibilité de S en fonction de l'angle de visée qui apparaît pour les plus faibles réflectances de surface (0,1) et qui est plus prononcée aux grands angles. Celle-ci est certainement liée à la formulation théorique tendant à accroître les erreurs par le coefficient en $1/\rho$. Aussi, il semble plus significatif de retenir la valeur estimée pour des surfaces plus brillantes : soit $S \approx 0,169$.

Le code 6S donne une valeur cohérente de 0,168 pour $\lambda = 445$ nm (soit pour une épaisseur optique de 0,233).

Cas avec aérosols maritime :

Modèle d'aérosols : WMO Maritime

Épaisseur optique vraie (à 440 nm) : 0,5475 (0,23 MOT + 0,3175 AOT)

$$\theta_s = 32,48^\circ \Rightarrow t_{\text{dif}}(\theta_s) = 0,323$$

$$t_{\text{dir}}(\theta_s) = 0,523$$

$$t_{\text{tot}}(\theta_s) = 0,845$$

		Simulation luminance TOA pour 4 albédos sol ($\Phi=0$)										
		0,1	0,4	0,5	0,6							
θ_v	Latm	Ltoa	Ltoa	Ltoa	Ltoa	t_{dif}	t_{dir}	t_{tot}	S	S	S	S
-39,9	0,141	0,202	0,400	0,472	0,548	0,340	0,490	0,830	0,212	0,212	0,212	0,212
-36,19	0,140	0,201	0,401	0,474	0,550	0,331	0,507	0,838	0,212	0,212	0,212	0,212
-32,48	0,138	0,199	0,401	0,475	0,552	0,323	0,523	0,845	0,213	0,212	0,212	0,212
-28,77	0,130	0,192	0,395	0,469	0,547	0,316	0,535	0,851	0,213	0,212	0,212	0,212
-25,06	0,121	0,184	0,388	0,462	0,541	0,309	0,546	0,856	0,214	0,212	0,212	0,212
-21,35	0,115	0,178	0,383	0,458	0,537	0,304	0,556	0,860	0,214	0,212	0,212	0,212
-17,64	0,110	0,173	0,379	0,454	0,533	0,300	0,563	0,863	0,214	0,212	0,212	0,212
-13,93	0,106	0,169	0,375	0,451	0,530	0,297	0,569	0,866	0,213	0,212	0,212	0,212
-10,22	0,102	0,165	0,372	0,448	0,527	0,294	0,573	0,868	0,213	0,212	0,212	0,212
-6,52	0,099	0,162	0,370	0,446	0,525	0,292	0,576	0,869	0,214	0,212	0,212	0,212
-2,84	0,096	0,160	0,367	0,443	0,523	0,291	0,578	0,869	0,214	0,212	0,212	0,212
2,84	0,090	0,153	0,361	0,436	0,516	0,291	0,578	0,869	0,214	0,212	0,212	0,212
6,52	0,086	0,149	0,356	0,432	0,511	0,292	0,576	0,869	0,214	0,212	0,212	0,212
10,22	0,083	0,146	0,353	0,429	0,508	0,294	0,573	0,868	0,213	0,212	0,212	0,212
13,93	0,081	0,144	0,350	0,426	0,505	0,297	0,569	0,866	0,213	0,212	0,212	0,212
17,64	0,079	0,142	0,348	0,423	0,502	0,300	0,563	0,863	0,214	0,212	0,212	0,212
21,35	0,078	0,141	0,346	0,421	0,500	0,304	0,556	0,860	0,214	0,212	0,212	0,212
25,06	0,078	0,140	0,345	0,419	0,497	0,309	0,546	0,856	0,214	0,212	0,212	0,212
28,77	0,078	0,140	0,343	0,418	0,495	0,316	0,535	0,851	0,213	0,212	0,212	0,212
32,48	0,079	0,141	0,343	0,416	0,493	0,323	0,523	0,845	0,213	0,212	0,212	0,212
36,19	0,081	0,142	0,342	0,415	0,492	0,331	0,507	0,838	0,212	0,212	0,212	0,212
39,9	0,084	0,144	0,342	0,415	0,490	0,340	0,490	0,830	0,212	0,212	0,212	0,212
Moyenne									0,213	0,212	0,212	0,212
Ecart-type									0,001	0,000	0,000	0,000

L'albédo sphérique estimé est de l'ordre de 0,212 à 0,213, avec une forte stabilité angulaire et une faible dépendance à la réflectance de surface.

Le code 6S donne une valeur cohérente de 0,217 (pour $\lambda = 445$ nm - soit pour une épaisseur optique moléculaire de 0,233).

Cas avec aérosols urbain :

Modèle d'aérosols : WMO Urbain

Épaisseur optique vraie (à 440 nm) : 0,6265 (0,23 MOT + 0,3965 AOT)

$$\theta_s = 32,48^\circ \Rightarrow t_{\text{dif}}(\theta_s) = 0,218$$

$$t_{\text{dir}}(\theta_s) = 0,476$$

$$t_{\text{tot}}(\theta_s) = 0,694$$

		Simulation luminance TOA pour 4 albédos sol ($\Phi=0$)										
		0,1	0,4	0,5	0,6							
θ_v	Latm	Ltoa	Ltoa	Ltoa	Ltoa	t_{dif}	t_{dir}	t_{tot}	S	S	S	S
-39,9	0,126	0,166	0,293	0,338	0,385	0,227	0,442	0,669	0,162	0,150	0,150	0,151
-36,19	0,123	0,163	0,293	0,339	0,386	0,223	0,460	0,683	0,167	0,151	0,151	0,151
-32,48	0,119	0,160	0,292	0,339	0,387	0,219	0,476	0,694	0,168	0,151	0,151	0,151
-28,77	0,114	0,156	0,290	0,337	0,386	0,215	0,489	0,704	0,168	0,151	0,151	0,151
-25,06	0,109	0,151	0,287	0,335	0,384	0,212	0,501	0,713	0,168	0,151	0,151	0,151
-21,35	0,104	0,147	0,284	0,332	0,383	0,209	0,510	0,720	0,169	0,151	0,151	0,151
-17,64	0,101	0,144	0,281	0,330	0,381	0,207	0,518	0,725	0,168	0,151	0,151	0,151
-13,93	0,097	0,141	0,279	0,328	0,379	0,206	0,524	0,730	0,169	0,151	0,151	0,151
-10,22	0,094	0,138	0,277	0,326	0,378	0,204	0,529	0,733	0,169	0,151	0,151	0,151
-6,52	0,091	0,135	0,275	0,324	0,376	0,203	0,532	0,736	0,170	0,151	0,151	0,151
-2,84	0,088	0,132	0,272	0,322	0,373	0,203	0,534	0,737	0,165	0,150	0,150	0,151
2,84	0,085	0,129	0,268	0,318	0,369	0,203	0,534	0,737	0,166	0,150	0,150	0,151
6,52	0,082	0,126	0,266	0,316	0,367	0,203	0,532	0,736	0,170	0,151	0,151	0,151
10,22	0,081	0,124	0,263	0,313	0,364	0,204	0,529	0,733	0,169	0,151	0,151	0,151
13,93	0,079	0,123	0,261	0,310	0,361	0,206	0,524	0,730	0,169	0,151	0,151	0,151
17,64	0,078	0,121	0,259	0,308	0,358	0,207	0,518	0,725	0,168	0,151	0,151	0,151
21,35	0,077	0,120	0,257	0,305	0,355	0,209	0,510	0,720	0,169	0,151	0,151	0,151
25,06	0,077	0,119	0,255	0,303	0,352	0,212	0,501	0,713	0,168	0,151	0,151	0,151
28,77	0,077	0,119	0,253	0,300	0,349	0,215	0,489	0,704	0,168	0,151	0,151	0,151
32,48	0,078	0,119	0,251	0,298	0,346	0,219	0,476	0,694	0,168	0,151	0,151	0,151
36,19	0,079	0,120	0,250	0,296	0,343	0,223	0,460	0,683	0,167	0,151	0,151	0,151
39,9	0,082	0,122	0,249	0,294	0,340	0,227	0,442	0,669	0,162	0,150	0,150	0,151
Moyenne									0,168	0,151	0,151	0,151
Ecart-type									0,002	0,000	0,000	0,000

L'albédo sphérique estimé est de l'ordre de 0,151 pour des valeurs d'albédos au-delà de 0,4 avec une forte stabilité angulaire. Il est plus important et dépend de l'angle de visée pour un faible albédo : ceci est mis sur le compte d'une limitation de l'application du modèle simplifié de 6S dans ce cas.

Le code 6S donne une valeur cohérente de 0,151 (pour $\lambda = 445$ nm - soit pour une épaisseur optique moléculaire de 0,233).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 88 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-9 Passage des paramètres à l'exécutable SOS.exe

Le script main_SOS.ksh gère le passage des paramètres au programme SOS.

A ce niveau, le profil des épaisseurs optiques et les paramètres radiatifs des aérosols sont décrits dans des fichiers, aussi :

- Le nom du fichier « Aérosols » est à préciser (-SOS.AerFile).
- Le nom du fichier « Profil » est à préciser (-SOS.ProfileFile).

La BRDF / BPDF de surface est déjà décrite dans un fichier, mais les paramètres correspondant doivent être précisés pour un calcul analytique de la réflexion directe, aussi :

- Le nom du fichier « BRDF / BPDF » est à préciser (-SURF.File).
- Les paramètres –SURF.Alb (albédo) et –SURF.Type (type de surface) sont à préciser.
- Selon la valeur de –SURF.Type, il faut préciser :
 - La vitesse du vent (–SURF.Glitter.Wind)
 - L'indice de réfraction surface / atmosphère (–SURF.Ind)
 - Le nom du fichier « BRDF / BPDF » (–SURF.File).
 - Si –SURF.File est DEFAULT : le répertoire de stockage des fichiers de BRDF / BPDF est à préciser : –SURF.Dir.

Le tableau et les croquis suivants précisent les paramètres de SOS.

<i>PARAMETRES DE DEFINITION DES PROPRIETES RADIATIVES DES PARTICULES</i>	
SOS.MDF	Facteur de dépolarisation moléculaire
SOS.AerFile	Nom du fichier AEROSOLS (chemin complet).
<i>PARAMETRE DE DEFINITION DU PROFIL D'ÉPAISSEURS OPTIQUES</i>	
SOS.ProfileFile	Nom du fichier AEROSOLS (chemin complet).
<i>PARAMETRES DU DEFINITION DES PROPRIETES DE REFLEXION DE SURFACE</i>	
SURF.Alb	Albédo de surface
SURF.Type	Numéro de type de surface 0 : surface lambertienne d'albédo rho 1 : surface lambertienne + glitter (mer agitée) 2 : surface lambertienne + réflexion de Fresnel (mer plate) 3 : surface lambertienne + BRDF de Roujean 4 : surface lambertienne + BRDF de Roujean + BPDF de Rondeaux 5 : surface lambertienne + BRDF de Roujean + BPDF de Bréon 6 : surface lambertienne + BRDF de Roujean + BPDF de Nadal

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 89 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

<i>Si SURF.Type =1 3 4 5 ou 6: pour tous les cas à modèle de BRDF</i>	
SURF.File	Nom du fichier de BRDF / BPDF utilisé : Fichier utilisateur (chemin complet) ou DEFAULT pour utiliser un fichier généré automatiquement.
<i>Si SURF.Type =1 3 4 5 ou 6: et SURF.File = DEFAULT</i>	
SURF.Dir	Répertoire de stockage des fichiers de BRDF / BPDF
<i>Si SURF.Type ≠3: pour tous les modèles, excepté celui de Roujean</i>	
SURF.Ind	Indice de réfraction surface / air
<i>Si SURF.Type = 1 : glitter</i>	
SURF.Glitter.Wind	Vitesse du vent en m/s
<i>Si SURF.Type ≥3 : modèle de BRDF de Roujean</i>	
SURF.Roujean.K0	Paramètre k_0 du modèle de Roujean (exprimé en réflectance)
SURF.Roujean.K1	Paramètre k_1 du modèle de Roujean (exprimé en réflectance)
SURF.Roujean.K2	Paramètre k_2 du modèle de Roujean (exprimé en réflectance)
<i>Si SURF.Type = 6 : modèle de BPDF de Nadal</i>	
SURF.Nadal.Alpha	Paramètre α du modèle de Nadal
SURF.Nadal.Beta	Paramètre β du modèle de Nadal
CONDITIONS D'ECLAIREMENT ET DE VISEE	
SOS.AngFile	Nom du fichier contenant les angles et les ordres maximums des développements à utiliser pour les calculs de luminance (chemin complet)
SOS.View	Indice de type de sortie 1 : plan de visée 2 : diagramme polaire (fichier ascii)
SOS.View.Phi	Azimut relatif (en degrés) Utilisé si SOS.View = 1
SOS.View.Dphi	Pas sur l'azimut en degrés (valeur entière) Utilisé si si SOS.View = 2
CHOIX DU TYPE DE SORTIE	
SOS.OutputLevel	Niveau du profil (optionnel) Si non défini : sortie standard (L_{\uparrow} TOA, L_{\downarrow} sol) n : luminance montante et descendante au niveau n du profil ($0 \leq n \leq \text{SOS_OS_NT}$)
SOS.IGmax	Ordre maximal de diffusion
SOS.Ipolar	Indice de coupure de la polarisation (optionnel) 0 : simulation des OS sans polarisation Si non défini : simulation avec polarisation

NOM DES FICHIERS RESULTATS DES OS

SOS.Log	Nom du fichier trace SOS : <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
SOS.ResBin	Nom du fichier binaire résultat des OS en décomposition en séries de Fourier
SOS.ResFileUp	Nom du fichier ascii résultat pour le champ montant
SOS.ResFileDown	Nom du fichier ascii résultat pour le champ descendant
SOS.Trans	Nom du fichier de sortie (chemin complet) contenant les valeurs de transmission (optionnel)
SOS.ResFileUp.UserAng	Nom du fichier ascii résultat pour le champ montant propre aux angles utilisateur (optionnel)
SOS.ResFileDown.UserAng	Nom du fichier ascii résultat pour le champ descendant propre aux angles utilisateur (optionnel)

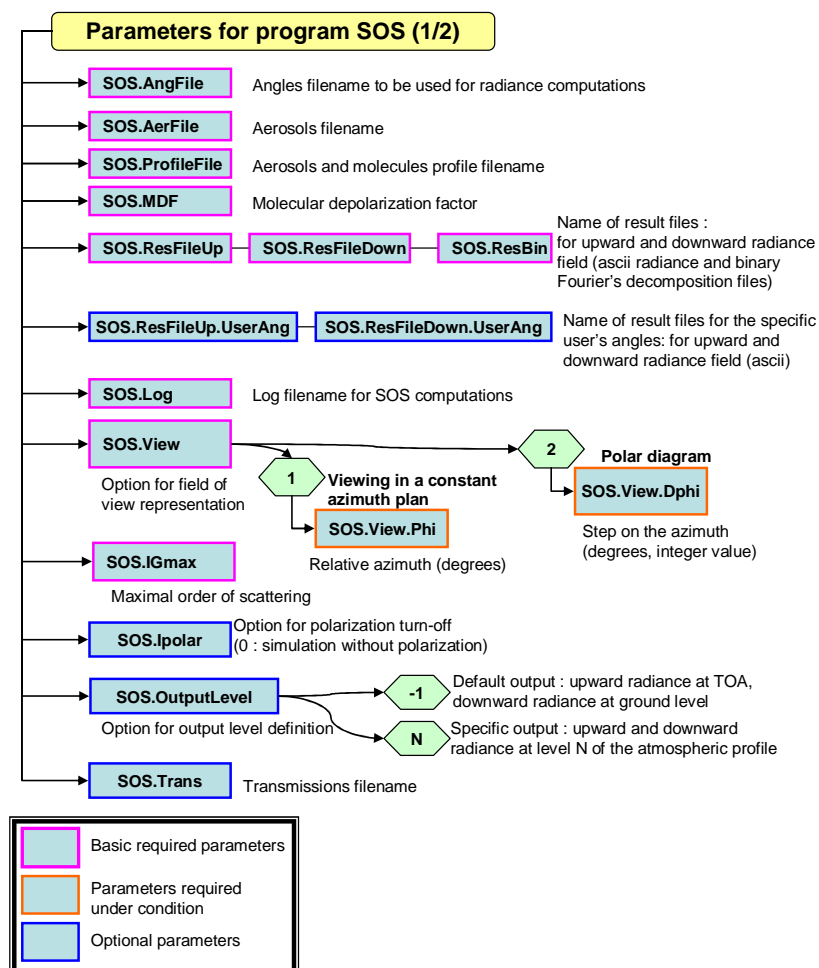


Figure 10 : Paramètres pour l'appel du programme SOS (1/2)

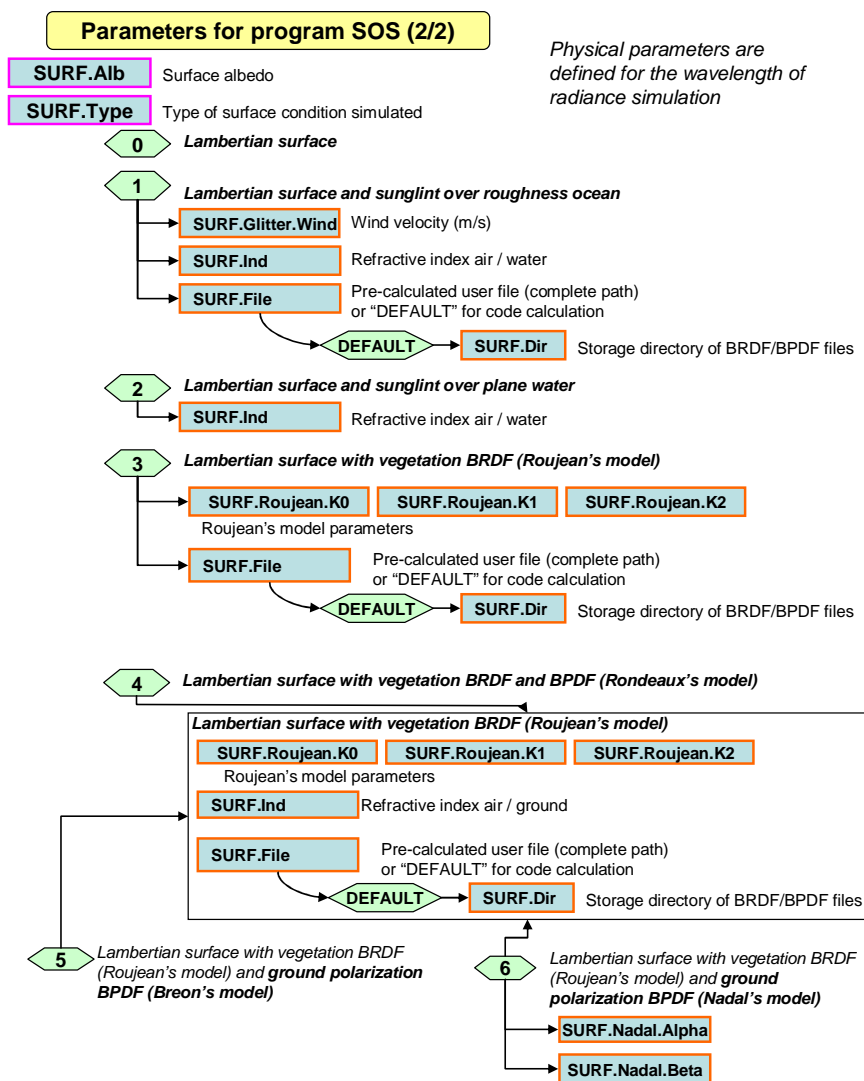


Figure 11 : Paramètres pour l'appel du programme SOS (2/2)

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 92 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-10 Rôle des routines associées au programme SOS

VI-10.1 Programme du fichier SOS

- **SOS** : Programme principal du code des OS
 - gère les entrées / sorties et options de traitements (définies en section III-2),
 - lit les paramètres de granulométries aérosols,
 - lit le profil atmosphérique et l'adapte à une éventuelle troncature de la fonction de phase des aérosols,
 - résout l'équation de transfert radiatif par ordre successif d'interaction (diffusion / réflexion),
 - recombine les paramètres de Stokes à partir de leur décomposition en séries de Fourier.

VI-10.2 Procédures du fichier SOS OS

• **Routine SOS_OS** : Calcule le champ de rayonnement diffus (I, Q, U) dans une atmosphère diffusante. Le champ résultat est décomposé en séries de Fourier.

• **Routine SOS_MAT_FRESNEL_PLAN_REFL** : Calcule les éléments de la matrice de réflexion de Fresnel, exprimée pour un repère lié au plan de réflexion, pour des angles de réflexion équivalents aux angles de Gauss.

• **Routine SOS_NOYAUX** : Calcule les éléments de la matrice de phase des aérosols à l'ordre IS du développement en séries de Fourier. Les calculs utilisent les polynômes et fonctions de Legendre. Ces fonctions sont sorties pour un ordre L=2. Elles sont utiles pour calculer les éléments de la matrice de phase des molécules.

• **Routine SOS_INTEGR_EPOPT** : Réalise l'intégration sur l'épaisseur optique du champ de rayonnement montant et descendant:

- champ montant : Intégration du sol au TOA,
- champ descendant : Intégration du TOA au sol.

L'intégration est faite de proche en proche du niveau de départ au niveau final. Ceci implique dans la résolution de l'Equation de Transfert Radiatif de faire des intégrations sur l'épaisseur optique entre deux niveaux consécutifs. Ces intégrations font intervenir les fonctions sources de diffusion (pour I, Q et U - en fonction du niveau d'épaisseur optique et de la direction de propagation) pour les ordres en cours de diffusion et de décomposition en séries de Fourier. L'intégration entre deux niveaux est faite par linéarisation de la fonction source sur la couche. Les couches atmosphériques sont supposées homogènes.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 93 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

- **Routine SOS_FSOURCE_ORDRE1** : Calcule le vecteur fonction source de la diffusion primaire, à partir du champ de rayonnement solaire incident et des propriétés de diffusion de l'atmosphère (fonction de phase selon l'ordre IS du développement en séries de Fourier). Calcul pour chaque niveau du profil et pour chaque direction de propagation.

- **Routine SOS_FSOURCE_ORDREIG** : Calcule le vecteur fonction source de la diffusion d'ordre $IG > 1$, à partir du champ de rayonnement d'ordre $IG-1$ et des propriétés de diffusion de l'atmosphère (fonction de phase selon l'ordre IS du développement en séries de Fourier). Une intégration spatiale est appliquée sur les directions d'incidence. Calcul pour chaque niveau du profil et pour chaque direction de propagation.

- **Routine SOS_FSOURCE_DIFF_FRESNEL1** : Calcule la fonction source de la diffusion du rayonnement solaire remontant après une réflexion directe sur mer plate, selon les lois de Fresnel (diffusion du champ de réflexion d'ordre 1).

- **Routine SOS_PARAM_CONV** : Calcule le paramètre de convergence pour le test de convergence en série géométrique.

Principe: On analyse la convergence en série géométrique des diffusions successives à partir des ordres $IG-2$, $IG-1$ et IG . Le test est réalisé pour le champ de luminance émergeant au TOA et pour le champ éclairant le sol. S'il y a convergence à ces limites, on admet qu'il y a convergence dans toute l'atmosphère.

Supposons avoir un comportement de série géométrique convergente à partir de l'ordre $IG-2$ de diffusion. La raison de la série est estimée entre les termes $IG-2$ et $IG-1$, ainsi qu'entre les termes $IG-1$ et IG :

- $q = D1 / A1$ (rapport des ordres $IG-1 / IG-2$ pour I)
- $q' = G1 / D1$ (rapport des ordres $IG / IG-1$ pour I)

On teste que q et q' sont voisins (condition pour une approximation de série géométrique). On teste en même temps le rapport de la somme des termes de la série géométrique convergente à partir de l'ordre IG (ordre $IG / (1-q)$) devant la somme des termes précédents (de 1 à $IG-1$, stockée dans I3, Q3 ou U3).

La routine sort le paramètre de convergence Z1 qui est testé par le programme appelant.

- **Routine SOS_ARRET_DIFFUS** : Prépare le test d'arrêt sur les diffusions quand les termes suivants deviennent très petits

- **Routine SOS_ARRET_FOURIER** : Prépare le test d'arrêt sur la décomposition en séries de Fourier.

- **Routine SOS_AJOUT_QUEUE** : Réalise, si on est en régime de convergence, l'ajout de la queue de la série géométrique à la somme des diffusions précédentes.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 94 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VI-10.3 Procédures du fichier SOS TRPHI

• **Routine SOS_TRPHI_OPTION** : Génère les fichiers résultats (en ascii) des paramètres de Stokes I, Q et U selon le choix de l'utilisateur.

• **Routine SOS_TRPHI** : Recombine les termes de la décomposition en séries de Fourier des paramètres de Stokes I, Q et U pour un azimuth relatif fixé. Elle permet de recalculer analytiquement la réflexion directe de surface (glitter ou autres BRDF / BPDF), supprimée des calculs des OS pour réduire l'ordre maximal utile pour la décomposition.

Cette routine calcule également la réflexion du faisceau solaire direct sur mer plate.

• **Routine SOS_GLITTE** : Calcule pour une incidence (mup, phip) sur des vagues la probabilité de réflexion vers la direction (mu, phi). L'agitation de la mer dépend de la vitesse du vent. selon la théorie de Cox et Munck [DR3].

• **Routine SOS_ANGLE** : Calcule:

- le cosinus de l'angle de diffusion entre la direction d'incidence solaire et la direction de visée.
- le cosinus de l'angle de rotation KI'.

• **Routine SOS_REFLEX** : Calcule les éléments R11, R12 et R33 de la matrice de réflexion de Fresnel, exprimée dans un repère lié au plan de réflexion, pour un indice de réfraction de la surface donné.

• **Routine SOS_MATRIC** : Calcule les éléments M11, M21 et M31 de la matrice de réflexion, exprimée dans un repère lié au plan méridien (1^{ère} colonne de la matrice).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 95 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VII- Propriétés radiatives des aérosols

Cette partie précise les traitements relatifs au programme « SOS_AEROSOLS.F » qui définissent les propriétés de diffusion et d'absorption des aérosols. Leur répartition dans l'atmosphère est précisée dans la définition du profil de l'épaisseur optique (section VIII- page 145).

VII-1 Propriétés radiatives caractérisant une couche de particules

- Dans le domaine du visible, une particule peut diffuser ou absorber une partie de l'éclairement qu'elle reçoit. Les propriétés de diffusion et d'absorption d'une particule sphérique, caractérisée par sa taille et sa nature chimique (indice de réfraction), sont décrites par la théorie de Mie [DR17].

Cependant, pour un élément de volume, les aérosols ont des tailles et des natures chimiques pouvant être variables. Pour chaque type de particules, la répartition en taille peut être modélisée par une fonction de granulométrie $n(r)$ (loi mono-modale : log-normale, loi de Junge, etc). Il est également possible de modéliser des mélanges de particules de natures chimiques différentes. C'est le cas des modèles composés de deux modes de granulométries log-normales selon Dubovik et al. [DR6], ou des modèles prédéfinis de la WMO [DR19], établis à partir de composants élémentaires, ou encore des modèles de Shettle & Fenn [DR15] qui introduisent en plus la possibilité de prendre en compte l'impact de l'humidité relative sur les particules.

Pour caractériser globalement les propriétés radiatives d'une granulométrie d'aérosols il faut connaître son albédo de simple diffusion ainsi que sa fonction de phase (incluant la polarisation).

- L'atténuation de la luminance par diffusion au cours de la traversée d'un élément dx d'une couche s'exprime par :

$$dL = -\sigma_d \cdot L \cdot dx \quad (34)$$

où σ_d est le coefficient de diffusion. La théorie de Mie permet de calculer pour une granulométrie $n(r)$ de particules sphériques d'indice de réfraction m :

$$\sigma_d(\lambda, \text{modèle}) = \int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_d(m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr \quad (35)$$

avec Q_d le coefficient d'efficacité en diffusion issu des calculs de Mie. $\pi r^2 Q_d$ est la section efficace d'une particule de rayon r à la longueur d'onde λ .

La section efficace de diffusion représentative d'une particule moyenne de la granulométrie est ainsi :

$$\tilde{\sigma}_d(\lambda, \text{modèle}) = \frac{\int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_d(m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr}{\int_{r=0}^{\infty} n(r) \cdot dr} \quad (36)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 96 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

On définit de même le coefficient d'absorption σ_a et la section efficace d'absorption $\tilde{\sigma}_a$. L'addition des deux effets donne le coefficient d'extinction $\sigma_{\text{ext}} = \sigma_d + \sigma_a$. De ces définitions se déduisent celles de l'albédo de simple diffusion qui caractérise la contribution à l'absorption

$$\omega_0 = \sigma_d / \sigma_{\text{ext}} \quad (37)$$

et de l'épaisseur optique totale pour une traversée Δx

$$\tau(\lambda) = \int_{\Delta x} \sigma_{\text{ext}}(\lambda, x) dx \quad (38)$$

NB : L'épaisseur optique de la couche d'aérosols peut s'exprimer pour la longueur d'onde λ en fonction de sa valeur pour une longueur d'onde λ_{ref} par :

$$\tau(\lambda) = \tau(\lambda_{\text{ref}}) \times \frac{\tilde{\sigma}_{\text{ext}}(\lambda)}{\tilde{\sigma}_{\text{ext}}(\lambda_{\text{ref}})} \quad (39)$$

• La fonction de phase renseigne sur la répartition directionnelle de l'énergie diffusée. Comme le précise le manuel scientifique [DR9], pour une expression de la lumière en vecteur de Stokes, la diffusion d'un vecteur $\tilde{L}_\lambda(\tau, \mu', \phi')$ en $\tilde{L}_\lambda(\tau, \mu, \phi)$, pour la profondeur τ , s'écrit :

$$d\tilde{L}_\lambda(\tau, \mu, \phi) = \frac{\omega_\lambda(\tau)}{4\pi} \cdot \tilde{P}_\lambda(\tau, \mu, \phi, \mu', \phi') \cdot \tilde{L}_\lambda(\tau, \mu', \phi') \cdot \frac{d\tau}{\mu} \quad (40)$$

L'expression de la matrice de phase, pour un repère lié au plan de diffusion, est :

$$\tilde{P}_{\lambda, \text{mod}}(\Theta) = \begin{bmatrix} P_{11}(\Theta) & P_{12}(\Theta) & 0 & 0 \\ P_{12}(\Theta) & P_{22}(\Theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\Theta) & -P_{43}(\Theta) \\ 0 & 0 & P_{43}(\Theta) & P_{44}(\Theta) \end{bmatrix} \text{ appliquée aux 4 paramètres de Stokes (41.a)}$$

$$\tilde{P}_{\lambda, \text{mod}}(\Theta) = \begin{bmatrix} P_{11}(\Theta) & P_{12}(\Theta) & 0 \\ P_{12}(\Theta) & P_{22}(\Theta) & 0 \\ 0 & 0 & P_{33}(\Theta) \end{bmatrix} \text{ appliquée aux paramètres (I, Q, U) uniquement (41.b)}$$

avec $P_{11}(\Theta)$ la fonction de phase des particules, les autres termes exprimant la polarisation.

Pour des particules sphériques, on a la simplification suivante : $\begin{cases} P_{22} = P_{11} \\ P_{33} = P_{44} \end{cases}$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 97 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Dans le **cas de particules sphériques**, ces fonctions sont aisément calculables à partir de la théorie de Mie, pour un type de particules (indice de réfraction, granulométrie) et une longueur d'onde donnée, par :

$$P_{11}(\lambda, \Theta) = \frac{1}{\sigma_d(\lambda)} \times \int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_d(m, r, \lambda) \cdot P_{mie}(\Theta, m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr \quad (42.a)$$

$$P_{12}(\lambda, \Theta) = \frac{1}{\sigma_d(\lambda)} \times \int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_d(m, r, \lambda) \cdot Q_{mie}(\Theta, m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr \quad (42.b)$$

$$P_{33}(\lambda, \Theta) = \frac{1}{\sigma_d(\lambda)} \times \int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_d(m, r, \lambda) \cdot T_{mie}(\Theta, m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr \quad (42.c)$$

Dans le cas d'un mélange de particules une combinaison de ces fonctions élémentaires est à réaliser (cf. section VII.5.1.a - page 126).

Le **cas de particules non-sphériques** est possible par l'ingestion de fonctions de phase provenant d'une source externe (cf. section VII-8, page 140).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 98 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

VII-2 Application au code des OS : Programme SOS AEROSOLS

Le programme SOS_AEROSOLS.F gère l'ensemble des traitements permettant la création d'un fichier de données « AEROSOLS » au format requis par le code des OS. Il gère les différents cas de simulations.

VII-2.1 Propriétés radiatives des aérosols requises pour le code des OS

Les propriétés de diffusion d'une granulométrie d'aérosols sont caractérisées par une **matrice de phase** et par un **albédo de simple diffusion** des particules.

Le code des OS fonctionne à partir d'une décomposition en séries de Fourier du champ de luminance. La matrice de phase est adaptée à ce formalisme et dépend de l'ordre S de la décomposition. Les éléments de la matrice de phase sont alors calculés à partir d'un jeu de coefficients la caractérisant (voir leur définition en section VII-4 - page 118).

L'objectif des traitements du programme « SOS_AEROSOLS.F » est de calculer l'albédo de simple diffusion d'un modèle d'aérosols ainsi que les paramètres de la matrice de phase utiles pour le code des OS. Un fichier « AEROSOLS » résultat contient l'information utile au code des OS.

VII-2.2 Contenu et format d'un fichier AEROSOLS pour le code des OS

Un fichier « Aérosols » pour les OS est un fichier Ascii formaté. Il est structuré comme suit :

EXTINCTION CROSS SECTION (mic^2) : $\tilde{\sigma}_e$			
SCATTERING CROSS SECTION (mic^2) : $\tilde{\sigma}_d$			
ASYMMETRY FACTOR (no truncation) : g			
TRUNCATION COEFFICIENT : A			
SINGLE SCATTERING ALBEDO (truncation) : ω_0			
PHASE MATRIX COEFFICIENTS FOR K=0 TO OS_NB			
ALPHA(K)	BETA11(K)	GAMMA12(K)	ZETA(K)
α_0	β_0	γ_0	ξ_0
α_1	β_1	γ_1	ξ_1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
α_{OS_NB}	β_{OS_NB}	γ_{OS_NB}	ξ_{OS_NB}

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 99 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Lignes 1 à 3 : Informations générales (les valeurs ne sont pas ajustées pour une troncature)

- section efficace d'extinction (en μm^2) : $\tilde{\sigma}_e$
- section efficace de diffusion (en μm^2) : $\tilde{\sigma}_d$
- facteur d'asymétrie ($g = \beta_1 / 3$).

Format : Un commentaire explicite suivi du séparateur « : » puis la valeur à renseigner

NB :

- Le séparateur « : » est utilisé pour la récupération de la valeur du paramètre. Il ne doit pas être modifié.
- Les données de cette première ligne ne sont qu'informatives. Elles sont lues mais ne sont pas utilisées par le code des OS. A l'exception de la section efficace d'extinction qui est utilisée par le script principal main_SOS.ksh pour le portage de l'épaisseur optique aérosols d'une longueur d'onde de référence vers la longueur d'onde de simulation du champ de rayonnement.

4^{ème} ligne : Coefficient de troncature A (nul s'il n'y a pas de troncature de la fonction de phase).

Format : Un commentaire explicite suivi du séparateur « : » puis la valeur à renseigner

5^{ème} ligne : Albédo de simple diffusion ω_0 (éventuellement tronqué si $A \neq 0$).

Format : Un commentaire explicite suivi du séparateur « : » puis la valeur à renseigner

6^{ème} et 7^{ème} lignes : Commentaires

Lignes suivantes : Coefficients de la matrice de phase $\alpha_k, \beta_k, \gamma_k, \xi_k$ (éventuellement tronqués si $A \neq 0$) pour $k = 0$ à OS_NB (ordre maximal des développements défini dans le fichier ANGLES et lié au nombre d'angles de Gauss utilisés).

Format : **E15.8, 3(1X, E15.8)**

VII-2.3 Choix de simulation d'un modèle d'aérosols

- **Fichier utilisateur** : l'utilisateur peut utiliser un fichier « Aérosols » déjà existant. Ce fichier doit être au format requis par le code des OS (section VII-2.2).

L'utilisateur peut aussi générer de nouveaux fichiers « Aérosols ». L'appel du programme n'est réalisé que si le nom du fichier d'aérosols est entré comme « DEFAULT ». Sinon, le code des OS utilise directement le fichier dénommé (supposé être un fichier utilisateur prédéfini). L'utilisateur dispose de trois possibilités :

- **Modèle mono-modal** : Deux types de granulométries d'aérosols
 - *distribution log-normale,*
 - *loi de Junge.*

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 100 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

- **Modèles de la WMO [DR19]** : simulation d'un modèle d'aérosols à partir des composants élémentaires de la WMO (« Dust Like », « Water Soluble », « Oceanic », « Soot »).

Les modèles possibles sont :

- *Average continental*
- *Maritime*
- *Urban*
- *User mixture* (proportions à préciser).

- **Modèles de Shettle & Fenn [DR15]** : simulation d'un modèle d'aérosols à partir des composants élémentaires de Shettle & Fenn (« Small rural », « Large rural », « Small urban », « Large urban », « Oceanic »). Il est possible de prendre en compte l'humidité relative de l'atmosphère.

Les modèles possibles sont :

- *Troposphérique (small rural aerosols)*
- *Maritime*
- *Urbain*
- *Côtier*

- **Modèles bimodaux de Log-Normales [DR6]** : simulation d'un modèle d'aérosols combinant deux types de particules de natures chimiques différentes (indice de réfraction) et de distributions en tailles distinctes, représentées par des granulométries Log-Normales.

Les proportions relatives du « mode fin » et du « mode grossier » peuvent être renseignées de deux manières :

- *Les coefficients sont directement fournis par l'utilisateur (concentration volumique de chaque mode).*
- *Les coefficients sont estimés à partir du rapport de l'épaisseur optique du mode grossier sur l'épaisseur optique aérosols totale (combinant les deux modes).*

- **Fonctions de phase de source externe** : utilisation de fonctions de phase (intensité et polarisation) produites en dehors du code des OS. Cette fonctionnalité permet la simulation de la diffusion de particules non-sphériques à orientation aléatoire.

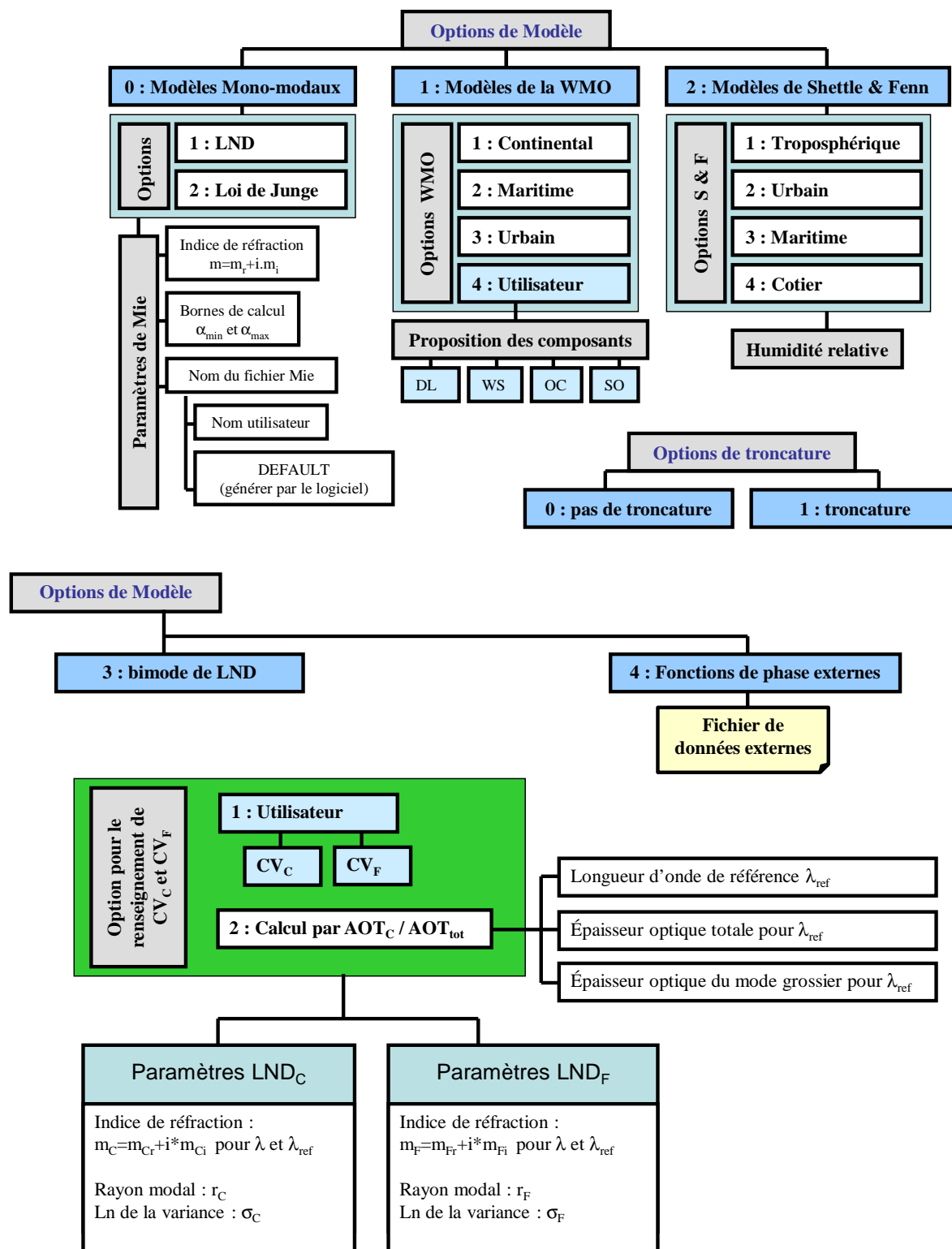
L'utilisateur a la possibilité de solliciter une **troncature de la fonction de phase** (méthode numérique nécessaire pour les grosses particules présentant une très forte diffusion vers l'avant, voir la section VII-4.3).

- Si une troncature est demandée (option à 1) mais que le coefficient de troncature estimé par le logiciel est faible, la troncature n'est alors pas réalisée.
- En cas d'application d'une troncature sur la fonction de phase, les autres paramètres radiatifs sont adaptés pour que la luminance de cette atmosphère équivalente soit la même que celle de l'atmosphère réelle simulée.
- **Le profil atmosphérique en entrée du code des OS est toujours un profil sans ajustement pour une troncature.** Les adaptations nécessaires sont réalisées par les pré-traitements du code des OS (cf. section VIII- page 145). Si le « fichier Aérosols » et le « fichier Profil » sont des fichiers utilisateurs,

la réalisation d'une troncature sur la fonction de phase est repérée par la valeur du coefficient de troncature dans le « fichier Aérosols ».

Les choix de simulations sont introduits dans le Khorn-Shell de lancement (chapitre III-2).

Paramètres de simulations pour l'usage du programme « AEROSOLS »



CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 102 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-2.4 Passage des paramètres à l'exécutable SOS AEROSOLS.exe

Le script main_SOS.ksh gère le passage des paramètres au programme SOS_AEROSOLS.

Ce programme calcule les propriétés radiatives des aérosols pour une longueur d'onde donnée, aussi :

- Le nom du fichier à produire est à préciser (-AER.ResFile, mais pas AER.UserFile).
- La longueur d'onde -AER.Wa est à définir.
- L'épaisseur optique des aérosols est à préciser -AER.AOT pour la longueur d'onde -AER.Wa.
 - L'usage d'informations pour une longueur d'onde de référence n'a lieu que pour les modèles bi-modaux de LND, dans le cas où la proportion de particules entre le mode fin et le mode grossier est donnée par le rapport de l'épaisseur optique du mode grossier sur l'épaisseur optique totale pour la longueur d'onde de référence (-AER.BMD.CVdef 2).
 - Pour le cas d'un modèle mono-modal, il n'est pas à préciser -AER.MMD.MRwaref ni -AER.MMD.MIwaref.

Le tableau et les croquis suivants précisent les paramètres de SOS_AEROSOLS.

PARAMETRES DE MODELISATION DES AEROSOLS	
AER.AngFile	Nom du fichier contenant les angles et les ordres maximums des développements à utiliser pour les calculs de fonctions de phase (chemin complet)
AER.MieLog	Nom du fichier trace des calculs de Mie <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
AER.Log	Nom du fichier trace des calculs du programme AEROSOLS <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
AER.ResFile	Nom par défaut du fichier AEROSOLS créé par le code (chemin complet) Fichier écrasé à chaque simulation
AER.DirMie	Nom du répertoire de stockage des fichiers MIE (chemin complet)
AER.AOT	Epaisseur optique d'extinction des aérosols pour la longueur d'onde AER.Wa
AER.Wa	Longueur d'onde de référence (en μm) pour la simulation des propriétés radiatives des aérosols
AER.Tronca	Indice de troncature 0 : pas de troncature 1 : troncature

<h1>CS SI</h1>	<h2>Manuel utilisateur du code des OSD</h2>	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 103 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
----------------	---	---

Aérosols : granulométrie	
AER.Model	Type de modèle d'aérosols 0 : modèle mono-modal 1 : modèle multi-modal de la WMO 2 : modèle bi-modal de Shettle & Fenn 3 : modèle bi-modal de Log-Normale 4 : fonctions de phase de source externe
Si AER.Model = 0 : paramètres de Mie (granulométrie mono-modale)	
AER.MMD.Mie.Filename	Nom du fichier de Mie qui sera stocké sous dirMIE Nom utilisateur ou DEFAULT pour que le code définisse le nom par défaut
AER.MMD.Mie.AlphaMax	Valeur maximale du paramètre de taille
AER.MMD.MRwa	Partie réelle de l'indice de réfraction pour la longueur d'onde de simulation
AER.MMD.MIwa	Partie imaginaire de l'indice de réfraction (valeur négative) pour la longueur d'onde de simulation
Si AER.Model = 0 : paramètres de la granulométrie mono-modale	
AER.MMD.SDtype	Numéro du modèle 1 : granulométrie Log-Normale 2 : loi de Junge
AER.MMD.SDparam1	Paramètre de la granulométrie Si LND : rayon modal (en µm) Si Junge : rayon minimal (en µm)
AER.MMD.SDparam2	Paramètre de la granulométrie Si LND : log népérien de la variance Si Junge : puissance appliquée au rayon
Si AER.Model = 1 modèle de la WMO	
AER.WMO.Model	Modèle de la WMO 1 : Continental 2 : Maritime 3 : Urbain 4 : Défini par l'utilisateur
Si AER.WMO.Model = 4 : proportions de l'utilisateur (somme=1)	
AER.WMO.DL	Proportion volumique du composant « Dust-Like » (valeur entre 0 et 1)
AER.WMO.WS	Proportion volumique du composant « Water Soluble » (valeur entre 0 et 1)
AER.WMO.OC	Proportion volumique du composant « Oceanic » (valeur entre 0 et 1)
AER.WMO.SO	Proportion volumique du composant « Soot » (valeur entre 0 et 1)
Si AER.Model = 2 : modèle de Shettle & Fenn	
AER.SF.Model	Modèle de Shettle & Fenn 1 : Troposphérique 2 : Urbain 3 : Maritime 4 : Côtier
AER.SF.RH	Pourcentage d'humidité relative (de 0 à 99%)
Si AER.Model = 3 : modèle bimodal de LND	
AER.BMD.CVdef	Choix du mode de description du mélange 1 : Utilisation de concentrations volumiques prédéfinies 2 : Utilisation du rapport de l'épaisseur optique du mode grossier / épaisseur optique totale
Si AER.BMD.Option= 1 : concentrations volumiques de l'utilisateur	
AER.BMD.CoarseVC	Concentration volumique des particules du mode grossier
AER.BMD.FineVC	Concentration volumique des particules du mode fin
Si AER.BMD.Option= 2 : Utilisation du rapport d'épaisseurs optiques mode grossier / totale	
AER.BMD.RAOT	Rapport de l'épaisseur optique du mode grossier / épaisseur optique totale pour la longueur d'onde de référence.
AER.Waref	Longueur d'onde de référence (en µm) pour la simulation des propriétés radiatives des aérosols

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 104 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

AER.AOTref	Epaisseur optique d'extinction des aérosols pour la longueur d'onde de référence
AER.BMD.CM.MRwaref	Partie réelle de l'indice de réfraction des particules du mode grossier pour la longueur d'onde de référence
AER.BMD.CM.MIwaref	Partie imaginaire de l'indice de réfraction des particules du mode grossier pour la longueur d'onde de référence
AER.BMD.FM.MRwaref	Partie réelle de l'indice de réfraction des particules du mode fin pour la longueur d'onde de référence
AER.BMD.FM.MIwaref	Partie imaginaire de l'indice de réfraction des particules du mode fin pour la longueur d'onde de référence
<i>Paramètres de la LND du mode grossier</i>	
AER.BMD.CM.MRwa	Partie réelle de l'indice de réfraction des particules du mode grossier pour la longueur d'onde de simulation
AER.BMD.CM.MIwa	Partie imaginaire de l'indice de réfraction des particules du mode grossier pour la longueur d'onde de simulation
AER.BMD.CM.SDradius	Rayon modal de la granulométrie LND du mode grossier (en μm)
AER.BMD.CM.SDvar	Log népérien de la variance de la granulométrie LND du mode grossier
<i>Paramètres de la LND du mode fin</i>	
AER.BMD.FM.MRwa	Partie réelle de l'indice de réfraction des particules du mode fin pour la longueur d'onde de simulation
AER.BMD.FM.MIwa	Partie imaginaire de l'indice de réfraction des particules du mode fin pour la longueur d'onde de simulation
AER.BMD.FM.SDradius	Rayon modal de la granulométrie LND du mode fin (en μm)
AER.BMD.FM.SDvar	Log népérien de la variance de la granulométrie LND du mode fin
<i>Si AER.Model = 4 : fonctions de phase de source externe</i>	
AER.ExtData	Nom du fichier des données externes de fonctions de phase (chemin complet)

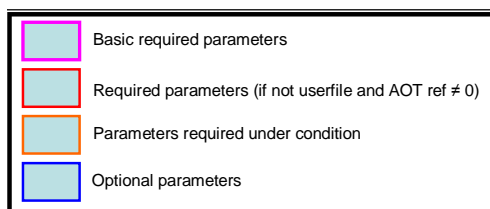
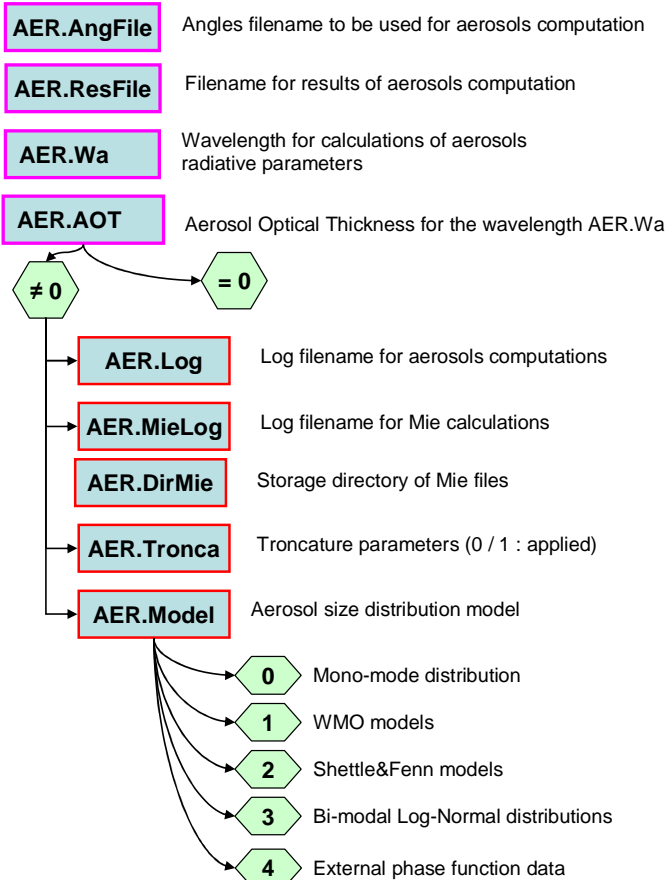
Parameters for program SOS_AEROSOLS

Figure 12 : Paramètres aérosols (1/2) pour l'appel de SOS_AEROSOLS

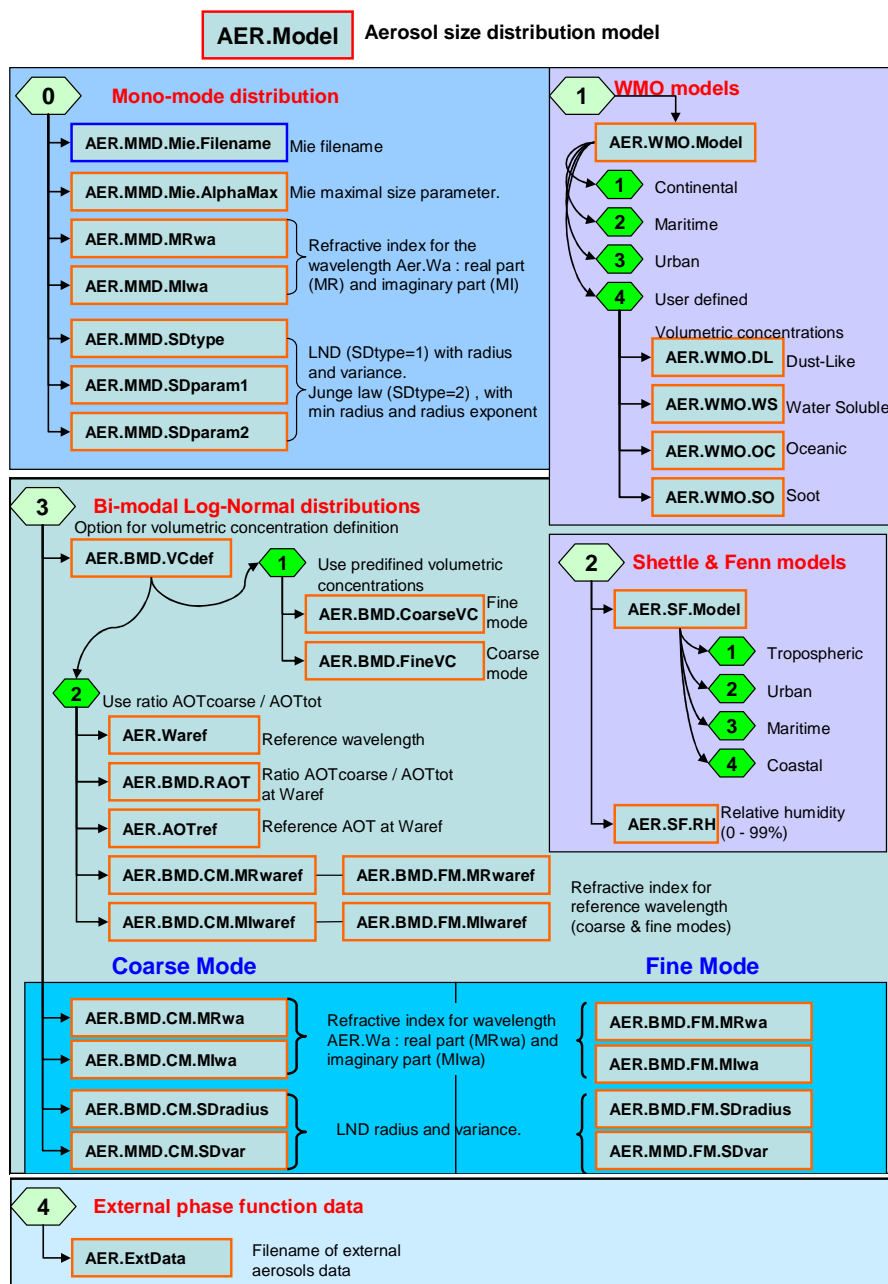


Figure 13 : Paramètres aérosols – détail des options du modèle (2/2) pour l'appel du programme SOS_AEROSOLS

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 107 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-3 Calculs de Mie

Le fichier SOS_MIE.F contient les codes sources relatifs aux calculs de Mie :

- routine principale : SOS_MIE
- routines SOS_XERO et SOS_FPHASE_MIE

VII-3.1 Objectif des traitements

Ce programme applique la théorie de diffusion de Mie pour une particule sphérique et homogène. Les propriétés radiatives de la particule dépendent :

- de sa nature chimique, caractérisée par son indice de réfraction $m = m_r + i m_i$ (avec $m_i < 0$ qui exprime l'absorption),
- du paramètre de taille $\alpha = 2\pi r/\lambda$, où r est le rayon de la particule et λ la longueur d'onde de la lumière incidente.

Paramètres physiques d'entrée		SOS_MIE.F
Nom	Variables physiques	
RN	Indice de réfraction : partie réelle m_r	
IN	Indice de réfraction : partie imaginaire m_i (valeur négative)	
ALPHA0	Paramètre de taille minimal : α_{\min}	
ALPHA F	Paramètre de taille maximal : α_{\max}	

La théorie de Mie permet d'aboutir à l'expression :

- du coefficient d'efficacité en diffusion : $Q_d(m, \alpha)$,
- du coefficient d'efficacité en extinction : $Q_e(m, \alpha)$,
- du facteur d'anisotropie : $G(m, \alpha)$,
- de la matrice de phase de Mie, en fonction de l'angle de diffusion Θ compris entre 0 et π :

$$\underset{\sim}{P}(\Theta, m, \alpha) = \begin{pmatrix} P(\Theta, m, \alpha) & Q(\Theta, m, \alpha) & 0 & 0 \\ Q(\Theta, m, \alpha) & P(\Theta, m, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T(\Theta, m, \alpha) & -R(\Theta, m, \alpha) \\ 0 & 0 & R(\Theta, m, \alpha) & T(\Theta, m, \alpha) \end{pmatrix} \quad (43)$$

En pratique, l'ellipticité de la lumière polarisée est négligeable. Aussi la fonction $R(\Theta, m, \alpha)$ n'est pas calculée.

NB : la fonction de phase $P(\Theta, m, \alpha)$ est normalisée :

$$\iint_{\text{espace}} \left(P(\Theta, m, \alpha) \cdot \frac{d\omega}{4\pi} \right) = 1 \quad (44)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 108 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Le code de Mie réalise ces calculs pour des valeurs du paramètre α comprises entre α_{\min} et α_{\max} avec un pas $\Delta\alpha$ défini par :

$$\begin{array}{ll}
\alpha \leq 0,1 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,0001 \\
0,1 < \alpha \leq 1,0 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,001 \\
1,0 < \alpha \leq 10 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,01
\end{array}
\qquad
\begin{array}{ll}
10 < \alpha \leq 30 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,05 \\
30 < \alpha \leq 100 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,1 \\
100 < \alpha & \Rightarrow \Delta\alpha = 1,0
\end{array}$$

VII-3.2 Choix des données en entrée

Les valeurs des paramètres physiques d'entrée doivent être choisies en fonction de l'utilisation escomptée des simulations de Mie. Il faut connaître :

- la longueur d'onde de simulation des OS,
- la taille limite approximative des particules de la granulométrie utilisée.

L'indice de réfraction dépend de la nature chimique des particules et de la longueur d'onde considérée. On en trouve des valeurs tablées dans la littérature.

Le paramètre de taille dépend du rayon r des particules et de la longueur d'onde, $\alpha = 2\pi r/\lambda$. La borne minimale α_{\min} est posée égale à 10^{-4} par défaut (il n'est pas nécessaire de la modifier). La borne maximale α_{\max} est à définir en fonction de la connaissance de la taille des particules et de la longueur d'onde qui sera utilisée. A même longueur d'onde, on poussera les calculs de Mie jusqu'à une valeur plus importante de α_{\max} pour une simulation des OS avec de grosses particules plutôt que des petites.

La dimension des tableaux pour le calcul des fonctions de Ricatti-Bessel est fixée par défaut à SOS_MIE_DIM = 10000 (dans SOS.h). Cette taille permet un développement des calculs jusqu'à une valeur α_{\max} voisine de 4990. Le code des OS fonctionne dans le domaine du visible. Pour une longueur d'onde de $0,44 \mu\text{m}$, la dimension maximale des particules peut alors être de $350 \mu\text{m}$. En pratique, la taille des particules n'est jamais aussi importante. La valeur de α_{\max} peut souvent n'être que de quelques centaines.

L'utilisateur a la possibilité de modifier la valeur maximale du paramètre de taille dans le cas des simulations de granulométries mono-modales. Pour l'utilisation des modèles bimodaux définis par l'utilisateur, ou des modèles prédéfinis de la WMO et de Shettle&Fenn, la valeur du paramètre de taille maximale est imposée par le logiciel (voir sections VII.5.1.bet VII-6.1).

Adapter les valeurs limites du paramètre de taille permet de réduire la taille du fichier de Mie généré et les temps de calcul du code de Mie. La lecture du fichier pour les calculs des OS est peu dépendante de sa taille. De gros fichiers ne pénalisent pas les performances du code des OS. L'utilisateur peut ainsi préférer garder une borne α_{\max} assez importante pour toutes ses simulations de granulométries mono-modales. Il aura cependant besoin d'un espace disque suffisant pour stocker ses différents fichiers de Mie. Un fichier généré pour $\alpha_{\min} = 10^{-4}$ et $\alpha_{\max} = 10^3$, avec l'utilisation d'un fichier d'angles de Gauss de 40 termes, occupe 4,6 Mb.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 109 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-3.3 Description des fichiers de sortie

- **Fichier de MIE résultat** : Fichier binaire, non formaté

1 enregistrement d'entête

	Type	Nb d'enregistrements
Partie réelle de l'indice de réfraction : m_r	Dble	1
Partie imaginaire de l'indice de réfraction : m_i	Dble	1
Paramètre de taille limite : α_{\max}	Dble	1
Nombre d'angle de Gauss positifs utilisés : MIE_NBMU	Integer*4	1

1 enregistrement par valeur du paramètre de taille

	Type	Nb d'enregistrements
Paramètre de taille : α	Real*4	1
Coefficient d'efficacité en extinction : $Q_e(m, \alpha)$	Real*4	1
Coefficient d'efficacité en diffusion : $Q_d(m, \alpha)$	Real*4	1
Facteur d'anisotropie : $G(m, \alpha)$	Dble	1
Fonction de phase de Mie : $P_{mie}(\mu, m, \alpha)$	Real*4	2*MIE_NBMU+1
<i>Enregistrement du tableau pour (2*MIE_NBMU+1) valeurs de μ.</i>		
Fonction de phase de Mie polarisée : $Q_{mie}(\mu, m, \alpha)$	Real*4	2* MIE_NBMU+1
Fonction de phase de Mie polarisée : $T_{mie}(\mu, m, \alpha)$	Real*4	2* MIE_NBMU+1

- **Fichier Trace** : Fichier texte Ascii

Le fichier trace n'est pas créé si l'utilisateur saisit 0 en place de son nom.

Rappel des paramètres de simulations :

- partie réelle de l'indice de réfraction : m_r
- partie imaginaire de l'indice de réfraction : m_i
- Paramètres de tailles limites : α_{\min} et α_{\max}
- Nombre d'angles de Gauss

Pour chaque valeur de α :

- valeur de α
- valeur du coefficient d'efficacité en extinction
- valeur du coefficient d'efficacité en diffusion
- valeur du facteur d'anisotropie

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 110 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-3.4 Relation théorie / algorithm

Comme le précise la Notice Scientifique, les propriétés radiatives de la diffusion de Mie peuvent s'exprimer à partir de suites de coefficients complexes $a_n(m, \alpha)$ et $b_n(m, \alpha)$, ainsi que de fonctions réelles $\pi_n(\mu)$ et $\tau_n(\mu)$.

Les éléments de la matrice de phase s'expriment, pour un angle de diffusion Θ , par :

$$\begin{cases} P(\Theta, m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2 \times Q_d} (S_2 \cdot S_2^* + S_1 \cdot S_1^*) \\ Q(\Theta, m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2 \times Q_d} (S_2 \cdot S_2^* - S_1 \cdot S_1^*) \\ T(\Theta, m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2 \times Q_d} (S_2 \cdot S_1^* + S_1 \cdot S_2^*) \end{cases} \quad (45)$$

avec pour fonctions complexes $S_1(\Theta, m, \alpha)$ et $S_2(\Theta, m, \alpha)$, où S_1^* et S_2^* sont leurs conjuguées :

$$\begin{cases} S_1(\Theta, m, \alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \times [a_n(m, \alpha) \cdot \pi_n(\cos\Theta) + b_n(m, \alpha) \cdot \tau_n(\cos\Theta)] \\ S_2(\Theta, m, \alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} \times [b_n(m, \alpha) \cdot \pi_n(\cos\Theta) + a_n(m, \alpha) \cdot \tau_n(\cos\Theta)] \end{cases} \quad (46)$$

Les coefficients d'efficacité en extinction et en diffusion s'expriment par :

$$\begin{cases} Q_e(m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \times \text{Re}[a_n(m, \alpha) + b_n(m, \alpha)] \\ Q_d(m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \times (|a_n(m, \alpha)|^2 + |b_n(m, \alpha)|^2) \end{cases} \quad (47)$$

Le problème devient alors un problème numérique d'estimation des fonctions $\pi_n(\mu)$ et $\tau_n(\mu)$, et des suites $a_n(m, \alpha)$ et $b_n(m, \alpha)$.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 111 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

• **Fonctions $\pi_n(\mu)$ et $\tau_n(\mu)$:**

Les fonctions π_n et τ_n sont définies à partir des fonctions généralisées de Legendre :

$$\begin{cases} \pi_n(\cos\theta) = \frac{P_n^1(\cos\theta)}{\sin\theta} = \frac{dP_n(\cos\theta)}{d(\cos\theta)} \\ \tau_n(\mu) = \frac{dP_n^1(\cos\theta)}{d\theta} = \cos\theta \times \pi_n(\cos\theta) - \sin^2\theta \times \frac{d\pi_n(\cos\theta)}{d(\cos\theta)} \end{cases} \quad (48)$$

Elles s'estiment pour un ordre n par des relations de récurrence :

$$\begin{cases} n.\pi_{n+1}(\mu) = (2n+1).\mu\pi_n(\mu) - (n+1).\pi_{n-1}(\mu) \\ \tau_{n+1}(\mu) = (n+1).\mu\pi_{n+1}(\mu) - (n+2).\pi_n(\mu) \end{cases} \quad (49.a)$$

avec pour conditions initiales $\begin{cases} \pi_0(\mu) = 0 \\ \pi_1(\mu) = 1 \end{cases} \quad (49.b)$

• **Suites $a_n(m, \alpha)$ et $b_n(m, \alpha)$:**

On définit les fonctions de Ricatti-Bessel $\psi_n(z)$ et $\xi_n(z)$, pour z complexe, à partir des fonctions de Bessel de 1^{ère} et de 2^{nde} espèce (respectivement $J_{n+1/2}$ et $N_{n+1/2}$) :

$$\begin{cases} \psi_n(z) = \sqrt{\frac{\pi.z}{2}} \times J_{n+1/2}(z) \\ \chi_n(z) = -\sqrt{\frac{\pi.z}{2}} \times N_{n+1/2}(z) \\ \xi_n(z) = \psi_n(z) + i.\chi_n(z) \end{cases} \quad (50)$$

Nommons $D_n(z)$ et $G_n(z)$ les fonctions dérivées :

$$\begin{cases} D_n(z) = \frac{d}{dz} [\ln(\psi_n(z))] \\ G_n(z) = \frac{d}{dz} [\ln(\xi_n(z))] \end{cases} \quad (51)$$

La théorie de Mie permet d'établir que :

$$\begin{cases} a_n(m, \alpha) = \frac{\psi_n(\alpha)}{\xi_n(\alpha)} \times \frac{D_n(m, \alpha) - m \cdot D_n(\alpha)}{D_n(m, \alpha) - m \cdot G_n(\alpha)} \\ b_n(m, \alpha) = \frac{\psi_n(\alpha)}{\xi_n(\alpha)} \times \frac{m \cdot D_n(m, \alpha) - D_n(\alpha)}{m \cdot D_n(m, \alpha) - G_n(\alpha)} \end{cases} \quad (52)$$

On peut aussi écrire que

$$\begin{cases} a_n(m, \alpha) = \frac{\psi_n(\alpha)}{\psi_n(\alpha) + i \cdot \chi_n(\alpha)} \times \frac{D_n(m, \alpha) - m \cdot D_n(\alpha)}{D_n(m, \alpha) - m \cdot G_n(\alpha)} \\ b_n(m, \alpha) = \frac{\psi_n(\alpha)}{\psi_n(\alpha) + i \cdot \chi_n(\alpha)} \times \frac{m \cdot D_n(m, \alpha) - D_n(\alpha)}{m \cdot D_n(m, \alpha) - G_n(\alpha)} \end{cases} \quad (53)$$

L'avantage des fonctions de Ricatti-Bessel et de leurs fonctions dérivées est l'existence de récurrences permettant de calculer leurs termes.

♦ **Relation de récurrence dégressive pour $D_n(z)$:**

$$\begin{cases} D_n(z) = \frac{n+1}{z} - \frac{1}{D_{n+1}(z) + (n+1)/z} \\ D_{N_I}(z) = 0 \end{cases} \quad (54)$$

Si $z = \alpha$, la fonction est réelle.

Si $z = m \cdot \alpha$, la fonction est complexe.

Cas où $z = m \cdot \alpha$:

$$\text{Posons } X_r = \frac{m_r}{\alpha \cdot (m_r^2 + m_i^2)} \text{ et } X_i = \frac{m_i}{\alpha \cdot (m_r^2 + m_i^2)}$$

On montre que :

$$\begin{cases} \text{Re}[D_n(m, \alpha)] \\ = (n+1) \cdot X_r - \frac{\text{Re}[D_{n+1}(m, \alpha)] + (n+1) \cdot X_r}{(\text{Re}[D_{n+1}(m, \alpha)] + (n+1) \cdot X_r)^2 + (\text{Im}[D_{n+1}(m, \alpha)] - (n+1) \cdot X_i)^2} \\ \text{Im}[D_n(m, \alpha)] \\ = -(n+1) \cdot X_i + \frac{\text{Im}[D_{n+1}(m, \alpha)] - (n+1) \cdot X_i}{(\text{Re}[D_{n+1}(m, \alpha)] + (n+1) \cdot X_r)^2 + (\text{Im}[D_{n+1}(m, \alpha)] - (n+1) \cdot X_i)^2} \end{cases} \quad (55)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 113 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Détermination de l'ordre initial N_1 :

Les calculs doivent débiter pour un ordre $N_1 \gg |z|$. La valeur de départ est peu importante du fait de la rapidité de la convergence sur des valeurs exactes. On convient de prendre $D_{N_1}(z) = 0$.

Pour $z = m.\alpha$, on a $|z| = \alpha\sqrt{m_r^2 + m_i^2} \approx \alpha.m_r < 2.\alpha$

Empiriquement, on choisit $N_1 = \text{Int}(2\alpha + 20)$ (56)

NB : La valeur maximale de N_1 est **SOS_MIE_DIM** du fichier SOS.h.

♦ Relation de récurrence pour $G_n(\alpha)$: fonction complexe

$$\begin{cases} G_n(\alpha) = -\frac{n}{\alpha} - \frac{1}{G_{n-1}(\alpha) - n/\alpha} \\ G_0(\alpha) = -i \end{cases} \quad (57)$$

On en déduit que

$$\begin{cases} \text{Re}[G_n(\alpha)] = -\frac{n}{\alpha} - \frac{\text{Re}[G_{n-1}(\alpha)] - n/\alpha}{(\text{Re}[G_{n-1}(\alpha)] - n/\alpha)^2 + (\text{Im}[G_{n-1}(\alpha)])^2} \\ \text{Im}[G_n(\alpha)] = \frac{\text{Im}[G_{n-1}(\alpha)]}{(\text{Re}[G_{n-1}(\alpha)] - n/\alpha)^2 + (\text{Im}[G_{n-1}(\alpha)])^2} \end{cases} \quad (58.a)$$

avec pour conditions initiales $\begin{cases} \text{Re}[G_0(\alpha)] = 0 \\ \text{Im}[G_0(\alpha)] = -1 \end{cases}$ (58.b)

La récurrence est calculée de l'ordre $n = 0$ à N_2 . On prend $N_2 = N_1 - 15$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 114 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

• **Relation de récurrence pour $\chi_n(\alpha)$ et $\psi_n(\alpha)$: fonctions réelles**

Les fonctions de Ricatti-Bessel s'expriment avec les fonctions sphériques de Bessel par :

$$\begin{cases} \psi_n(\alpha) = \alpha \times j_n(\alpha) \\ \chi_n(\alpha) = -\alpha \times n_n(\alpha) \end{cases} \quad (59)$$

dont on peut calculer les termes par récurrence sur n.

Récurrence pour $\chi_n(\alpha)$:

$$\chi_n(\alpha) = \frac{2n-1}{\alpha} \cdot \chi_{n-1}(\alpha) - \chi_{n-2}(\alpha) \quad (60.a)$$

avec pour condition initiale :

$$\begin{cases} \chi_{-1}(\alpha) = -\sin\alpha \\ \chi_0(\alpha) = \cos\alpha \end{cases} \quad (60.b)$$

La suite χ_n tend à diverger. Aussi, le code contrôle si la valeur $\chi_n(\alpha)$ ne devient pas trop importante. Si $\chi_n(\alpha) > 10^{304}$ on stoppe la récurrence et on redéfinit les ordres maximaux : $N_2 = n$ et $N_1 = N_2 + 15$.

Récurrence décroissante pour $\psi_n(\alpha)$:

$$\psi_{n-1}(\alpha) = \frac{2n+1}{\alpha} \cdot \psi_n(\alpha) - \psi_{n+1}(\alpha) \quad (61.a)$$

On veut connaître $\psi_n(\alpha)$ de $n=1$ à N_2 .

Le démarrage de la récurrence par une valeur précise de $\psi_{N_2}(\alpha)$ n'est pas nécessaire. Les valeurs calculées seront proportionnelles aux valeurs exactes. On nomme $\psi'_n(\alpha)$ les termes calculés. Sachant qu'on doit avoir $\psi_0(\alpha) = \sin \alpha$, il suffit de normaliser les termes de la suite $\psi'_n(\alpha)$ par le rapport $\psi'_0(\alpha) / \psi_0(\alpha)$ pour obtenir les termes exacts de la suite $\psi_n(\alpha)$.

On débute la récurrence pour $\psi'_n(\alpha)$ à l'ordre $N_1 = N_2 + 15$ avec une valeur approximative. Sachant que $\psi_n(\alpha)$ converge, on prend arbitrairement :

$$\begin{cases} \psi'_{N_1}(\alpha) = 0 \\ \psi'_{N_1-1}(\alpha) = 1 \end{cases} \quad (61.b)$$

Connaissant toutes les valeurs de $\psi'_n(\alpha)$, on calcule ensuite :

$$\psi_n(\alpha) = \psi'_n(\alpha) \times \frac{\sin\alpha}{\psi'_0(\alpha)} \quad (61.c)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 115 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

• **Adaptation au formalisme du code de MIE :**

Les calculs de MIE de la routine SOS_MIE.F sont réalisés pour une expression des fonctions π_n et τ_n non pas en $\cos \Theta$ mais en $\cos \gamma = -\cos \Theta$, avec $\gamma = \pi - \Theta$ qui est l'angle complémentaire de l'angle de diffusion.

Les fonctions π_n et τ_n vérifient la propriété suivante :

$$\pi_n(\mu) = (-1)^{n+1} \pi_n(-\mu) \quad \text{et} \quad \tau_n(\mu) = (-1)^n \tau_n(-\mu) \quad (62)$$

On en déduit de (46), pour $\gamma = \pi - \Theta$, que :

$$\begin{cases} S_1(\Theta, m, \alpha) = i \times \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cdot \pi_n(\cos \gamma) + B_n \cdot \tau_n(\cos \gamma)] \\ S_2(\Theta, m, \alpha) = -i \times \sum_{n=1}^{\infty} [B_n \cdot \pi_n(\cos \gamma) + A_n \cdot \tau_n(\cos \gamma)] \end{cases} \quad (63)$$

$$\text{avec} \begin{cases} A_n(m, \alpha) = i \times \frac{2n+1}{n(n+1)} \times (-1)^n \times a_n(m, \alpha) \\ B_n(m, \alpha) = i \times \frac{2n+1}{n(n+1)} \times (-1)^{n+1} \times b_n(m, \alpha) \end{cases} \quad (64)$$

On déduit de (47) que :

$$\begin{cases} Q_e(m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \times n(n+1) \times [\text{Im}(A_n) - \text{Im}(B_n)] \\ Q_d(m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2} \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2(n+1)^2}{2n+1} \times (|A_n|^2 + |B_n|^2) \end{cases} \quad (65)$$

La relation (45) reste toujours valable :

$$\begin{cases} P(\Theta, m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2 \times Q_d} (S_2 \cdot S_2^* + S_1 \cdot S_1^*) \\ Q(\Theta, m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2 \times Q_d} (S_2 \cdot S_2^* - S_1 \cdot S_1^*) \\ T(\Theta, m, \alpha) = \frac{2}{\alpha^2 \times Q_d} (S_2 \cdot S_1^* + S_1 \cdot S_2^*) \end{cases} \quad \text{NB : } \iint_{\text{espace}} \left(P(\Theta, m, \alpha) \cdot \frac{d\omega}{4\pi} \right) = 1$$

Pour chaque valeur du paramètre de taille α , entre α_{\min} et α_{\max} , le code de Mie réalise les calculs des coefficients $A_n(m, \alpha)$ et $B_n(m, \alpha)$, ainsi que $\pi_n(\cos \gamma)$ et $\tau_n(\cos \gamma)$. Il en déduit les paramètres $Q_d(m, \alpha)$, $Q_e(m, \alpha)$, $G(m, \alpha)$, calcule les fonctions $S_1(\Theta, m, \alpha)$ et $S_2(\Theta, m, \alpha)$ pour donner $P(\Theta, m, \alpha)$, $Q(\Theta, m, \alpha)$ et $T(\Theta, m, \alpha)$.

Développements pratiques :

Le code de Mie calcule les parties réelles et imaginaires des grandeurs complexes.

On peut montrer à partir des relations (64) et (53) que :

$$\begin{cases} \text{Re}(A_n) = Q.X_1 \cdot \frac{X_1.Z_4 - X_2.Z_3}{Z_5.Z_6} \\ \text{Im}(A_n) = -Q.X_1 \cdot \frac{X_1.Z_3 + X_2.Z_4}{Z_5.Z_6} \end{cases} \quad (66.a)$$

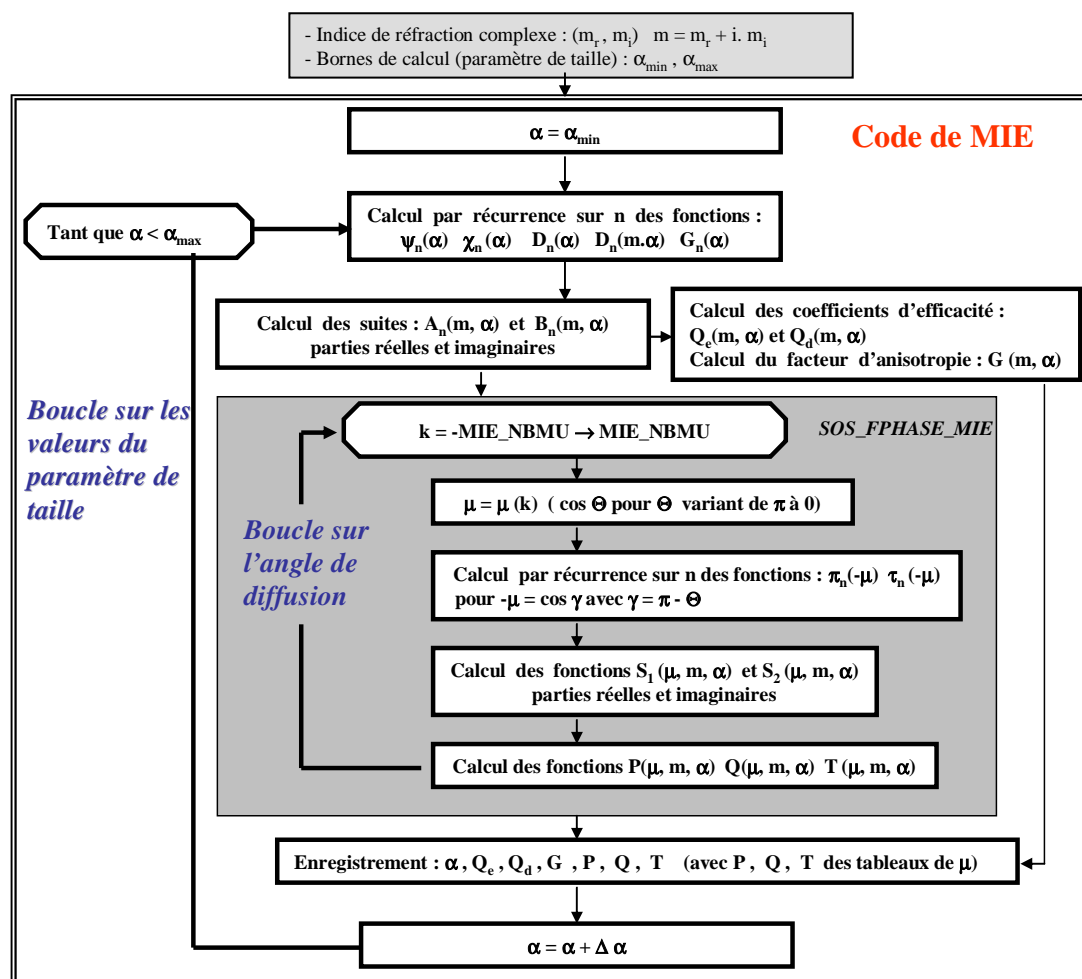
$$\begin{cases} \text{Re}(B_n) = -Q.X_1 \cdot \frac{X_1.Z_8 - X_2.Z_7}{Z_5.Z_9} \\ \text{Im}(B_n) = Q.X_1 \cdot \frac{X_1.Z_7 + X_2.Z_8}{Z_5.Z_9} \end{cases} \quad (66.b)$$

$$\text{avec } \begin{cases} Q = \frac{2n+1}{n(n+1)} \times (-1)^{n+1} \\ X_1 = \psi_n(\alpha) \\ X_2 = \chi_n(\alpha) \\ X_3 = \text{Re}[D_n(m.\alpha)] \\ X_4 = \text{Im}[D_n(m.\alpha)] \\ X_5 = D_n(\alpha) \\ X_6 = \text{Re}[G_n(m.\alpha)] \\ X_7 = \text{Im}[G_n(m.\alpha)] \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} Y_1 = X_3 - m_r.X_5 \\ Y_2 = X_4 - m_i.X_5 \\ Y_3 = X_3 - m_r.X_6 + m_i.X_7 \\ Y_4 = X_4 - m_i.X_6 - m_r.X_7 \\ Z_3 = Y_1.Y_3 + Y_2.Y_4 \\ Z_4 = Y_2.Y_3 - Y_1.Y_4 \\ Z_5 = X_1^2 + X_2^2 \\ Z_6 = Y_3^2 + Y_4^2 \end{cases} \quad (66.c)$$

On trouve également à partir de (63) que :

$$\begin{cases} \text{Re}(S_1) = -\sum_{n=1}^{\infty} [\text{Im}(A_n).\pi_n(\cos\gamma) + \text{Im}(B_n).\tau_n(\cos\gamma)] \\ \text{Im}(S_1) = \sum_{n=1}^{\infty} [\text{Re}(A_n).\pi_n(\cos\gamma) + \text{Re}(B_n).\tau_n(\cos\gamma)] \end{cases} \quad (67.a)$$

$$\begin{cases} \text{Re}(S_2) = \sum_{n=1}^{\infty} [\text{Im}(B_n).\pi_n(\cos\gamma) + \text{Im}(A_n).\tau_n(\cos\gamma)] \\ \text{Im}(S_2) = -\sum_{n=1}^{\infty} [\text{Re}(B_n).\pi_n(\cos\gamma) + \text{Re}(A_n).\tau_n(\cos\gamma)] \end{cases} \quad (67.b)$$



Structure du code de MIE

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 118 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-4 Calcul des propriétés radiatives d'une granulométrie d'aérosols mono-modale

La détermination des propriétés de diffusion et d'extinction d'une granulométrie mono-modale est réalisée par la routine SOS_GRANU. La décomposition en fonctions de Legendre et la troncature sont réalisées par la routine SOS_DECOMP_LEGENDRE.

VII-4.1 Cas de particules sphériques

On se place dans le cas de l'utilisation d'un modèle de particules sphériques, défini par le code SOS_AEROSOLS (Log-Normale Distributions, loi de Junge, modèles WMO ou Shettle & Fenn, modèles bimodaux de LND).

VII.4.1.a DONNEES DE MIE INITIALES

La théorie de Mie permet de calculer les propriétés radiatives d'une particule par rapport au paramètre de taille $\alpha = 2\pi r/\lambda$, où r est le rayon de la particule et λ la longueur d'onde de la lumière incidente :

- coefficient d'efficacité en extinction : $Q_e(m, \alpha)$,
- coefficient d'efficacité en diffusion : $Q_d(m, \alpha)$,
- fonctions de phase de Mie, en fonction de l'angle de diffusion Θ :

$$\approx P_{mie}(\Theta, m, \alpha) = \begin{pmatrix} P_{mie}(\Theta, m, \alpha) & Q_{mie}(\Theta, m, \alpha) & 0 \\ Q_{mie}(\Theta, m, \alpha) & P_{mie}(\Theta, m, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & T_{mie}(\Theta, m, \alpha) \end{pmatrix} \quad (68)$$

Ces informations sont contenues dans un fichier de MIE (description en section VII-9).

VII.4.1.b ESTIMATION DES PARAMETRES RADIATIFS POUR UNE GRANULOMETRIE ET UNE LONGUEUR D'ONDE FIXEES

Pour des particules sphériques, la routine SOS_GRANU calcule la fonction de phase $P(\mu)$ et les fonctions de phase polarisées $Q(\mu)$ et $U(\mu)$ à partir des calculs de MIE réalisés par la routine "SOS_MIE", pour une longueur d'onde donnée et pour une distribution en taille des particules donnée (renseignée par igranu).

Si igranu = 1 => Distribution Log-Normale :

$$N(r) = \frac{1}{r \cdot \sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\frac{\ln^2(r/r_m)}{2\sigma^2}\right) \quad (69)$$

avec r_m le rayon modal en μm et σ le log népérien de la variance de la distribution.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 119 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Si $i_{granu} = 2 \Rightarrow$ Loi de Junge :

$$\begin{cases} r \leq r_0 : N(r) = N(r_0) = r_0^{-\nu} \\ r > r_0 : N(r) = r^{-\nu} \end{cases} \quad (70)$$

avec r_0 rayon minimal en μm

Le pas sur le paramètre de taille α est identique à celui de la routine SOS_MIE (ceci est nécessaire pour garantir de convenablement calculer le pas ∂r sur le rayon des particules) :

$$\begin{array}{llll} \alpha \leq 0,1 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,0001 & 10 < \alpha \leq 30 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,05 \\ 0,1 < \alpha \leq 1,0 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,001 & 30 < \alpha \leq 100 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,1 \\ 1,0 < \alpha \leq 10 & \Rightarrow \Delta\alpha = 0,01 & 100 < \alpha & \Rightarrow \Delta\alpha = 1,0 \end{array}$$

Pour une distribution en taille des aérosols et pour une longueur d'onde donnée, on calcule à partir des paramètres de Mie :

- le coefficient d'extinction (en μm^{-1}) :

$$\sigma_e(\lambda, \text{modèle}) = \int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_e(m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr \quad (71.a)$$

- le coefficient de diffusion (en μm^{-1}) :

$$\sigma_d(\lambda, \text{modèle}) = \int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_d(m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr \quad (71.b)$$

- ♦ $n(r) \cdot dr$ représente le nombre de particules de rayon $[r, r+dr]$ par unité de volume (en μm^{-3}).
- ♦ $\pi \cdot r^2 \cdot Q_e(m, \alpha)$ est la section efficace d'une particule de rayon r pour la longueur d'onde λ (en μm^2).

On en déduit la valeur de l'albédo de simple diffusion:

$$\omega_0(\lambda, \text{modèle}) = \frac{\sigma_d(\lambda, \text{modèle})}{\sigma_e(\lambda, \text{modèle})} \quad (72)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 120 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

On calcule également les éléments de la matrice de phase avec le plan de diffusion pour plan de référence :

$$P_{11}(\lambda, \text{modèle}, \Theta) = \frac{1}{\sigma_d(\lambda, \text{modèle})} \times \int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_d(m, r, \lambda) \cdot P_{\text{mie}}(\Theta, m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr \quad (73.a)$$

$$P_{12}(\lambda, \text{modèle}, \Theta) = \frac{1}{\sigma_d(\lambda, \text{modèle})} \times \int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_d(m, r, \lambda) \cdot Q_{\text{mie}}(\Theta, m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr \quad (73.b)$$

$$P_{33}(\lambda, \text{modèle}, \Theta) = \frac{1}{\sigma_d(\lambda, \text{modèle})} \times \int_{r=0}^{\infty} \pi \cdot r^2 \cdot Q_d(m, r, \lambda) \cdot T_{\text{mie}}(\Theta, m, r, \lambda) \cdot n(r) \cdot dr \quad (73.c)$$

La probabilité de diffusion avec un angle Θ , dans l'angle solide $d\Omega$, est donnée par $P_{11}(\Theta) \cdot d\Omega / 4\pi$. La fonction de phase est normalisée.

$$\text{Elle vérifie : } \iint_{\text{espace}} P_{11}(\Theta) \cdot d\Omega / 4\pi = 1$$

VII-4.2 Décomposition de la matrice de phase en fonctions de Legendre

On se place dans un cas général que les particules soient sphériques ou non.

La routine SOS_DECOMP_LEGENDRE réalise un développement des fonctions de phase dans la base des fonctions généralisées de Legendre. Sur un plan numérique, il est en effet avantageux de décomposer les fonctions de phase en paramètres $\beta(k)$, $\gamma(k)$ et $\delta(k)$, à partir des polynômes de Legendre : $P_k(\cos\Theta)$ et fonctions de Legendre d'ordre 2 : $P_2^k(\cos\Theta)$.

On écrit, dans le **cas général de particules non-sphériques** :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{11}(\lambda, \text{modèle}, \Theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^{11} \cdot P_k(\cos\Theta) \\ P_{22}(\lambda, \text{modèle}, \Theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^{22} \cdot P_k(\cos\Theta) \\ P_{12}(\lambda, \text{modèle}, \Theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k \cdot P_2^k(\cos\Theta) \\ P_{33}(\lambda, \text{modèle}, \Theta) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \cdot P_k(\cos\Theta) \end{array} \right. \quad (74)$$

En estimant les fonctions $P_k(\mu)$ et $P_2^k(\mu)$ à partir de relations de récurrence sur k , on calcule :

$$\begin{cases} \beta_k^{11} = \frac{2k+1}{2} \cdot \int_{-1}^1 P_k(\mu) \cdot P_{11}(\lambda, \text{modèle}, \mu) \cdot d\mu \\ \beta_k^{22} = \frac{2k+1}{2} \cdot \int_{-1}^1 P_k(\mu) \cdot P_{22}(\lambda, \text{modèle}, \mu) \cdot d\mu \\ \gamma_k = \frac{2k+1}{2} \cdot \int_{-1}^1 P_2^k(\mu) \cdot P_{12}(\lambda, \text{modèle}, \mu) \cdot d\mu \\ \delta_k = \frac{2k+1}{2} \cdot \int_{-1}^1 P_k(\mu) \cdot P_{33}(\lambda, \text{modèle}, \mu) \cdot d\mu \end{cases} \quad (75)$$

Si les particules sont sphériques, on a :

- Les coefficients $\beta_k^{22} = \beta_k^{11}$ car $P_{11} = P_{22}$.
- Les coefficients δ_k restent calculés en fonction de P_{33} mais pour $P_{33} = P_{44}$.

Récurrence sur les polynômes de Legendre :

$$(k+1) \times P_{k+1}(\mu) + k \times P_{k-1}(\mu) = (2k+1) \cdot \mu \times P_k(\mu) \quad (76)$$

avec pour conditions initiales : $P_{-1}(\mu) = 0$ et $P_0(\mu) = 1$.

Récurrence sur les fonctions de Legendre d'ordre 2 :

$$P_2^{k+1}(\mu) = \frac{2k+1}{\sqrt{(k+3)(k-1)}} \times \left[\mu \times P_2^k(\mu) - \frac{\sqrt{(k+2)(k-2)}}{2k+1} \times \mu \times P_2^{k-1}(\mu) \right] \quad (77)$$

$$\text{avec pour conditions initiales : } \begin{cases} P_2^0(\mu) = P_2^1(\mu) = 0 \\ P_2^2(\mu) = \frac{3 \times (1 - \mu^2)}{2\sqrt{6}} \end{cases} \quad (78)$$

L'expression de la matrice de phase dans les OS se fait pour un repère lié au plan méridien et non pas au plan de diffusion. Elle fait intervenir les paramètres supplémentaires $\alpha(k)$ et $\xi(k)$. On les exprime en fonction des $\beta^{22}(k)$ et $\delta(k)$. Ils serviront pour l'expression de la matrice de phase décomposée en séries de Fourier dans le code des OS (cf. VI-4.1, page 70).

$$\begin{cases} \alpha_{k \geq 2} = A_k \times \beta_k^{22} - B_k \times \left(\sum_{j=1}^{k/2} C_{k,j} \times \beta_{k-2j}^{22} - \sum_{j=0}^{(k-1)/2} D_{k,j} \times \delta_{k-2j-1} \right) \\ \xi_{k \geq 2} = A_k \times \delta_k - B_k \times \left(\sum_{j=1}^{k/2} C_{k,j} \times \delta_{k-2j} - \sum_{j=0}^{(k-1)/2} D_{k,j} \times \beta_{k-2j-1}^{22} \right) \end{cases} \quad (79.a)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 122 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

$$\text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} A_k = \frac{k \times (k-1)}{(k+1)(k+2)} \\ B_k = \frac{4(2k+1)}{k(k-1)(k+1)(k+2)} \\ C_{k,j} = (k-1)^2 - 3(2j-1)(k-j) \\ D_{k,j} = (k-1)^2 - 3j(2k-2j-1) \end{array} \right. \quad (79.b)$$

NB :

- La routine SOS_DECOMP_LEGENDRE développe systématiquement la fonction P_{22} en coefficients β_k^{22} qui servent au calcul des α_k et ξ_k . C'est la seule spécificité de traitement requise pour des particules non-sphériques (d'orientation aléatoire).
- Si les particules sont sphériques (modèles internes au code SOS_AEROSOLS), la routine duplique au préalable la fonction P_{11} en P_{22} .

Normalisation par β_0 :

Le programme divise par β_0 les fonctions $P_{11}(\Theta)$, $P_{12}(\Theta)$ et $P_{33}(\Theta)$ pour assurer la normalisation de la fonction de phase. La valeur effective de β_0 en sortie des calculs est strictement égale à 1.

On fait la même chose en cas de troncature pour normaliser la fonction de phase tronquée.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 123 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-4.3 Application d'une troncature

La routine SOS_DECOMP_LEGENDRE gère également une éventuelle troncature de la fonction de phase si l'option itronc = 1.

La décomposition de la fonction de phase est en théorie une sommation infinie (équation 74). En pratique, elle peut être limitée à un ordre L dépendant du type de diffusant :

- Pour une **diffusion isotrope**, le développement est limité à son premier terme $L = 0$: $\beta_0 = 1$.
- Pour la **diffusion moléculaire**, $L = 2$. On a $\beta_0 = 1$, $\beta_1 = 0$ et $\beta_2 = 1/2$.
- Pour la **diffusion de particules**, on arrête le développement pour L tel que $\beta_{L+1} = 0$. Ceci peut conduire à des développements très élevés pour des particules larges dont la fonction de phase présente une pointe avant fortement prononcée. Afin de limiter l'ordre L, on peut considérer que l'énergie diffractée vers l'avant n'est pas diffusée mais simplement transmise. Cela revient à réduire la pointe avant de la fonction de phase.

Cette troncature de la fonction de phase modifie la répartition de l'énergie. Les autres paramètres radiatifs décrivant la couche atmosphérique doivent alors être ajustés pour que les propriétés radiatives globales restent inchangées.

Soit Θ_1 et Θ_2 les angles de Gauss pour lesquels $\cos \Theta_1 \approx 0,8$ et $\cos \Theta_2 \approx 0,94$ (soit $\Theta_1 \approx 37^\circ$ et $\Theta_2 \approx 20^\circ$). On tronque la fonction de phase pour les angles $\Theta < \Theta_2$ par la fonction :

$$\log[p_{tr}(\Theta)] = AA \times \Theta + B \quad (80)$$

La valeur de AA et B est estimée à partir des couples : $\left\{ \begin{array}{l} \Theta_1, p(\Theta_1) \\ \Theta_2, p(\Theta_2) \end{array} \right\}$.

$$\text{On trouve } \left\{ \begin{array}{l} AA = \frac{\log[p(\Theta_2)] - \log[p(\Theta_1)]}{\Theta_2 - \Theta_1} \\ B = \frac{\Theta_2 \times \log[p(\Theta_1)] - \Theta_1 \times \log[p(\Theta_2)]}{\Theta_2 - \Theta_1} \end{array} \right. \quad (81)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 124 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Ainsi, on définit la fonction de phase tronquée par :

$$\begin{cases} \text{Si } \Theta < \Theta_2 \Rightarrow p_{\text{tr}}(\Theta) = 10^{\log[p(\Theta_2)] + \frac{\Theta - \Theta_2}{\Theta_2 - \Theta_1} \times (\log[p(\Theta_2)] - \log[p(\Theta_1)])} \\ \text{Si } \Theta \geq \Theta_2 \Rightarrow p_{\text{tr}}(\Theta) = p(\Theta) \end{cases} \quad (82)$$

La réduction de l'énergie diffusée se répercute également sur les fonctions de phase polarisées :

$$\begin{cases} P_{12_{\text{tr}}}(\Theta) = P_{12}(\Theta) \times [P_{\text{tr}}(\Theta) / P(\Theta)] \\ P_{33_{\text{tr}}}(\Theta) = P_{33}(\Theta) \times [P_{\text{tr}}(\Theta) / P(\Theta)] \end{cases} \quad (83)$$

Les coefficients de la matrice de phase $[\alpha(k), \beta(k), \delta(k), \gamma(k)$ et $\xi(k)]$ sont alors des coefficients calculés pour une troncature.

Les grandeurs physiques associées à la nouvelle fonction de phase $p_{\text{tr}}(\Theta)$ doivent être ajustées pour permettre de conserver les propriétés radiatives globales de la couche atmosphérique. Les épaisseurs optiques et l'albédo de diffusion simple de la couche sont alors modifiés.

Le coefficient de troncature F exprime la proportion d'énergie qui n'est pas diffusée en appliquant une troncature :

$$F = \iint_{\text{espace}} [p(\Theta) - p_{\text{tr}}(\Theta)] \frac{d\omega}{4\pi} \quad \text{soit} \quad F = \frac{1}{2} \times \int_0^\pi [p(\Theta) - p_{\text{tr}}(\Theta)] \sin\Theta \cdot d\Theta \quad (84)$$

où $p(\Theta)$ est la fonction de phase initiale normalisée et $p_{\text{tr}}(\Theta)$ celle tronquée.

En développant $p_{\text{tr}}(\Theta)$ en $\sum_{k=0}^{\infty} \beta_k^{\text{tr}} \cdot P_k(\cos\Theta)$, on peut montrer qu'on a :

$$F = 1 - \beta_0^{\text{tr}} \quad (85)$$

On obtient :

$$\text{- L'épaisseur optique d'extinction tronquée : } \tau_{\text{ext}}^{\text{tr}} = \tau_{\text{ext}} \times (1 - \omega_0 \cdot F) \quad (86.a)$$

$$\text{- L'épaisseur optique de diffusion tronquée : } \tau_{\text{sca}}^{\text{tr}} = \tau_{\text{ext}}^{\text{tr}} \times \omega_0^{\text{tr}} \quad (86.b)$$

$$\text{- L'albédo de diffusion simple tronqué : } \omega_0^{\text{tr}} = \omega_0 \times \left(\frac{1 - F}{1 - \omega_0 \cdot F} \right) \quad (86.c)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 125 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

- La fonction de phase tronquée normalisée :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{tr}^{norma}(\Theta) = \frac{P_{tr}(\Theta)}{1-F} \\ P_{12tr}^{norma}(\Theta) = \frac{P_{12tr}(\Theta)}{1-F} \\ P_{33tr}^{norma}(\Theta) = \frac{P_{33tr}(\Theta)}{1-F} \end{array} \right. \quad (86.d)$$

Tableau 7 : Relation entre les paramètres radiatifs initiaux et ceux du milieu équivalent. Couche homogène.

	Grandeurs initiales	Grandeurs tronquées (atmosphère équivalente)
Fonction de phase (coefficient de troncature F)	β_k L moments	β_k^* vérifiant $\beta_k = (2k+1).F + (1-F).\beta_k^*$ $L^* < L$
Albédo de diffusion simple	ω_0	$\omega_0^{tr} = \omega_0 \times \left(\frac{1-F}{1-\omega_0.F} \right)$
Epaisseur optique d'extinction	τ_{ext}	$\tau_{ext}^{tr} = \tau_{ext} \times (1 - \omega_0.F)$
Epaisseur optique de diffusion	τ_{sca}	$\tau_{sca}^{tr} = \tau_{ext}^{tr} \times \omega_0^{tr}$

NB :

- Le code SOS_DECOMP_LEGENDRE calcule $A = 2F$.
- Si l'option de troncature est demandée, la routine estime les paramètres $\alpha(k)$, $\beta(k)$, $\delta(k)$, $\gamma(k)$ et $\xi(k)$ tronqués. L'application de la troncature sur l'épaisseur optique et l'albédo de diffusion est faite en dehors de la routine à partir de la valeur du coefficient de troncature A.
- Si la troncature est insignifiante ($A < 0,1$), on recalcule les paramètres $\alpha(k)$, $\beta(k)$, $\delta(k)$, $\gamma(k)$ et $\xi(k)$ sans troncature et on pose $A = 0$.

Par la suite, les paramètres ω_0 , δ et β_k intervenant dans l'ETR seront des grandeurs équivalentes résultant d'une troncature. Afin de ne pas alourdir les notations, nous garderons les notations initiales.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 126 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-5 Calcul des propriétés radiatives d'une granulométrie d'aérosols selon les modèles de la WMO

VII-5.1 Principe théorique

VII.5.1.a METHODE GENERALE DE CALCUL DES PROPRIETES RADIATIVES D'UN MELANGE DE PARTICULES

Considérons un élément de volume composé de N particules de différents composants.

Les propriétés radiatives élémentaires de chaque composant sont :

- Les sections efficaces d'extinction et de diffusion (préférables aux coefficients d'extinction et de diffusion car elles sont ramenées à une particule k moyenne).
- La matrice de phase de la granulométrie k.

Nommons N_k le nombre de particules du composant k.

$$N_k = \alpha_k \times N \quad (87)$$

Les propriétés radiatives du mélange peuvent être calculées à partir des propriétés radiatives des composants et des coefficients α_k .

• Albédo de simple diffusion du mélange :

Les coefficients de diffusion et d'extinction de l'élément de volume exprimé par rapport aux sections efficaces $\tilde{\sigma}_{sca}$ et $\tilde{\sigma}_{ext}$ correspondantes sont :

$$\begin{cases} N \times \tilde{\sigma}_{sca} = \sum_k N_k \times \tilde{\sigma}_{sca}^{(k)} \\ N \times \tilde{\sigma}_{ext} = \sum_k N_k \times \tilde{\sigma}_{ext}^{(k)} \end{cases} \quad (88)$$

L'albédo de simple diffusion est alors :

$$\omega_0 = \frac{N \times \tilde{\sigma}_{sca}}{N \times \tilde{\sigma}_{ext}} = \frac{\sum_k N_k \times \tilde{\sigma}_{sca}^{(k)}}{\sum_k N_k \times \tilde{\sigma}_{ext}^{(k)}} \quad (89)$$

Soit :

$$\boxed{\omega_0 = \frac{\sum_k a_k \times \tilde{\sigma}_{sca}^{(k)}}{\sum_k a_k \times \tilde{\sigma}_{ext}^{(k)}}} \quad (90)$$

• Matrice de phase du mélange :

Propriétés radiatives des aérosols : granulométries d'aérosols

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 127 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

La fonction de phase du mélange s'écrit :

$$N \times \tilde{\sigma}_{\text{sca}} \times p(\Theta) = \sum_k N_k \times \tilde{\sigma}_{\text{sca}}^{(k)} \times p_k(\Theta) \quad (91)$$

Soit :

$$p(\Theta) = \frac{\sum_k \alpha_k \times \tilde{\sigma}_{\text{sca}}^{(k)} \times p_k(\Theta)}{\sum_k \alpha_k \times \tilde{\sigma}_{\text{sca}}^{(k)}} \quad (92)$$

Cette expression est la même pour les fonctions $q(\Theta)$ et $u(\Theta)$ de la matrice de phase.

VII.5.1.b ADAPTATION AUX MODELES DE LA WMO

La construction des modèles de la WMO est précisée dans la documentation relative [DR19]. Nous rappelons ici les points nécessaires aux simulations du programme « AEROSOLS ».

Les modèles de la WMO correspondent à des mélanges de composants élémentaires :

- Dust-Like - Water soluble
- Oceanic - Soot

Les tableaux 8.a et 8.b précisent les caractéristiques microphysiques de ces particules. Chaque composant a une nature chimique (indice de réfraction) et une distribution en taille qui lui sont propre (loi Log-Normale, eq. 69). Les modèles WMO ne tiennent pas compte de l'impact de l'humidité relative sur ces paramètres.

Le fichier « Data_WMO » contient l'ensemble des informations relatives aux composants élémentaires. Il est placé sur le répertoire \$RACINE/fic. Son nom est précisé dans le fichier « SOS.h » en place de la constante SOS_AER_DATAWMO.

Tableau 8.a : Paramètres microphysiques des composants élémentaires de la WMO

	Rayon modal (µm)	Variance s	$\sigma = \log_{10} s$	V_k : concentration volumique (µm³/cm³)
Dust-Like	0,5000	2,99	0,47567	113,98352
Water Soluble	0,0050	2,99	0,47567	113,98352×10 ⁻⁶
Oceanic	0,3000	2,51	0,39967	5,14441
Soot	0,0118	2,00	0,30103	59,77755×10 ⁻⁶

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 128 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Tableau 8.b : Indice de réfraction des composants élémentaires de la WMO

Longueur d'onde (μm)	Dust-Like		Water Soluble		Oceanic		Soot	
	m_r	m_i	m_r	m_i	m_r	m_i	m_r	m_i
0,200	1,53000	-0,07000	1,53000	-0,07000	1,42900	-0,00003	1,50000	-0,35000
0,250	1,53000	-0,03000	1,53000	-0,03000	1,40400	0,00000	1,62000	-0,45000
0,300	1,53000	-0,00800	1,53000	-0,00300	1,39500	0,00000	1,74000	-0,47000
0,337	1,53000	-0,00800	1,53000	-0,00500	1,39200	0,00000	1,75000	-0,47000
0,400	1,53000	-0,00800	1,53000	-0,00500	1,38500	0,00000	1,75000	-0,46000
0,488	1,53000	-0,00800	1,53000	-0,00500	1,38200	0,00000	1,75000	-0,45000
0,515	1,53000	-0,00800	1,53000	-0,00500	1,38100	0,00000	1,75000	-0,45000
0,550	1,53000	-0,00800	1,53000	-0,00600	1,38100	0,00000	1,75000	-0,44000
0,633	1,53000	-0,00800	1,53000	-0,00600	1,37700	0,00000	1,75000	-0,43000
0,694	1,53000	-0,00800	1,53000	-0,00700	1,37600	0,00000	1,75000	-0,43000
0,860	1,52000	-0,00800	1,52000	-0,01200	1,37200	0,00000	1,75000	-0,43000
1,060	1,52000	-0,00800	1,52000	-0,01700	1,36700	-0,00006	1,75000	-0,44000
1,300	1,46000	-0,00800	1,51000	-0,02000	1,36500	-0,00014	1,76000	-0,45000
1,536	1,40000	-0,00800	1,51000	-0,02300	1,35900	-0,00024	1,77000	-0,46000
1,800	1,33000	-0,00800	1,46000	-0,01700	1,35100	-0,00031	1,79000	-0,48000
2,000	1,26000	-0,00800	1,42000	-0,00800	1,34700	-0,00107	1,80000	-0,49000
2,250	1,22000	-0,00900	1,42000	-0,01000	1,33400	-0,00085	1,81000	-0,50000
2,500	1,18000	-0,00900	1,42000	-0,01200	1,30900	-0,00239	1,82000	-0,51000
2,700	1,18000	-0,01300	1,40000	-0,05500	1,24900	-0,01560	1,83000	-0,52000
3,000	1,16000	-0,01200	1,42000	-0,02200	1,43900	-0,19700	1,84000	-0,54000
3,200	1,22000	-0,01000	1,43000	-0,00800	1,48100	-0,06690	1,86000	-0,54000
3,392	1,26000	-0,01300	1,43000	-0,00700	1,43900	-0,01510	1,87000	-0,55000
3,500	1,28000	-0,01100	1,45000	-0,00500	1,42300	-0,00717	1,88000	-0,56000
3,750	1,27000	-0,01100	1,45200	-0,00400	1,39800	-0,00290	1,90000	-0,57000
4,000	1,26000	-0,01200	1,45500	-0,00500	1,38800	-0,00369	1,92000	-0,58000

Tableau 9 : Proportions volumiques C_k des modèles de la WMO

	Dust-Like	Water Soluble	Oceanic	Soot
Average continental	0,70	0,29		0,01
Maritime		0,05	0,95	
Urban	0,17	0,61		0,22

Le mélange des composants élémentaires selon les proportions volumiques précisées dans le tableau 9 permet d'aboutir aux modèles WMO :

- Average continental
- Maritime
- Urban

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 129 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

La proportion de particules du type k est $\alpha_k = n_k / n_{\text{tot}}$ avec :

$$\begin{cases} n_k = C_k / V_k \\ n_{\text{tot}} = \sum_k n_k \end{cases} \quad (93)$$

où n_k est le nombre de densité du composant k.

Pour chaque composant élémentaire, on réalise les calculs suivants :

- Calculs de Mie :
 - Estimation de l'indice de réfraction pour la longueur d'onde de simulation par interpolation linéaire à partir des données du fichier « Data_WMO » (tableau 8.b).
 - Calcul du fichier de Mie (s'il n'existe pas déjà).

La valeur limite du paramètre de taille pour les calculs de Mie fait partie des constantes de simulation du fichier « SOS.h ». Etant données la faible variation spectrale de l'indice de réfraction des composants de la WMO sur le visible et la taille des particules, nous avons convenu de fixer ces valeurs limites comme suit :

Tableau 10 : valeurs limites des paramètres de taille associés aux modèles de la WMO

	α_{max}	Constante associée
Dust-Like	4000	SOS_ALPHAMAX_WMO_DL
Water Soluble	50	SOS_ALPHAMAX_WMO_WS
Oceanic	800	SOS_ALPHAMAX_WMO_OC
Soot	10	SOS_ALPHAMAX_WMO_SO

- Calculs des paramètres radiatifs de la granulométrie :
 - Coefficient d'extinction : $\sigma_{\text{ext}}^{(k)}$
 - Coefficient de diffusion : $\sigma_{\text{sca}}^{(k)}$
 - Fonctions de phase : $P_k(\Theta)$, $P_{12k}(\Theta)$, $P_{33k}(\Theta)$

Les paramètres radiatifs du mélange sont :

- Coefficient d'extinction : $\sigma_{\text{ext}} = \sum_k \frac{n_k}{n_{\text{tot}}} \times \sigma_{\text{ext}}^{(k)}$

- Coefficient de diffusion : $\sigma_{\text{sca}} = \sum_k \frac{n_k}{n_{\text{tot}}} \times \sigma_{\text{sca}}^{(k)}$

- Fonctions de phase :

$$\begin{cases} I(\Theta) = \frac{1}{\sigma_{\text{sca}}} \sum_k \frac{n_k}{n_{\text{tot}}} \times I_k(\Theta) \times \sigma_{\text{sca}}^{(k)} \\ P_{12}(\Theta) = \frac{1}{\sigma_{\text{sca}}} \sum_k \frac{n_k}{n_{\text{tot}}} \times P_{12k}(\Theta) \times \sigma_{\text{sca}}^{(k)} \\ P_{33}(\Theta) = \frac{1}{\sigma_{\text{sca}}} \sum_k \frac{n_k}{n_{\text{tot}}} \times P_{33k}(\Theta) \times \sigma_{\text{sca}}^{(k)} \end{cases}$$

On en déduit l'albédo de simple diffusion ($\omega_0 = \sigma_{\text{sca}} / \sigma_{\text{ext}}$) et on calcule les coefficients de la matrice de phase [$\alpha(k)$, $\beta(k)$, $\delta(k)$, $\gamma(k)$ et $\xi(k)$]. Une troncature peut éventuellement être appliquée sur la fonction de phase.

VII-5.2 Validation des calculs

Les résultats obtenus par le programme « AEROSOLS.F » pour les modèles de la WMO ont été validés en les comparant aux tableaux de résultats présents dans le document [DR19]. On compare les valeurs de l'albédo simple diffusion (ω_0) et du paramètre d'asymétrie g , pour différentes longueurs d'onde.

• Modèles continental et urbain :

Les particules continentales et urbaines sont suffisamment petites devant les longueurs d'onde considérées pour qu'une troncature de la fonction de phase ne soit pas nécessaire. Les résultats obtenus par le programme « AEROSOLS » sont alors directement comparables à ceux du rapport de la WMO.

Modèle	λ (μm)	ω_0 sos	ω_0 wmo	g sos	g wmo
Continental	0.200	0.655	0.655	0.727	0.726
	0.250	0.775	0.775	0.689	0.688
	0.550	0.891	0.891	0.633	0.637
	0.694	0.880	0.879	0.627	0.631
	1.300	0.775	0.774	0.637	0.637
	2.250	0.762	0.761	0.741	0.741
	3.750	0.785	0.785	0.779	0.779
Urbain	0.200	0.535	0.535	0.689	0.690
	0.250	0.594	0.593	0.645	0.645
	0.550	0.650	0.647	0.591	0.591
	0.694	0.634	0.631	0.585	0.585
	1.300	0.499	0.494	0.572	0.572
	2.250	0.347	0.342	0.584	0.585

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 131 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

• **Modèle maritime :**

Les particules maritimes sont par contre de taille importante devant les longueurs d'onde considérées et justifient l'application d'une troncature de la fonction de phase pour simuler correctement la diffusion. Les résultats tronqués du programme « AEROSOLS » doivent alors être ramenés à des valeurs non tronquées pour être comparables à ceux du rapport de la WMO.

- Lancement du calcul des OS avec troncature : albédo simple diffusion et paramètre d'asymétrie tronqués.
- A partir de ces valeurs tronquées, calcul des paramètres ω_0 et g non tronqués selon les formules :

$$\omega_0 = \frac{\omega_0^{\text{tr}}}{1 - F + \omega_0^{\text{tr}} F}$$

$$\text{et } g = \frac{\beta_1}{3} \text{ où } \beta_1 = 3F + (1 - F) \cdot \beta_1^{\text{tr}}.$$

Les paramètres ainsi obtenus sont identiques à ceux de la WMO.

Exemple : $\lambda = 0.200 \mu\text{m}$

On trouve avec le programme « AEROSOLS » :

- $F = 0,2874$
- $\omega_0^{\text{tr}} = 0,789$
- $g^{\text{tr}} = 0,684$ ($\beta_1^{\text{tr}} = 2.0512$)

Les grandeurs non tronquées correspondantes sont : $\omega_0 = 0.840$ et $g = 0.775$

Les résultats correspondant de la WMO sont : $\omega_0 = 0,841$ et $g = 0,774$.

VII-6 Calcul des propriétés radiatives d'une granulométrie d'aérosols selon les modèles de Shettle et Fenn

VII-6.1 Principe théorique

Les modèles de Shettle et Fenn sont décrits dans le document de référence [DR15]. Nous rappelons ici les points nécessaires aux simulations du programme « AEROSOLS ».

Les modèles de Shettle et Fenn correspondent à des mélanges de composants élémentaires :

- Small Rural
- Large Rural
- Small Urban
- Large Urban
- Oceanic Model

Les caractéristiques microphysiques de ces composants dépendent de l'humidité relative de l'air (0 à 99%).

Le tableau 11 précise les paramètres de la granulométrie Log-Normale de chaque constituant. La variance est indépendante de l'humidité relative. Par contre, le rayon modal croît avec l'humidité. Ces informations sont contenues dans le fichier « Data_SF ». Il est placé sur le répertoire \$RACINE/fic. Son nom est précisé dans le fichier « SOS.h » en place de la constante SOS_AER_DATASF.

Tableau 11 : Paramètres des granulométries Log-Normales des composants élémentaires de Shettle et Fenn en fonction de l'humidité relative

	Composant élémentaire				
	SR	LR	SU	LU	OM
$\sigma = \log_{10} s$	0,35	0,40	0,35	0,40	0,40
Humidité relative	Rayon modal (μm)				
00,00 %	0,02700	0,43000	0,02500	0,40000	0,16000
50,00 %	0,02748	0,43770	0,02563	0,41130	0,17110
70,00 %	0,02846	0,45710	0,02911	0,47770	0,20410
80,00 %	0,03274	0,54770	0,03514	0,58050	0,31800
90,00 %	0,03884	0,64620	0,04187	0,70610	0,38030
95,00 %	0,04238	0,70780	0,04904	0,86340	0,46060
98,00 %	0,04751	0,97280	0,05996	1,16910	0,60240
99,00 %	0,05215	1,17550	0,06847	1,48580	0,75050

La dépendance de l'indice de réfraction à la longueur d'onde et à l'humidité relative est renseignée par le document [DR15]. Le programme accède à cette information par les fichiers suivants :

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 133 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

Nom du fichier	Constante de « SOS.h » associée	Composant
IRefrac_SR	SOS_AER_SR_SF	Small Rural
IRefrac_LR	SOS_AER_LR_SF	Large Rural
IRefrac_SU	SOS_AER_SU_SF	Small Urban
IRefrac_LU	SOS_AER_LU_SF	Large Urban
IRefrac_OM	SOS_AER_OM_SF	Oceanic Model

Chaque fichier contient les données suivantes :

Tableau 12 : Format d'un fichier d'indice de réfraction pour un composant élémentaire des modèles de Shettle et Fenn

	HR = 0%		HR = 50%		HR = 70%		HR = 80%		HR = 90%		HR = 95%		HR = 98%		HR = 99%	
λ	m_r	m_i	m_r	m_i	m_r	m_i	m_r	m_i	m_r	m_i	m_r	m_i	m_r	m_i	m_r	m_i
.
.
.

- 1^{ère} colonne : longueur d'onde en μm .
- 16 autres colonnes : couples d'indice de réfraction (partie réelle et imaginaire) pour les 8 valeurs d'humidité relative de 0 à 99%.

NB : Les tableaux 11 et 12 doivent contenir les mêmes valeurs d'humidités relatives et respecter le même ordre d'évolution.

Le mélange des composants élémentaires selon les proportions α_k précisées dans le tableau 13 permet d'aboutir aux modèles de Shettle et Fenn :

- Tropospheric
- Urban
- Maritime
- Coastal

Tableau 13 : Proportion de particules α_k des modèles de Shettle et Fenn

	SR	LR	SU	LU	OM
Tropospheric	1,000				
Urban			0,999875	0,000125	
Maritime	0,990				0,010
Coastal	0,995				0,005

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 134 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Pour chaque composant élémentaire, on réalise les calculs suivants :

- Calculs de Mie :
 - Estimation de l'indice de réfraction pour la longueur d'onde et pour l'humidité relative de simulation par interpolation linéaire à partir des données du fichier « Data_SF » (tableau 12).
 - Calcul du fichier de Mie (s'il n'existe pas déjà).

Pour les particules de Shettle & Fenn, la valeur limite du paramètre de taille utilisée pour les calculs de Mie peut être soit une constante de simulation du fichier « SOS.h » soit une valeur estimée par le logiciel. Pour les petites particules, la valeur de α_{\max} n'est pas un problème : elle est fixée comme constante pour les particules « Small Rural » et « Small Urban ».

Pour les particules de plus grosses tailles, la valeur α_{\max} est estimée. Posons $K(r) = r^2 \times n(r)$, la fonction représentative de l'importance des particules de rayon r dans les calculs de Mie d'une granulométrie log-normale. La valeur maximale de cette fonction est obtenue pour $R_{K_{\max}} = r_m \cdot \exp(\sigma^2)$. On souhaite que les calculs de Mie se fassent pour des valeurs de $K(r)$ significatives. Nommons C , la constante SOS_COEF_NRMAX. Le logiciel poussera les calculs de Mie jusqu'à une taille limite des particules correspondant à $C \times K(R_{K_{\max}})$. Empiriquement, une valeur $C = 10^{-4}$ est satisfaisante. Le paramètre de taille correspondant sera :

$$\alpha_{\max} = \frac{2\pi}{\lambda} \times R_{K_{\max}} \times \exp(\sigma \cdot \sqrt{-2 \cdot \ln C}) \quad (94)$$

Tableau 14 : valeurs limites des paramètres de taille associés aux modèles de Shettle & Fenn

	α_{\max}	Constante associée
Small Rural	70	SOS_ALPHAMAX_SF_SR
Small Urban	90	SOS_ALPHAMAX_SF_SU
Large Rural	Estimation de α_{\max}	
Large Urban	Estimation de α_{\max}	
Oceanic model	Estimation de α_{\max}	

- Calculs des paramètres radiatifs de la granulométrie :
 - Coefficient d'extinction : $\sigma_{\text{ext}}^{(k)}$
 - Coefficient de diffusion : $\sigma_{\text{sca}}^{(k)}$
 - Fonctions de phase : $P_k(\Theta)$, $P_{12k}(\Theta)$, $P_{33k}(\Theta)$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 135 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Les calculs de l'albédo de simple diffusion et de la matrice de phase du mélange sont précisés dans la section VII.5.1.a.

On en déduit l'albédo de simple diffusion ($\omega_0 = \sigma_{\text{sca}} / \sigma_{\text{ext}}$) et on calcule les **coefficients de la matrice de phase** [$\alpha(k)$, $\beta(k)$, $\delta(k)$, $\gamma(k)$ et $\xi(k)$]. Une **troncature** peut éventuellement être appliquée sur la fonction de phase.

VII-6.2 Validation des calculs

Les résultats obtenus par le programme « AEROSOLS.F » pour les modèles de Shettle et Fenn ont été validés en les comparant aux tableaux de résultats présents dans le document [DR15] et aussi par comparaison avec des calculs générés au LOA (Laboratoire d'Optique Atmosphérique). On compare les valeurs de l'albédo simple diffusion (ω_0) et du paramètre d'asymétrie g , pour différentes longueurs d'onde et humidités relatives.

• Comparaison aux résultats de Shettle et Fenn :

Modèle et Humidité relative	λ (μm)	$\omega_{0 \text{ SOS}}$	$\omega_{0 \text{ S\&F}}$	g_{SOS}	$g_{\text{S\&F}}$
Troposphérique RH=0%	0.200	0.685	0.685	0.753	0.752
	0.3371	0.961	0.961	0.663	0.664
	0.550	0.959	0.959	0.634	0.635
	0.6943	0.954	0.954	0.615	0.615
	1.060	0.897	0.897	0.573	0.574
Troposphérique RH=99%	0.200	0.888	0.887	0.773	0.770
	0.3371	0.992	0.992	0.770	0.771
	0.550	0.992	0.992	0.761	0.761
	0.6943	0.991	0.992	0.747	0.748
	1.060	0.982	0.982	0.714	0.714
Urbain RH=0%	0.200	0.585	0.585	0.779	0.779
	0.3371	0.642	0.643	0.705	0.707
	0.550	0.638	0.638	0.660	0.662
	0.6943	0.624	0.624	0.641	0.641
	1.060	0.556	0.557	0.617	0.617
Urbain RH=99%	0.200	0.888	0.887	0.786	0.781
	0.3371	0.930	0.930	0.800	0.796
	0.550	0.942	0.942	0.795	0.795
	0.6943	0.944	0.944	0.787	0.787
	1.060	0.938	0.938	0.768	0.768
Maritime RH=0%	0.200	0.790	0.790	0.754	0.752

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 136 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

• **Comparaison aux résultats du LOA :**

Pour valider les résultats du programme « AEROSOLS », notamment pour les modèles Maritime et Côtier, nous avons comparé les fichiers « Aérosols » produits à des fichiers similaires provenant du LOA.

Nous avons contrôlé les paramètres α , β , γ et ξ de la matrice de phase, ainsi que l'albédo de simple diffusion et le coefficient de troncature.

♦ **Modèle mono-modal :**

Modèle Troposphérique : $\lambda = 0.670 \mu\text{m}$

RH = 0%

$\alpha_F = 330.00$ (paramètre de taille maximal des calculs de Mie).

Les contenus des fichiers du LOA (SeaWiFs670.T00) et « Aérosols » sont parfaitement identiques.

♦ **Modèles bi-modaux :**

Modèle	Fichiers	σ_e	σ_d	ω_0	ω_0^{tr}	A
URBAIN $\lambda=0.370 \mu\text{m}$ RH=95%	LOA (SeaWiFs370.U95) $\alpha_F=3400$	$\sigma_e = 0.33152 \cdot 10^{-8}$	$\sigma_d = 0.29138 \cdot 10^{-8}$	0.879		0.12719
	Programme AEROSOLS	$\tilde{\sigma}_e = 0.05726 \mu\text{m}^2$	$\tilde{\sigma}_d = 0.05035 \mu\text{m}^2$	0.879	0.872	0.12715
MARITIME $\lambda=0.565 \mu\text{m}$ RH=0%	LOA (SeaWiFs565.M00) $\alpha_F=1557$	$\sigma_e = 0.11328 \cdot 10^{-8}$	$\sigma_d = 0.11127 \cdot 10^{-8}$	0.982		0.26182
	Programme AEROSOLS	$\tilde{\sigma}_e = 0.01959 \mu\text{m}^2$	$\tilde{\sigma}_d = 0.01945 \mu\text{m}^2$	0.982	0.980	0.26177
COTIER $\lambda=0.670 \mu\text{m}$ RH=50% $\alpha_F=1323$	LOA (SeaWiFs670.C50)	$\sigma_e = 0.77168 \cdot 10^{-8}$	$\sigma_d = 0.75451 \cdot 10^{-8}$	0.978		0.19552
	Programme AEROSOLS	$\sigma_e = 0.03079$ $\tilde{\sigma}_e = 0.01335 \mu\text{m}^2$	$\sigma_d = 0.030109$ $\tilde{\sigma}_d = 0.01305 \mu\text{m}^2$	0.978	0.975	0.19540

NB : le programme « AEROSOLS » calcule des sections efficaces d'extinction alors que les simulations du LOA donnent des coefficients d'extinction. De plus, le coefficient d'extinction $\sigma_e^{\text{LOA}} = \sigma_e^{\text{OS}} \cdot \sqrt{2\pi} \cdot 10^{-8}$ car la loi log-normale n'est pas normalisée de la même manière dans le programme « AEROSOLS » et dans celui du LOA.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 137 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-7 Calcul des propriétés radiatives de modèles bi-modaux d'aérosols

VII-7.1 Principe théorique

Un modèle bi-modal d'aérosols s'exprime selon Dubovik et al. [DR6] par le mélange d'un mode fin et d'un mode grossier de particules, selon deux distributions log-normales. La répartition volumique en taille de particules est donnée par :

$$\frac{dV(r)}{d\ln r} = \sum_{i=1}^2 \frac{C_{v,i}}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \times \exp\left[\frac{-\ln^2(r/r_i)}{2\sigma_i^2}\right] \quad (95)$$

- avec
- $C_{v,i}$ la concentration volumique de particules du mode i (en $\mu\text{m}^3 / \mu\text{m}^2$).
 - r_i le rayon modal de la distribution du mode i (en μm).
 - σ_i le log népérien de la variance de la distribution du mode i.

La nature chimique de chaque mode est donnée par l'indice de réfraction des particules.

Pour chaque mode de particules, on réalise les calculs suivants :

- Calcul du fichier de Mie (s'il n'existe pas déjà) : (routine *SOS_MIE*)
La valeur limite du paramètre de taille utilisée pour les calculs de Mie est estimée par le logiciel, selon la même approche que pour les modèles de Shettle & Fenn (eq. 94, page 134).
- Calculs des paramètres radiatifs de la granulométrie : (routine *SOS_GRANU*)
 - Section efficace d'extinction : $\tilde{\sigma}_{ext}^{(i)}$
 - Section efficace diffusion : $\tilde{\sigma}_{sca}^{(i)}$
 - Fonctions de phase en intensité et polarisation : $P_i(\Theta)$, $P_{12i}(\Theta)$, $P_{33i}(\Theta)$

Les calculs de l'**albédo de simple diffusion** et de la **matrice de phase du mélange** sont précisés dans la section VII.5.1.a.

Les coefficients normalisés pondérant chacun des modes sont alors :

$$\alpha_i = \frac{C_{v,i}}{C_{v,1} + C_{v,2}} \quad (96)$$

Les **coefficients de la matrice de phase** [$\alpha(k)$, $\beta(k)$, $\delta(k)$, $\gamma(k)$ et $\xi(k)$] sont ensuite calculées (routine *SOS_DECOMPO_LEGENDRE*). Une **troncature** peut éventuellement être appliquée sur la fonction de phase.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 138 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-7.2 Introduction de la valeur des coefficients $C_{V,i}$

L'utilisateur a la possibilité de réaliser une simulation d'un modèle bi-modal en introduisant directement les concentrations volumiques.

Il peut également utiliser un rapport d'épaisseur optique entre les deux modes. Pour cela, il doit préciser :

- L'épaisseur optique totale de la couche d'aérosols pour une longueur d'onde de référence (λ_{ref}).
- La proportion de l'épaisseur optique du mode grossier dans l'épaisseur optique totale pour λ_{ref} :

$$r(\lambda_{\text{ref}}) = \frac{\tau_{\text{aer}}^{\text{C}}(\lambda_{\text{ref}})}{\tau_{\text{aer}}^{\text{tot}}(\lambda_{\text{ref}})} \quad (97)$$

$$\text{avec } \tau_{\text{aer}}^{\text{tot}}(\lambda_{\text{ref}}) = \tau_{\text{aer}}^{\text{F}}(\lambda_{\text{ref}}) + \tau_{\text{aer}}^{\text{C}}(\lambda_{\text{ref}}).$$

En fonction des données de granulométrie des particules de chaque mode et d'indice de réfraction pour λ_{ref} , le logiciel calcule, pour cette longueur d'onde, les sections efficaces de diffusion ($\tilde{\sigma}_{\text{sca}}^{\text{F}}(\lambda_{\text{ref}})$, $\tilde{\sigma}_{\text{sca}}^{\text{C}}(\lambda_{\text{ref}})$) et d'extinction ($\tilde{\sigma}_{\text{ext}}^{\text{F}}(\lambda_{\text{ref}})$, $\tilde{\sigma}_{\text{ext}}^{\text{C}}(\lambda_{\text{ref}})$).

On en déduit :

$$\begin{cases} C_{V,C} = \frac{r(\lambda_{\text{ref}}) \times \tau_{\text{aer}}^{\text{tot}}(\lambda_{\text{ref}})}{\tilde{\sigma}_{\text{ext}}^{\text{C}}(\lambda_{\text{ref}})} \\ C_{V,F} = \frac{(1 - r(\lambda_{\text{ref}})) \times \tau_{\text{aer}}^{\text{tot}}(\lambda_{\text{ref}})}{\tilde{\sigma}_{\text{ext}}^{\text{F}}(\lambda_{\text{ref}})} \end{cases} \quad (98)$$

Ces coefficients sont normalisés :

$$\alpha_{\text{F}} = \frac{C_{V,F}}{C_{V,F} + C_{V,C}} \text{ et } \alpha_{\text{C}} = \frac{C_{V,C}}{C_{V,F} + C_{V,C}} \quad (99)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 139 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-7.3 Validation des calculs

Une première validation a été faite concernant l'estimation automatique des contributions relatives de chaque mode par comparaison à des simulations du Laboratoire d'Optique Atmosphérique.

$\lambda = 0,55496 \mu\text{m}$	Mode fin		Mode grossier	
	$r_m = 0,1 \mu\text{m}$		$r_m = 0,8 \mu\text{m}$	
	$\sigma = 0,4$		$\sigma = 0,6$	
	$m_F = 1,43 - 0,01 \times i$		$m_C = 1,53 - 0,005 \times i$	
	$\tau_F = 0,45$		$\tau_C = 0,05$	
	LOA	Code des OSD	LOA	Code des OSD
Section efficace d'extinction : $\tilde{\sigma}_{ext}$	0,041132	$0,040976 \mu\text{m}^2$	9,567083	$9,56681 \mu\text{m}^2$
CV (non normalisé)	10,94039	10,98200 (soit 0,4% d'écart)	0,00523	0,005226 (soit 0,1% d'écart)

Les résultats obtenus par le programme « AEROSOLS.F » pour les modèles bi-modaux « utilisateur » ont également été validés en les comparant à ceux obtenus pour un modèle bi-modal de la WMO.

Paramètre du modèle WMO : Maritime		$\lambda = 0,400 \mu\text{m}$		$\lambda = 0,860 \mu\text{m}$	
Composant	Proportion	Indice		Indice	
Water-Soluble (mode fin)	$C_{V,F} = 438,660$	$m = 1,53 - 0,005 \times i$		$m = 1,52 - 0,012 \times i$	
Oceanic (mode grossier)	$C_{V,C} = 0,185$	$m = 1,385$		$m = 1,372$	
Comparaison des simulations		WMO	Bi-mode	WMO	Bi-mode
Section efficace de diffusion : $\tilde{\sigma}_{sca}$		0,002249	0,002252	0,001881	0,001884
Section efficace d'extinction : $\tilde{\sigma}_{ext}$		0,002278	0,002281	0,001907	0,001910
Facteur d'asymétrie : g		0,744	0,744	0,756	0,756
Albédo de simple diffusion ; ω_0		0,987	0,987	0,986	0,986
Albédo de simple diffusion tronquée ; ω_0^{tr}		0,983	0,983	0,982	0,982
Coefficient de troncature : A		0,5018	0,5021	0,4415	0,4415

Les infimes écarts viennent de calculs de MIE poussés à des limites α_{max} différentes entre les modèles WMO et les modèles bi-modaux « utilisateurs ».

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 140 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VII-8 Utilisation de fonctions de phase de source externe

Le programme SOS_AEROSOLS ne peut que calculer les propriétés radiatives de modèles d'aérosols sphériques (répondant au formalisme de Mie). Afin de simuler la diffusion d'aérosols non-sphériques, le code a la possibilité d'exploiter les fonctions de phase d'un fichier de données externes. L'utilisateur précise la localisation de ce fichier. Il doit s'assurer que ses données correspondent à une distribution d'aérosols orientées aléatoirement, de sorte à respecter la symétrie du champ de rayonnement par rapport au plan principal solaire.

VII-8.1 Format du fichier de fonctions de phase externes

Le format de ce fichier s'inspire de celui de l'outil DLS d'Oleg Dubovik [DR7] fournissant les propriétés de diffusion primaire de particules sphéroïdes homogènes orientées de façon aléatoire. Les premières lignes ont toutefois dues être adaptées pour le code SOS.

Il s'agit d'un fichier Ascii respectant les enregistrements suivants :

- 1^{ère} ligne: **EXTINCTION_COEF :Valeur**
Format : Valeur réelle, non formatée
Valeur : Section efficace d'extinction (μm^2)
Remarque : la valeur est interprétée comme la seconde partie de la ligne après le séparateur « : »
- 2^{ème} ligne: **SCATTERING_COEF :Valeur**
Format : Valeur réelle, non formatée
Valeur : Section efficace de diffusion (μm^2)
Remarque : la valeur lue est après le séparateur « : »
- 3^{ème} ligne: **NB_LINES : Valeur**
Format : Valeur entière, non formatée
Valeur : Nombre d'angles décrivant les fonctions de phase.
Remarque : la valeur lue est après le séparateur « : »
Ce nombre d'angles ne peut excéder la valeur **SOSMAXNB_ANG_EXT** (de SOS.h).

4^{ème} ligne: Commentaires

Lignes 5 à (5+NB_LINES-1) : **ANGLE F11 -F12/F11 F22/F1 F33/F11**

format : Valeurs réelles, non formatées

Valeurs : ANGLE : angle en degrés
F11 : fonction de phase en intensité P_{11}
-F12/F11 : rapport des fonctions $-P_{12}$ et P_{11}
F22/F11 : rapport des fonctions P_{22} et P_{11}
F33/F11 : rapport des fonctions P_{33} et P_{11}

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 141 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Convention de signe : la fonction F_{12} est négative pour la diffusion Rayleigh. Il s'agit de la même convention que celle interne au code SOS.

Pas de lecture des lignes suivantes.

Exemple de fichier de fonctions de phase externes

```

EXTINCTION_COEF : 5.43712E-02
SCATTERING_COEF : 5.39636E-02
NB_LINES : 99
Angle      F11      -F12/F11  F22/F11F33/F11
180.00  4.190E-01  0.000E+00  1.000E+00 -1.000E+00
178.57  3.522E-01  6.297E-02  1.000E+00 -6.856E-01
176.72  3.175E-01 -5.297E-02  1.000E+00 -2.274E-01
174.86  2.848E-01 -1.160E-01  1.000E+00 -2.901E-02
.
.
.

```

VII-8.2 Traitements spécifiques

Le code SOS_AEROSOLS réalise les traitements suivant :

- Lit les données du fichier de fonctions externes.
- Convertit les fonctions lues en fonction P_{11} , P_{12} , P_{22} , P_{33} pour les angles utilisateurs.
- Exprime les valeurs des fonctions P_{11} , P_{12} , P_{22} , P_{33} aux angles de Gauss par interpolation Splint.
- Décompose les fonctions en coefficients β_k^{11} , β_k^{22} , γ_k , δ_k , α_k , ξ_k .
- Enregistre les coefficients α_k , β_k^{11} , γ_k , ξ_k dédiés aux calculs des fonctions sources. Les coefficients β_k^{22} et δ_k servent au calcul des coefficients α_k et ξ_k .

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 142 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
-------	------------------------------------	---

VII-9 Rôle des routines associées au programme SOS AEROSOLS

VII-9.1 Procédures du fichier SOS AEROSOLS

• **SOS_AEROSOLS** : Programme principal gérant l'ensemble des calculs des propriétés radiatives des différentes granulométries d'aérosols. Les options de traitements sont définies en section III-2.

• **Routine SOS_NOM_FICMIE** : Génère un nom par défaut pour le fichier de Mie, composé à partir des paramètres de Mie :

- Partie réelle de l'indice de réfraction : m_r *format F5.3* (précision à 10^{-3})
- Partie imaginaire de l'indice de réfraction : m_i (valeur négative) *format F8.5* (précision à 10^{-5})
- Paramètre de taille minimal : α_{\min} $10^{-4} < \alpha_{\min} < 10$ *format F6.4*
- Paramètre de taille maximal : α_{\max} $10^{-2} < \alpha_{\max} < 10^5$ *format F8.2*
- Nombre d'angles de Gauss utilisés : nnn.
- Nom du fichier des angles complémentaires de l'utilisateur : USERFILE (sans son arborescence).

Le nom du fichier de Mie est de la forme : **MIE- m_r - m_i - α_{\min} - α_{\max} -MU $_{nnn}$ _USERFILE** avec

- m_r sur 5 caractères (ex : 1.400) - m_i (valeur positive) sur 7 caractères (ex : 0.00800)
- α_{\min} sur 6 caractères (ex : 0.0001) - α_{\max} sur 8 caractères (ex : 00500.00)

Exemple : Pour $m_r = 1.4$, $m_i = -0.008$, $\alpha_{\min} = 0.0001$, $\alpha_{\max} = 500$ et 40 angles de Gauss, on obtient le nom : « MIE1.400-0.00800-0.0001-00500.00-MU40 »

Les paramètres de simulations sont convertis en chaînes de caractères après multiplication par une puissance de 10 permettant d'obtenir un entier. Exemple pour la conversion de m_r en une chaîne de caractères CRN(1:4) : on passe du Format F5.3 au format I4 en multipliant m_r par 1000, avant conversion en une chaîne de caractères A4. Le premier caractère CRN(1) est le chiffre unité de m_r , le second caractère CRN(2) est la première décimale, le troisième CRN(3) est la seconde décimale et le quatrième CRN(4) est la troisième décimale.

• **Routine SOS_GRANU** : Calcule les coefficients d'extinction et de diffusion (en μm^{-1}), ainsi que les fonctions de phase en intensité et en polarisation, à partir des calculs de Mie réalisés par la routine SOS_MIE, pour une longueur d'onde donnée et pour une granulométrie mono-modale (distribution Log-Normale ou loi de Junge). Il n'y a pas d'application de troncature à ce niveau.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 143 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

• **Routine SOS_DECOMPO_LEGENDRE** : Calcule les paramètres $\alpha(k)$, $\beta^{11}(k)$, $\gamma(k)$, $\xi(k)$ de la décomposition de la matrice de phase en polynômes et fonctions de Legendre, à partir des fonctions de phase en intensité et en polarisation. Ces paramètres sont tronqués si l'option de troncature est retenue. La routine estime le coefficient de troncature A.

• **Routine SOS_INIT_PARAMWMO :**

Cette procédure lit le contenu du fichier « Data_WMO » contenant des données de la WMO (paramètres microphysiques des composants élémentaires et indices de réfraction en fonction de la longueur d'onde). Elle initialise l'ensemble des paramètres de chaque constituant de la WMO, pour la longueur d'onde de simulation :

- rayon modal,
- variance (log10),
- concentration volumique,
- partie réelle de l'indice de réfraction,
- partie imaginaire de l'indice de réfraction.

L'indice de réfraction des particules est estimé pour la longueur d'onde de simulation par interpolation linéaire. Il est forcé au format F5.3 pour la partie réelle et F8.5 pour la partie imaginaire (valeur négative).

• **Routine SOS_INIT_PARAMSF :**

Cette procédure lit le contenu des fichiers de données relatifs aux composants de Shettle & Fenn :

- Fichier « Data_SF » donnant les paramètres microphysiques en fonction de l'humidité relative (variance, rayon modal)
- Fichiers « IRefrac_XX » (XX = SR, LR, SU, LU ou OM) donnant les indices de réfraction en fonction de la longueur et de l'humidité relative.

La procédure initialise l'ensemble des paramètres de chaque constituant des modèles de Shettle & Fenn pour la longueur d'onde et l'humidité relative de simulation :

- rayon modal,
- variance (log10),
- partie réelle de l'indice de réfraction,
- partie imaginaire de l'indice de réfraction.

L'indice de réfraction des particules est estimé pour la longueur d'onde de simulation par interpolation linéaire. Il est forcé au format F5.3 pour la partie réelle et F8.5 pour la partie imaginaire (valeur négative).

• **Routine SOS_INTERPOL** : Réalise l'interpolation linéaire en X d'une fonction Y(X) connaissant les valeurs (X1,Y1) et (X2,Y2).

• **Routine SOS_INTERPOSPLINT** : Soit une fonction Y(X) définie par NB_{IN} nœuds (X_{IN}, Y_{IN}). Cette procédure interpole la fonction aux abscisses X_{OUT} pour NB_{OUT} nœuds (X_{OUT}, Y_{OUT}).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 144 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

La démarche repose sur l'utilisation des fonctions **SPLINE** et **SPLINT**

- Les nœuds (X_{IN} , Y_{IN}) sont en premier triés par ordre croissant d'abscisse $X_{IN} \rightarrow (X_{IN_TRIE}, Y_{IN_TRIE})$.
- La fonction **SPLINE** calcule les dérivées secondes de Y_{IN_TRIE} en X_{IN_TRIE} à partir des valeurs Y_{IN_TRIE} de la fonction aux abscisses X_{IN_TRIE} et des valeurs de dérivée première de la fonction au premier et dernier nœud (i.e. pour les valeurs minimale et maximale de X_{IN_TRIE}).
- La fonction **SPLINT** calcule les valeurs Y_{OUT} aux abscisses X_{OUT} en fonction des valeurs de la fonction et de sa dérivée seconde aux abscisses X_{IN_TRIE} .

• **Routine SOS_SPLINE :**

Cette procédure calcule les valeurs de dérivées secondes d'une fonction définie par (X, Y) sur N nœuds (supposés triés par ordre croissant de X) et par ses valeurs de dérivées premières aux nœuds extrêmes (X_1, DY_1) et (X_N, DY_N). La routine renvoie les valeurs de dérivées secondes en chaque point.

• **Routine SOS_SPLINT :**

Cette procédure interpole une fonction en un point X_{VAL} à partir de trois vecteurs de même dimension $X(1:N)$, $Y(1:N)$ et $D2Y(1:N)$ qui donnent respectivement les abscisses, les ordonnées et les dérivées secondes de la fonction.

VII-9.2 Procédures du fichier SOS MIE

• **Routine SOS_MIE :** Réalise l'ensemble des traitements permettant la génération d'un fichier de MIE.

Calculs pour un indice de réfraction des particules (partie réelle et imaginaire) et entre deux limites de paramètres de taille.

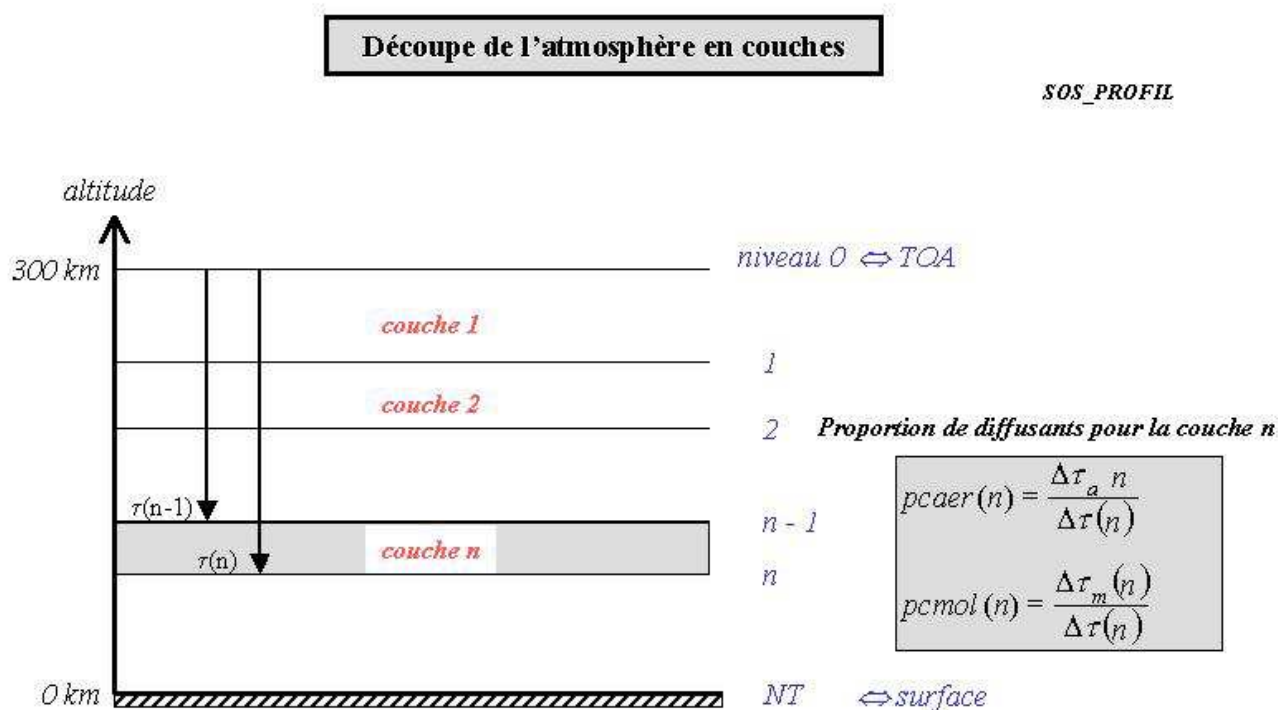
• **Routine SOS_XERO :** Initialise à zéro un tableau d'éléments en double précision.

• **Routine SOS_FPHASE_MIE :** Calcule les fonctions $P(\Theta, m, \alpha)$, $Q(\Theta, m, \alpha)$ et $T(\Theta, m, \alpha)$ de la matrice de phase de Mie, à partir des relations (45) (49) (63) (64) (65).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 145 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
-------	------------------------------------	---

VIII- Définition du profil atmosphérique

VIII-1 Profil atmosphérique pour le code des OS



Pour le code des OS, le profil de concentration des particules atmosphériques (aérosols et molécules) est rendu par une découpe de l'atmosphère en une succession de couches. La découpe n'est pas faite en niveaux d'altitudes mais en niveaux d'épaisseurs optiques, plus adaptés à un calcul de transfert radiatif. Connaissant l'épaisseur optique des aérosols et des molécules par niveau, on peut définir une proportion de ces composants dans chaque couche n (entre les niveaux $n-1$ et n) rendant compte de leur contribution pour la diffusion au sein de cette couche.

Les couches d'aérosols sont supposées homogènes en altitude : la fonction de phase associée ne dépend pas du niveau. Les propriétés de diffusion des molécules ne dépendent pas non plus du niveau du profil. L'expression d'une matrice de phase P_a pour la diffusion des aérosols et P_m pour la diffusion moléculaire suffit pour décrire leur diffusion. Par contre, il faut tenir compte de la répartition relative des composants pour chaque couche. Pour un mélange, la fonction de phase globale sera :

$$\omega_0 \times \tilde{P}(\tau, \Theta) = \omega_0^{aer} \times p_{aer}(\tau) \times \tilde{P}_a(\Theta) + p_{cray}(\tau) \times \tilde{P}_m(\Theta) \quad (100)$$

On prend en compte l'albédo de simple diffusion des aérosols ω_0^{aer} pour n'inclure dans le profil $p_{aer}(n)$ que la proportion des aérosols participant à la diffusion.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 146 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Pour chaque niveau, la matrice de phase, tenant compte du mélange des particules, caractérise les propriétés de diffusion de la couche immédiatement au-dessus.

VIII-2 Contenu et format d'un fichier de profil pour le code des OS

Un profil est défini par SOS_OS_NT + 1 niveaux, du TOA (niveau 0) au sol (niveau SOS_OS_NT). Chaque niveau renseigne sur les propriétés de diffusion de la sous-couche le surplombant. La valeur de SOS_OS_NT est définie comme une constante renseignée dans le fichier SOS.h.

Le fichier de PROFIL pour les OS doit contenir **une ligne d'enregistrement par niveau du profil**. Chaque ligne précise :

- le **numéro de niveau** : I,
- l'**épaisseur optique totale d'extinction** pour le niveau I,
- la **proportion d'aérosols** pour l'extinction de la **sous-couche I**,
- la **proportion de molécules** pour l'extinction de la **sous-couche I**.

Les paramètres radiatifs du profil correspondent à un **profil sans ajustement des paramètres pour une troncature de la fonction de phase des aérosols**. Si les traitements des OS utilisent une fonction de phase tronquée, les paramètres du profil seront ajustés à la troncature après lecture de ce fichier.

Un fichier de PROFIL est un fichier Ascii formaté. Le format retenu est le suivant : **2X, I4, 3(F9.5)**.

VIII-3 Choix de simulation du profil

- **Fichier utilisateur** : l'utilisateur peut utiliser un profil atmosphérique déjà existant. Ce fichier doit être au format requis par le code des OS (section VIII-2).

L'utilisateur peut aussi générer de nouveaux fichiers de profil. Il dispose pour cela de deux possibilités :

- **Profil par échelles de hauteurs** : décomposition de l'atmosphère à partir de profils de molécules et d'aérosols basés sur une décroissance exponentielle de l'épaisseur optique avec l'altitude. A chaque composant est associée une échelle de hauteur. (*option profil = 1*)
- **Profil avec une couche d'aérosols entre deux altitudes** : profil atmosphérique avec la possibilité de positionner une couche mixte d'aérosols et de molécules entre deux altitudes. La répartition entre les composants est supposée homogène pour cette couche (l'épaisseur optique des aérosols d'une sous-couche est toujours proportionnelle à celle des molécules). (*option profil = 2*)

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 147 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Les choix de simulations sont introduits dans le Khorn-Shell de lancement (chapitre III-2).

Tableau 15 : Paramètres d'entrée pour le choix des différents profils.

Option profil	Nom du fichier	Modèle	Paramètres physiques utiles
1	DEFAULT	Définition du profil par décroissance exponentielle avec l'altitude de l'épaisseur optique moléculaire et aérosol. Utilisation d'échelles de hauteur.	<i>Molécules :</i> - δ_m : épaisseur optique moléculaire, - h_m : échelle de hauteur. <i>Aérosols :</i> - δ_a : épaisseur optique des aérosols, - h_a : échelle de hauteur des aérosols.
2	DEFAULT	Couche d'aérosols à positionnement variable dans l'atmosphère (mélange homogène avec les molécules). Evolution de l'épaisseur optique moléculaire par décroissance exponentielle avec l'altitude.	<i>Molécules :</i> - δ_m : épaisseur optique moléculaire, - h_m : échelle de hauteur. <i>Aérosols :</i> - δ_a : épaisseur optique des aérosols, - Z_{min} : altitude minimale de la couche, - Z_{max} : altitude maximale de la couche.
inutile	Nom utilisateur	Utilisation du fichier utilisateur. Le format du fichier doit être celui requis par le code des OS.	

VIII-4 Passage des paramètres à l'exécutable SOS_PROFIL.exe

Le script main_SOS.ksh gère le passage des paramètres au programme SOS_PROFIL.

Ce programme calcule le profil d'épaisseurs optiques des molécules et des aérosols en fonction des paramètres définis par l'utilisateur, aussi :

- Le nom du de fichier à produire est à préciser (-AP.ResFile, mais pas AP.UserFile).
- L'épaisseur optique des aérosols est à préciser -AP.AOT.

PARAMETRES DU PROGRAMME SOS_PROFIL	
AP.Log	Nom du fichier trace des calculs du programme PROFIL <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
AP.ResFile	Nom du fichier PROFIL qui sera créé par le code (Fichier écrasé à chaque simulation)

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 148 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
-------	------------------------------------	---

<i>Molécules</i>	
AP.MOT	Epaisseur optique Rayleigh
<i>Si AP.MOT ≥ 0.0001</i>	
AP.HR	Echelle de hauteur du profil moléculaire (km)
<i>Aérosols</i>	
AP.AOT	Epaisseur optique des aérosols
<i>Type de profil</i>	
AP.Type	Type de profil simulé : 1 : profil défini par simples échelles de hauteur 2 : profil défini avec trois couches distinctes : molécules, molécules + aérosols, molécules
<i>Si AP.Type = 1 et AP.AOT ≥ 0.0001</i>	
AP.AerHS.HA	Echelle de hauteur du profil d'aérosols (km)
<i>Si AP.Type = 2</i>	
AP.AerLayer.Zmin	Altitude minimale de la couche du mélange molécules + aérosols (en km) <i>NB : 0 possible pour un cas à deux couches : molécules + aérosols, molécules</i>
AP.AerLayer.Zmax	Altitude maximale de la couche du mélange molécules + aérosols (en km)

Parameters for program SOS_PROFIL

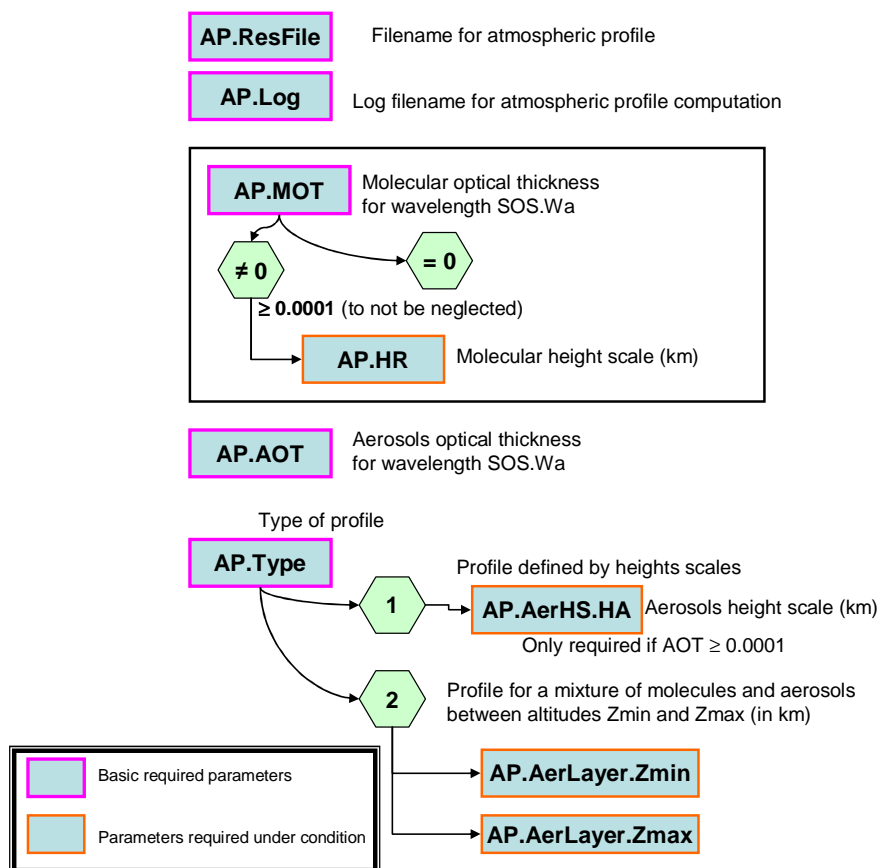


Figure 14 : Paramètres du profil atmosphérique pour l'appel du programme SOS_PROFIL

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 149 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VIII-5 Définition du profil atmosphérique établi par échelles de hauteur

Programme SOS_PROFIL.F : option profil = 1

Le fichier SOS_PROFIL.F contient les routines permettant de définir le profil atmosphérique en épaisseur optique et en proportion de diffusants (molécules, aérosols) en fonction du niveau, pour une décroissance exponentielle de l'épaisseur optique moléculaire, en $\exp(-z/h_m)$, et aérosols, en $\exp(-z/h_a)$. L'échelle de hauteur des molécules est typiquement de 8 km, alors que celle des aérosols est de 2 km, ce qui traduit une plus forte concentration des aérosols dans les basses couches.

On définit le profil de l'épaisseur optique moléculaire $\tau_m(z)$ et aérosols $\tau_a(z)$ par :

$$\begin{cases} \tau_m(z) = \tau_m \times \exp(-z / h_m) \\ \tau_a(z) = \tau_a \times \exp(-z / h_a) \end{cases} \quad (101)$$

Connaissant l'épaisseur optique totale des molécules et des aérosols (τ_m et τ_a), ainsi que les échelles de hauteur associées à leurs profils (h_m et h_a), on souhaite définir le profil du mélange pour une découpe de l'atmosphère en NT couches. Il s'agit d'exprimer pour chaque niveau n du profil, la proportion de diffusant moléculaire **pccray(n)** et aérosols **pcaer(n)**, ainsi que l'épaisseur optique totale **$\tau(n)$** . Le problème algorithmique consiste en la détermination de $\tau(n)$ pour chaque niveau n. Il faut ainsi estimer l'altitude à attribuer au niveau n du profil, de sorte à avoir une découpe en épaisseur optique satisfaisante.

Trois cas sont possibles :

- Cas 1 : couche atmosphérique sans diffusion moléculaire
- Cas 2 : couche atmosphérique sans diffusion aérosols
- Cas 3 : couche atmosphérique avec diffusion des molécules et des aérosols

• **Cas 1 et 2 :** le profil est homogène. Il est ainsi possible de prendre un pas régulier en $\Delta\tau$ en deux niveaux consécutifs.

• **Cas 3 :** on considère deux diffusants de profils d'épaisseurs optiques différents.

On fixe le niveau $n = 0$ au TOA à 300 km d'altitude. On procède par détermination successive des altitudes à attribuer aux niveaux n.

Du niveau du profil $n = 1$ à NT :

- Estimation de l'altitude correspondante $z(n) \rightarrow$ voir routine SOS_DISC.
- Application au calcul de l'épaisseur optique :

$$\tau(n) = \tau_m \times \exp(-z(n)/h_m) + \tau_a \times \exp(-z(n)/h_a) \quad (102)$$

- Calcul de la proportion de molécules et d'aérosols pour la diffusion dans la couche n :

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 150 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{cray}(n) = \frac{\tau_m [z(n)] / h_m}{\tau_m [z(n)] / h_m + \tau_a [z(n)] / h_a} \\ p_{caer}(n) = \frac{\tau_a [z(n)] / h_a}{\tau_m [z(n)] / h_m + \tau_a [z(n)] / h_a} \end{array} \right. \quad (103)$$

On établit cette relation en exprimant la variation de l'épaisseur optique autour de z :

$$\frac{\partial \tau(z)}{\partial z} = - \left(\frac{\tau_m(z)}{h_m} + \frac{\tau_a(z)}{h_a} \right) \approx \frac{\Delta \tau(z)}{\Delta z}$$

VIII-6 Couche d'aérosols entre deux altitudes variables

Programme SOS_PROFIL.F : option profil = 2

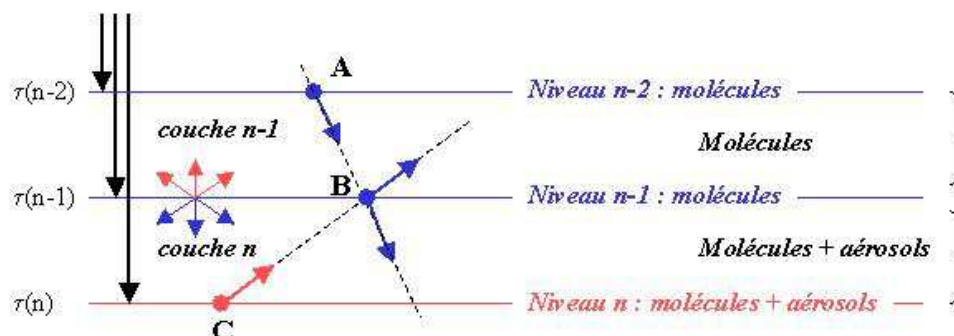
Le fichier SOS_PROFIL.F contient les traitements permettant de définir le profil atmosphérique en épaisseur optique et en proportion de diffusants (molécules, aérosols) en fonction du niveau, pour une décroissance exponentielle de l'épaisseur optique moléculaire, en $\exp(-z/h_m)$, et pour une couche d'aérosols caractérisée par son épaisseur optique et sa position dans l'atmosphère (entre deux altitudes Z_{\min} et Z_{\max}). Il est possible de faire débiter la couche d'aérosols à partir du sol ($Z_{\min} = 0$).

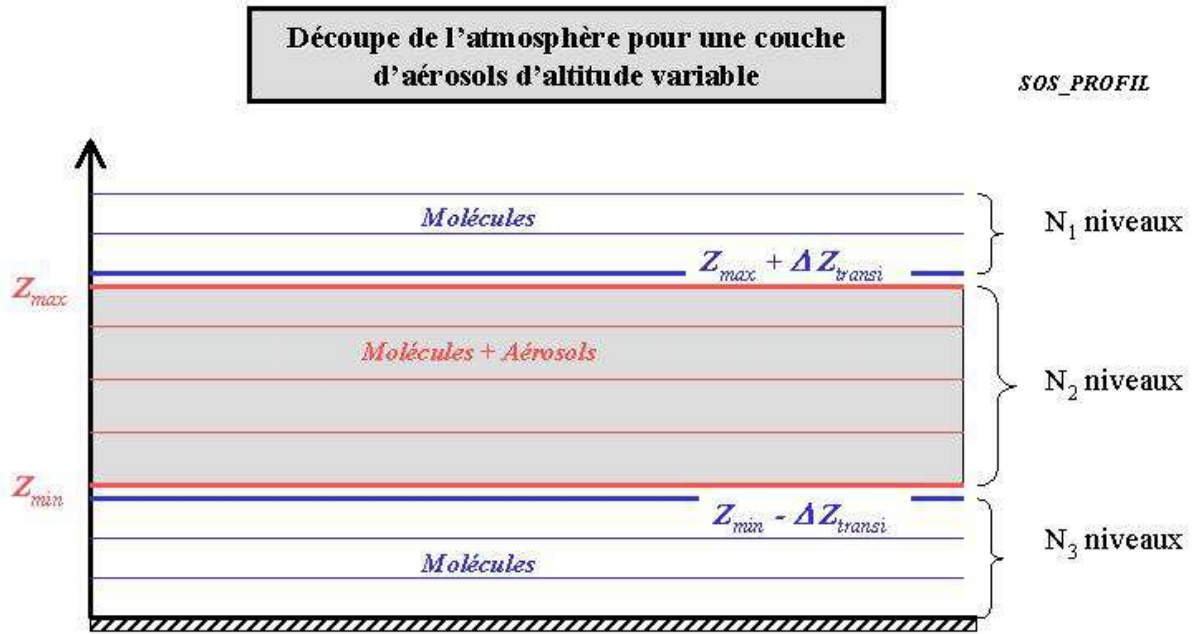
VIII-6.1 But du traitement

Le positionnement d'une couche mixte d'aérosols et de molécules dans le profil atmosphérique introduit une découpe de l'atmosphère en trois couches distinctes :

- Une couche purement moléculaire du sol à l'altitude Z_{\min} ,
- La couche mixte d'aérosols et de molécules entre Z_{\min} et Z_{\max} ,
- Une couche purement moléculaire de l'altitude Z_{\max} au sommet de l'atmosphère.

Il faut cependant faire intervenir de fines sous-couches de transition entre chacune des trois couches pour réduire les ruptures de continuité. Par exemple, sur le schéma de profil suivant, on positionne une couche moléculaire pure jusqu'au niveau n-1, suivie d'une couche d'aérosols à partir du niveau n. La matrice de phase représentant la couche n est définie au niveau n. Or, le calcul de la contribution à la diffusion de la couche n se fait par linéarisation de la fonction source entre les niveaux n-1 et n. Ainsi, le champ de rayonnement descendant au niveau n-1 (point B), traversant la couche moléculaire pure n-1, fait exclusivement intervenir la diffusion moléculaire entre A et B. Par contre, le champ montant pour ce même niveau, entre C et B, fait intervenir la diffusion du mélange d'aérosols et de molécules (point C) mais aussi la diffusion moléculaire pure (point B). A l'interface entre deux couches aux propriétés radiatives différentes, l'intégration du champ de rayonnement montant n'est ainsi pas exactement représentative de la couche sous-jacente. On a exactement le même problème pour le champ descendant au niveau n. On réduit ce problème numérique en introduisant une sous-couche limite de très faible épaisseur optique entre les couches des deux types de diffusants.





VIII-6.2 Description du profil

• La **couche 1** est composée de N_1 sous-couches purement moléculaires. Elle est définie de $Z_{\max} + \Delta Z_{\text{transi}}$ à l'espace, du niveau 0 à N_1 . La découpe en épaisseur optique est réalisée avec un pas régulier en $\Delta\tau$.

L'épaisseur optique de la couche est :

$$\tau_{\text{mol}}^{(1)} = \tau_m \times \exp\left[-(Z_{\max} + \Delta Z_{\text{transi}})/h_m\right] \quad (104)$$

Chaque sous-couche a une épaisseur optique verticale valant $\tau_{\text{mol}}^{(1)} / N_1$.

• La **couche 2**, composée de molécules et d'aérosols, est définie pour les niveaux de Z_{\min} à Z_{\max} . Le niveau $(N_1 + 1)$, correspondant à l'altitude Z_{\max} , représente la sous-couche de transition (Z_{\max} à $Z_{\max} + \Delta Z_{\text{transi}}$). Une découpe en N_2 sous-couches d'épaisseurs optiques est faite pour un pas régulier en altitude. On estime $\Delta Z = (Z_{\max} - Z_{\min}) / N_2$. A chaque niveau de la couche est associée une altitude. On calcule l'épaisseur optique moléculaire correspondante. L'épaisseur optique des aérosols d'une sous-couche est proportionnelle à celle des molécules :

$$\begin{cases} \tau_{\text{mol}}^{(2)} = \tau_m \times \left\{ \exp[-Z_{\min}/h_m] - \exp[-(Z_{\max} + \Delta Z_{\text{transi}})/h_m] \right\} \\ \Delta\tau_{\text{aer}}(n) = \tau_{\text{aer}} \times [\Delta\tau_{\text{mol}}(n) / \tau_{\text{mol}}^{(2)}] \end{cases} \quad (105)$$

• La **couche 3**, purement moléculaire, est définie du sol à $Z_{\min} - \Delta Z_{\text{transi}}$. Le niveau correspondant à l'altitude $Z_{\min} - \Delta Z_{\text{transi}}$, représente la sous-couche de transition ($Z_{\min} - \Delta Z_{\text{transi}}$ à Z_{\min}). Une découpe en N_3 sous-couches d'épaisseurs optiques est réalisée avec un pas régulier en $\Delta\tau$.

Profil atmosphérique

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 153 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

L'épaisseur optique de la couche est :

$$\tau_{\text{mol}}^{(3)} = \tau_{\text{m}} \times \left(1 - \exp\left[-(Z_{\text{min}} - \Delta Z_{\text{transi}})/h_{\text{m}}\right] \right) \quad (106)$$

Chaque sous-couche a une épaisseur optique verticale valant $\tau_{\text{mol}}^{(3)} / N_3$.

VIII-6.3 Détermination du nombre de sous-couches par couche

On détermine le nombre de sous-couches des couches moléculaires par le poids de leurs épaisseurs optiques $\tau_{\text{mol}}^{(i)}$ devant l'épaisseur optique totale de l'atmosphère ($\tau_{\text{a}} + \tau_{\text{m}}$). On utilisera au minimum NBC sous-couches (constante SOS_PROFIL_MIN_NBC du fichier SOS.h). Par défaut, nous prenons NBC = 3.

$$\begin{cases} N_1 = \text{Max}\left(\text{NBC}, \frac{\tau_{\text{mol}}^{(1)}}{\tau_{\text{a}} + \tau_{\text{m}}} \times \text{NT}\right) \\ N_3 = \text{Max}\left(\text{NBC}, \frac{\tau_{\text{mol}}^{(3)}}{\tau_{\text{a}} + \tau_{\text{m}}} \times \text{NT}\right) \end{cases} \quad (107)$$

où NT = SOS_OS_NT, le nombre de sous-couches total défini dans le fichier SOS.h.

Le nombre de sous-couches du mélange d'aérosols et de molécules N_2 est ensuite simplement déterminé par :

$$N_1 + N_2 + N_3 + N_{\text{transi}} = \text{NT} \quad (108)$$

avec N_{transi} le nombre de sous-couches de transition (1 si $Z_{\text{min}} = 0$ et 2 sinon)

VIII-6.4 Estimation de la proportion des espèces pour l'extinction :

Le programme détermine les épaisseurs optiques moléculaires des 3 couches et le nombre de sous-couches à utiliser. Il calcule l'épaisseur optique moléculaire et aérosols pour chaque niveau du profil. Pour chaque niveau n du profil, il calcule l'épaisseur optique totale $\tau(n)$ et la proportion de diffusant moléculaire **p_{cray}(n)** et aérosols **p_{caer}(n)**. L'expression des proportions de diffusant est réalisée selon la relation :

$$\begin{cases} \text{p}_{\text{cray}}(n) = \frac{\Delta\tau_{\text{m}}(n)}{\Delta\tau_{\text{m}}(n) + \Delta\tau_{\text{a}}(n)} \\ \text{p}_{\text{caer}}(n) = \frac{\Delta\tau_{\text{a}}(n)}{\Delta\tau_{\text{m}}(n) + \Delta\tau_{\text{a}}(n)} \end{cases} \quad (109)$$

Or, comme pour chaque sous-couche on a : $\Delta\tau_{\text{a}}(n) = \tau_{\text{a}} \times (\Delta\tau_{\text{m}}(n) / \tau_{\text{mol}}^{(2)})$, on peut écrire :

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 154 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

$$\begin{cases} p_{cray}(n) = \frac{1}{1 + \tau_a / \tau_{mol}^{(2)}} \\ p_{caer}(n) = \frac{\tau_a / \tau_{mol}^{(2)}}{1 + \tau_a / \tau_{mol}^{(2)}} \end{cases} \quad (110)$$

VIII-7 Description des fichiers de sortie

- **Fichier PROFIL résultat** : voir la section VIII-2 en page 146.

- **Fichier Trace** : Fichier texte Ascii

Le fichier trace n'est pas créé si l'utilisateur saisit 0 en place de son nom.

- Rappel des paramètres de simulations utiles selon l'option de simulation.
- Pour un profil d'aérosols entre deux niveaux d'altitudes (iprofil = 2) : nombre de sous-couches pour chaque couche (moléculaires pures et mixte), précision sur le nombre de sous-couches de transition.
- Précision sur la construction du profil :
 - Numéro de niveau I et altitude correspondante (en km),
 - Epaisseur optique moléculaire, d'extinction des aérosols, et épaisseur optique totale,
 - Proportion d'aérosols et de molécules pour l'extinction dans la couche I.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 155 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

VIII-8 Rôle des routines associées au programme SOS PROFIL

- **SOS_PROFIL** : Programme principal gérant l'ensemble des traitements permettant la création d'un fichier PROFIL pour les OS. Les options de traitements sont définies en section III-2.

- **Routine SOS_DISC** :

L'objectif de cette routine est d'estimer l'altitude $z(n)$ pour un niveau n , connaissant l'épaisseur optique totale de l'atmosphère et celle attribuée au niveau $n-1$.

On initialise le problème en posant que l'altitude du niveau $n = 0$ (TOA) est $z(0) = 300$ km. Pour ce niveau l'épaisseur optique est nulle $\tau(0) = 0$.

A) La couche atmosphérique du sol au niveau $n-1$ est découpée en sous couches de mêmes épaisseurs optiques. On estime ainsi une première valeur de l'épaisseur optique du niveau n .

B) On évalue l'altitude correspondante à ce niveau n par une méthode de dichotomie.

C) La proportion moléculaire est calculée pour le niveau n . Si elle s'écarte de la proportion du niveau $n-1$ de plus de 75%, la variation est trop importante. On réduit d'un facteur 2 le pas en épaisseur optique entre les niveaux $n-1$ et n . On reprend l'estimation de l'altitude correspondante au point B.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 156 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

IX- Réflexion de surface

Le code des Ordres Successifs permet la simulation des interactions « surface – atmosphère » en intensité et en polarisation. Le programme « SOS_SURFACE.F » gère l'ensemble des traitements permettant la création d'un fichier de BRDF / BPDF au format requis par le code des OS. Le cas échéant, le programme « SOS_OS.F » utilise ces matrices pour prendre en compte les interactions successives « surface – atmosphère ».

Cette partie précise les traitements relatifs à la modélisation de la réflexion de surface.

IX-1 Caractérisation des réflexions de surface par le code des OS

IX-1.1 Expression de la luminance par réflexion de surface

IX.1.1.a REFLEXION LAMBERTIENNE

Pour une surface de réflexion lambertienne, l'intensité incidente est réfléchiée de manière isotrope.

Nommons $\vec{E} = (E, 0, 0)$ le vecteur de Stokes pour l'éclairement solaire au TOA, sous une incidence (μ_0, ϕ_0) et τ^* l'épaisseur optique totale de l'atmosphère.

Le flux solaire direct atteignant la surface, atténué par sa traversée de l'atmosphère, est :

$$F_1 = -\mu_0.E.\exp(\tau^*/\mu_0). \quad (111.a)$$

Le flux de lumière diffuse d'ordre n-1 éclairant la surface est :

$$F_{n-1} = \int_{\phi'=0}^{2\pi} \int_{\mu'=-1}^0 I_{n-1}(\tau^*, \mu', \phi') \mu' d\mu' d\phi' \quad (111.b)$$

Soit ρ l'albédo de la surface, la luminance réfléchiée pour toute direction (μ, ϕ) sur la surface lambertienne est :

$$I_n(\tau^*, \mu, \phi) = \frac{\rho}{\pi} F_n \quad (111.c)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 157 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX.1.1.b REFLEXION DIRECTIONNELLE POUR UN MODELE DE BRDF

Un modèle de BRDF introduit une dépendance directionnelle de la réflectance : $\rho(\mu, \phi, \mu', \phi')$.

La réflexion du flux solaire direct atteignant la surface est :

$$I_1(\tau^*, \mu, \phi) = \frac{\rho(\mu, \phi, \mu_0, \phi_0)}{\pi} \cdot \mu_0 \cdot E \cdot \exp(\tau^* / \mu_0). \quad (112.a)$$

La réflexion de la luminance diffuse d'ordre n-1 éclairant la surface est :

$$I_n(\tau^*, \mu, \phi) = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{\phi'=0}^{2\pi} \int_{\mu'=-1}^0 \rho(\mu, \phi, \mu', \phi') \cdot I_{n-1}(\tau^*, \mu', \phi') \cdot \mu' \cdot d\mu' \cdot d\phi' \quad (112.b)$$

IX.1.1.c REFLEXION DIRECTIONNELLE POUR UN MODELE DE BPDF

Un modèle de BPDF introduit une dépendance directionnelle également sur les termes de polarisation par réflexion. La réflexion de l'éclairement direct et diffus sur la surface, vers la direction (μ, ϕ) , s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \bar{L}_{sol}^{\uparrow}(\tau^*, \mu, \phi) &= \bar{\bar{M}}(\mu, \phi, \mu_0, \phi_0) \cdot \bar{E} \cdot \exp(\tau^* / \mu_0) \\ &+ \int_{\phi'=0}^{2\pi} \int_{\mu'=-1}^0 \bar{\bar{M}}(\mu, \phi, \mu', \phi') \cdot \bar{L}_{sol}^{\downarrow}(\tau^*, \mu', \phi') \cdot d\mu' \cdot d\phi' \end{aligned} \quad (113)$$

avec $\bar{\bar{M}}(\mu, \phi, \mu', \phi')$ la matrice de réflexion de surface.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 158 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX.1.1.d APPLICATION AU FORMALISME DES OS

• Le code des OS utilise un formalisme de décomposition en séries de Fourier par rapport à l'azimut relatif. De plus, il calcule des luminances normalisées et utilise $E = \pi$.

Pour un ordre S de la série, la réflexion lambertienne s'écrit :

- Réflexion de l'éclairement solaire au sol : $I_1^{S=0}(\tau^*, \mu) = -\rho \cdot \mu_0 \cdot \exp(\tau^* / \mu_0)$ (114.a)

- Réflexion de la lumière diffuse d'ordre n-1 : $I_n^{S=0}(\tau^*, \mu) = 2\rho \cdot \int_{-1}^0 I_{n-1}^{S=0}(\tau^*, \mu') \cdot \mu' \cdot d\mu'$ (114.b)

Pour un ordre S de la série, une réflexion par une BRDF / BPDF s'écrit :

$$\begin{aligned} \bar{L}_{sol}^{\uparrow S}(\tau^*, \mu) &= \bar{\bar{M}}^S(\mu_0, \mu) \begin{pmatrix} \pi \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \exp(\tau^* / \mu_0) \\ &+ 2\pi \cdot \int_{-1}^0 \bar{\bar{M}}^S(\mu', \mu) \cdot \bar{L}_{sol}^{\downarrow S}(\tau^*, \mu') \cdot d\mu' \end{aligned} \quad (115)$$

• La matrice de réflexion de surface effectivement calculée pour les OS est :

$$\boxed{\bar{\bar{P}}^S(\mu', \mu) = \mu \cdot \pi \times \bar{\bar{M}}^S(\mu', \mu)} \quad (116)$$

La relation (115) pour un calcul de luminance normalisée est alors pour les OS :

$$\boxed{\begin{aligned} \bar{L}_{sol}^{\uparrow S}(\tau^*, \mu) &= \frac{1}{\mu} \cdot \bar{\bar{P}}^S(\mu_0, \mu) \cdot \exp(\tau^* / \mu_0) \\ &+ \frac{2}{\mu} \cdot \int_{-1}^0 \bar{\bar{P}}^S(\mu', \mu) \cdot \bar{L}_{sol}^{\downarrow S}(\tau^*, \mu') \cdot d\mu' \end{aligned}} \quad (117)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 159 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

IX-1.2 Propriétés des surfaces requises pour le code des OS

Les propriétés de réflexion d'une surface sont caractérisées par une composante lambertienne donnée par l'**albédo de réflexion** et par une composante directionnelle exprimée par une **matrice de réflexion** (BRDF : fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle et BPDF : réflectance bidirectionnelle en polarisation). Les paramètres utiles au calcul de cette matrice dépendent du type de modélisation (indice de réfraction, vitesse de vent, paramètres de Roujean ou de Nadal).

Modèle	Paramètres requis
Glitter	<ul style="list-style-type: none"> - Indice de réfraction - Vitesse de vent
Mer plate	<ul style="list-style-type: none"> - Indice de réfraction
BRDF de Roujean	<ul style="list-style-type: none"> - Paramètres du modèle : k_0, k_1, k_2
BPDF de Rondeaux ou Bréon / avec BRDF de Roujean	<ul style="list-style-type: none"> - Indice de réfraction - Paramètres du modèle de Rondeaux : k_0, k_1, k_2
BPDF de Nadal / avec BRDF de Roujean	<ul style="list-style-type: none"> - Indice de réfraction - Paramètres du modèle de Nadal : α, β - Paramètres du modèle de Rondeaux : k_0, k_1, k_2

Le code des OS fonctionne à partir d'une décomposition en séries de Fourier du champ de luminance (cf. section VI-2, page 65). La matrice de réflexion est adaptée à ce formalisme et dépend de l'ordre S de la décomposition.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 160 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX-1.3 Contenu et format d'un fichier SURFACE pour le code des OS

Le programme « SOS_SURFACE.F » permet le calcul des matrices de réflexion pour une décomposition en séries de Fourier.

La matrice de réflexion $P^S(\mu, \mu')$ pour chaque ordre S de la série de Fourier est de la forme :

$$P^S(\mu, \mu') = \begin{pmatrix} P_{11}^S(\mu', \mu) & P_{12}^S(\mu', \mu) & P_{13}^S(\mu', \mu) \\ P_{21}^S(\mu', \mu) & P_{22}^S(\mu', \mu) & P_{23}^S(\mu', \mu) \\ P_{31}^S(\mu', \mu) & P_{32}^S(\mu', \mu) & P_{33}^S(\mu', \mu) \end{pmatrix} \quad (118)$$

(voir définition en section IX.1.1.d, équations (116) et (115))

Un fichier résultat « SURFACE » est sous un format utile au code des OS.

Il contient OS_NB +1 lignes d'enregistrements :

P_{11}^0	P_{12}^0	P_{13}^0	P_{21}^0	P_{22}^0	P_{23}^0	P_{31}^0	P_{32}^0	P_{33}^0
P_{11}^1	P_{12}^1	P_{13}^1	P_{21}^1	P_{22}^1	P_{23}^1	P_{31}^1	P_{32}^1	P_{33}^1
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
P_{11}^{NB}	P_{12}^{NB}	P_{13}^{NB}	P_{21}^{NB}	P_{22}^{NB}	P_{23}^{NB}	P_{31}^{NB}	P_{32}^{NB}	P_{33}^{NB}

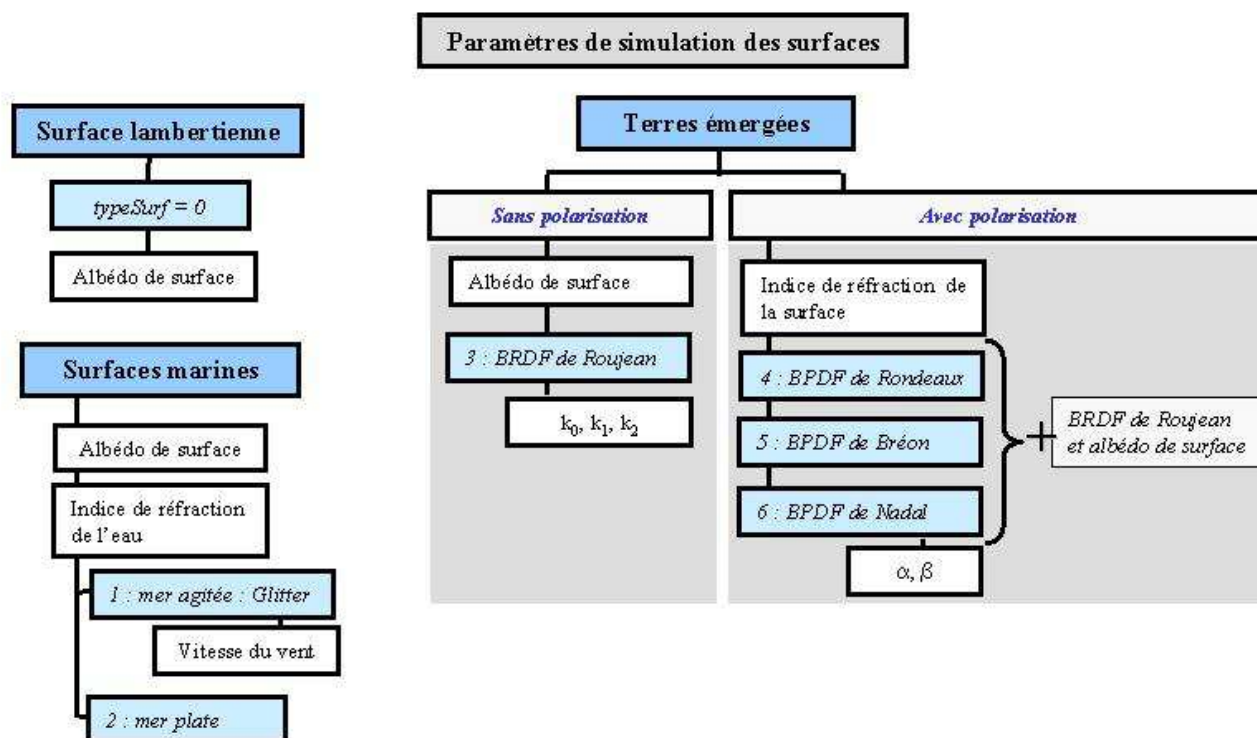
avec pour chaque enregistrement un tableau de réels (codés sur 32 bits)

$P_{\ell c}^S = P_{\ell c}^S(\mu_j, \mu_k)$: tableau de $OS_NBMU \times OS_NBMU$ éléments, où les indices j et k sont respectivement relatifs aux directions d'incidence et de réflexion :

$$\begin{cases} j: 1 \rightarrow OS_NBMU \\ k: 1 \rightarrow OS_NBMU \end{cases}$$

Les dimensions OS_NB et OS_NBMU sont renseignées dans le fichier des angles et ordres de développement.

IX-1.4 Choix de simulation des conditions de surface



L'utilisateur doit préciser la valeur de **l'albédo de surface** et le **type de réflexion de surface** parmi les possibilités suivantes :

- **Surface lambertienne** : réflexion isotrope de l'intensité éclairant la surface.
- **Réflexion sur mer** :
 - Réflexion spéculaire sur **mer agitée (Glitter)** selon la théorie de Cox et Munk [DR3].
 - Réflexion spéculaire sur **mer plate**.
- **Réflexion sur terres émergées** :
 - **BRDF de Roujean** [DR14].
 - **BPDF de Rondeaux** [DR13] pour une simulation de la polarisation d'un couvert végétal.
 - **BPDF de Bréon** [DR2] pour une simulation de la polarisation d'un sol nu.
 - **BPDF de Nadal** [DR12] utilisant une formulation semi-empirique de la polarisation des surfaces.

Les modèles de BPDF sont combinés au modèle de Roujean pour la partie de réflexion en intensité.

- **Fichier utilisateur** : l'utilisateur peut utiliser un fichier « Surface » déjà existant. Ce fichier doit être au format requis par le code des OS (section IX-1.3).

Important : *L'utilisation d'un fichier utilisateur ne dispense pas de la définition des paramètres de surface correspondant pour le calcul analytique de la réflexion directe par le code des OS.*

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 162 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

L'appel du programme permettant de générer de nouveaux fichiers « Surface » n'a lieu que si le nom du fichier est entré comme « DEFAULT ». Sinon, le code des OS utilise directement le fichier dénommé (supposé être un fichier utilisateur prédéfini).

Les choix de simulations sont introduits dans le Khorn-Shell de lancement (chapitre III-2).

IX-1.5 Passage des paramètres à l'exécutable SOS SURFACE.exe

Le script main_SOS.ksh gère le passage des paramètres au programme SOS_SURFACE.

Ce programme n'est appelé que pour la génération de fichiers de BRDF/BPDF, avec une dénomination automatique du nom des fichiers résultats, aussi :

- Il n'y a pas lieu de préciser un nom de fichier à l'appel du programme (-SURF.File n'est pas à définir).
- Le type de surface ne peut être que -SURF.Type 1 3 4 5 ou 6.

Par contre, il est nécessaire de préciser le lieu de stockage des fichiers (répertoires -SURF.Dir et -SURF.DirBRDFtoBPDFcalculation).

PARAMETRES DU PROGRAMME SOS_SURFACE	
SURF.AngFile	Nom du fichier contenant les angles et les ordres maximums des développements à utiliser pour les calculs de luminance (chemin complet)
SURF.Log	Nom du fichier trace des calculs du programme SURFACE <i>Saisir 0 pour ne pas générer de fichier Trace</i>
SURF.Type	Numéro de type de surface 1 : surface lambertienne + glitter (mer agitée) 3 : surface lambertienne + BRDF de Roujean 4 : surface lambertienne + BRDF de Roujean + BPDF de Rondeaux 5 : surface lambertienne + BRDF de Roujean + BPDF de Bréon 6 : surface lambertienne + BRDF de Roujean + BPDF de Nadal
SURF.Dir	Répertoire de stockage des fichiers résultats
<i>Si SURF.Type ≠ 3: pour tous les modèles, excepté celui de Roujean</i>	
SURF.Ind	Indice de réfraction surface / air
<i>Si SURF.Type = 1 : glitter</i>	
SURF.Glitter.Wind	Vitesse du vent en m/s
<i>Si SURF.Type ≥ 3 : modèle de BRDF de Roujean</i>	
SURF.DirBRDFtoBPDFcalculation	Répertoire de stockage des fichiers résultats de BRDF de Roujean
SURF.Roujean.K0	Paramètre k_0 du modèle de Roujean (exprimé en réflectance)
SURF.Roujean.K1	Paramètre k_1 du modèle de Roujean (exprimé en réflectance)
SURF.Roujean.K2	Paramètre k_2 du modèle de Roujean (exprimé en réflectance)

<i>Si SURF.Type = 6 : modèle de BPDF de Nadal</i>	
SURF.Nadal.Alpha	Paramètre α du modèle de Nadal
SURF.Nadal.Beta	Paramètre β du modèle de Nadal

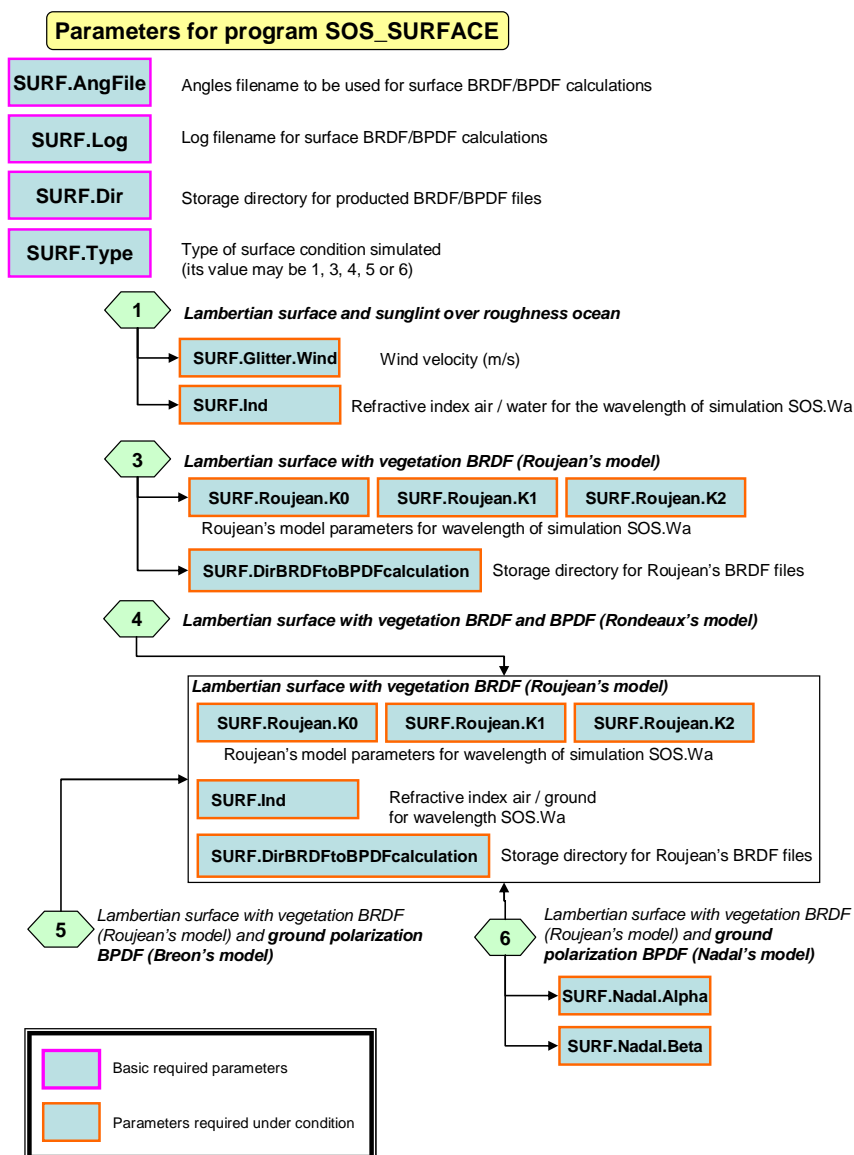


Figure 15 : Paramètres de surface pour l'appel du programme SOS_SURFACE

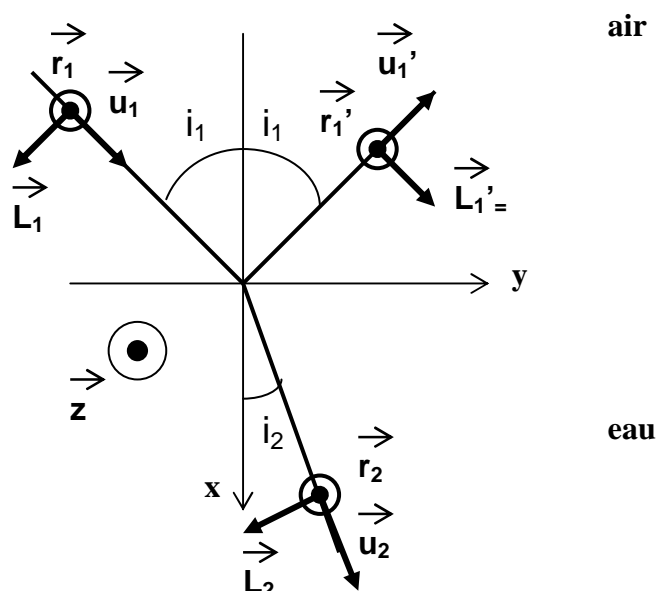
IX-2 Réflexion de Fresnel sur mer plate

Certaines anomalies pour la prise en compte de la réflexion de surface ont été corrigées par rapport au code initial. Afin de permettre une bonne compréhension des traitements aujourd'hui réalisés, nous reprenons complètement le formalisme de la réflexion de Fresnel dans ce chapitre.

IX-2.1 Expression théorique de la matrice de réflexion de Fresnel

Cette partie reprend le calcul des coefficients de réflexion de Fresnel.

IX.2.1.a COEFFICIENTS DE REFLEXION DE FRESNEL



On considère la réflexion d'un champ électrique sur un dioptré défini à l'interface d'un milieu d'indice n_1 (air) et d'un milieu d'indice n_2 (eau).

Le champ électrique est défini par :

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \text{Re} [\vec{\varepsilon} \cdot \exp(j \cdot \omega \cdot t)] \quad (119)$$

avec pour composantes parallèle et perpendiculaire au plan de réflexion respectivement $\tilde{\varepsilon}_\ell$ et $\tilde{\varepsilon}_r$.

$$\begin{cases} \tilde{\varepsilon}_\ell = \tilde{A}_\ell \cdot \exp(-j \cdot \vec{k} \cdot \vec{r}) \\ \tilde{\varepsilon}_r = \tilde{A}_r \cdot \exp(-j \cdot \vec{k} \cdot \vec{r}) \end{cases} \quad (120)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 165 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

A l'interface avec le dioptré, le champ \vec{E}_1 est réfléchi en \vec{E}_1' et est transmis en \vec{E}_2 .

On définit les coefficients de réflexion en amplitude:

- Pour la composante parallèle : $r_\ell = \tilde{\epsilon}_\ell^{(1')} / \tilde{\epsilon}_\ell^{(1)}$ (121.a)

- Pour la composante perpendiculaire : $r_r = \tilde{\epsilon}_r^{(1')} / \tilde{\epsilon}_r^{(1)}$ (121.b)

De même pour les coefficients de transmission en amplitude:

$t_\ell = \tilde{\epsilon}_\ell^{(2)} / \tilde{\epsilon}_\ell^{(1)}$ et $t_r = \tilde{\epsilon}_r^{(2)} / \tilde{\epsilon}_r^{(1)}$ (122)

On calcule les expressions des coefficients de réflexion en distinguant le cas d'un champ électrique incident parallèle ou perpendiculaire au plan de réflexion.

♦ Réflexion de la composante perpendiculaire :

On commence par définir les champs électrique et magnétique dans le repère (0,x,y,z). Puis, on utilise les propriétés de continuité à l'interface entre les deux milieux.

Les champs électriques sont :

$$\begin{aligned}
- \text{ Champ électrique incident : } \vec{\epsilon}_r^{(1)} &= \vec{A}_r^{(1)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1 \cdot \vec{r}) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}_{(0,x,y,z)} \cdot \tilde{A}_r^{(1)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1 \cdot \vec{r}) \\
- \text{ Champ électrique réfléchi : } \vec{\epsilon}_r^{(1')} &= \vec{A}_r^{(1')} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1' \cdot \vec{r}) \\
- \text{ Champ électrique transmis : } \vec{\epsilon}_r^{(2)} &= \vec{A}_r^{(2)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_2 \cdot \vec{r})
\end{aligned}$$

Ils se propagent selon les directions :

$$\vec{u}_1 = \begin{pmatrix} \cos i_1 \\ \sin i_1 \\ 0 \end{pmatrix}_{(0,x,y,z)}, \quad \vec{u}_1' = \begin{pmatrix} -\cos i_1 \\ \sin i_1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \vec{u}_2 = \begin{pmatrix} \cos i_2 \\ \sin i_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Les champs magnétiques sont :

$$\begin{aligned}
 - \text{ Champ magnétique incident : } \vec{B}^{(1)} &= \frac{1}{v_1} \cdot \vec{u}_1 \wedge \vec{\varepsilon}_r = \frac{\tilde{A}_r^{(1)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1 \cdot \vec{r})}{v_1} \begin{pmatrix} \sin i_1 \\ -\cos i_1 \\ 0 \end{pmatrix}_{(0,x,y,z)} \\
 - \text{ Champ magnétique réfléchi : } \vec{B}^{(1')} &= \frac{1}{v_1} \cdot \vec{u}_1' \wedge \vec{\varepsilon}_r = \frac{\tilde{A}_r^{(1')} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1' \cdot \vec{r})}{v_1} \begin{pmatrix} \sin i_1 \\ \cos i_1 \\ 0 \end{pmatrix} \\
 - \text{ Champ magnétique transmis : } \vec{B}^{(2)} &= \frac{1}{v_2} \cdot \vec{u}_2 \wedge \vec{\varepsilon}_r = \frac{\tilde{A}_r^{(2)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_2 \cdot \vec{r})}{v_2} \begin{pmatrix} \sin i_2 \\ -\cos i_2 \\ 0 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

avec $v_i = c / n_i$ (c la vitesse de la lumière dans le vide, n_i l'indice du milieu i)

Les vecteurs excitations électriques associés sont :

$$\vec{H}^{(i)} = \frac{\vec{B}^{(i)}}{\mu_i} \text{ avec } \mu_1 = \mu_2 \text{ pour des milieux transparents et non magnétiques.}$$

Au niveau de la surface du dioptré ($x = 0$), on a :

$$\begin{cases} \vec{k}_1 \cdot \vec{r} = k_1 \cdot u_1 \cdot r = y \cdot k_1 \cdot \sin i_1 \\ \vec{k}_1' \cdot \vec{r} = k_1 \cdot u_1' \cdot r = y \cdot k_1 \cdot \sin i_1 \\ \vec{k}_2 \cdot \vec{r} = k_2 \cdot u_2 \cdot r = y \cdot k_2 \cdot \sin i_2 \end{cases}$$

Or, les lois de Descartes donnent : $k_1 \cdot \sin i_1 = k_2 \cdot \sin i_2$ (i.e. : $n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2$).

De plus, on doit vérifier au niveau de la surface la conservation de la composante tangentielle du champ électrique (ici selon z) et du vecteur excitation électrique (selon y). On aboutit à :

$$\begin{cases} \tilde{A}_r^{(1)} + \tilde{A}_r^{(1')} = \tilde{A}_r^{(2)} \\ \frac{\cos i_1}{v_1 \cdot \mu_1} \times (-\tilde{A}_r^{(1)} + \tilde{A}_r^{(1')}) = -\frac{\cos i_2}{v_2 \cdot \mu_2} \times \tilde{A}_r^{(2)} \end{cases}$$

En introduisant (121.a), (121.b) et (122), avec $v_i = c / n_i$ et $\mu_1 = \mu_2$, on a :

$$\begin{cases} 1 + r_r = t_r \\ n_1 \cdot \cos i_1 \times (1 - r_r) = n_2 \cdot \cos i_2 \times t_r \end{cases}$$

Ce qui donne :

$$r_r(i_1) = \frac{n_1 \cdot \cos i_1 - n_2 \cdot \cos i_2}{n_1 \cdot \cos i_1 + n_2 \cdot \cos i_2} \quad (123)$$

♦ **Réflexion de la composante parallèle :**

Les champs électriques sont :

$$\begin{aligned} \text{- Champ électrique incident : } \vec{\varepsilon}_\ell^{(1)} &= \vec{A}_\ell^{(1)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1 \cdot \vec{r}) = \begin{pmatrix} \sin i_1 \\ -\cos i_1 \\ 0 \end{pmatrix} \times \tilde{A}_\ell^{(1)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1 \cdot \vec{r})_{(0,x,y,z)} \\ \text{- Champ électrique réfléchi : } \vec{\varepsilon}_\ell^{(1')} &= \vec{A}_\ell^{(1')} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1' \cdot \vec{r}) = \begin{pmatrix} \sin i_1 \\ \cos i_1 \\ 0 \end{pmatrix} \times \tilde{A}_\ell^{(1')} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1' \cdot \vec{r})_{(0,x,y,z)} \\ \text{- Champ électrique transmis : } \vec{\varepsilon}_\ell^{(2)} &= \vec{A}_\ell^{(2)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_2 \cdot \vec{r}) = \begin{pmatrix} \sin i_2 \\ -\cos i_2 \\ 0 \end{pmatrix} \times \tilde{A}_\ell^{(2)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_2 \cdot \vec{r})_{(0,x,y,z)} \end{aligned}$$

Les champs magnétiques sont :

$$\begin{aligned} \text{- Champ magnétique incident : } \vec{B}^{(1)} &= \frac{1}{v_1} \cdot \vec{u}_1 \wedge \vec{\varepsilon}_\ell^{(1)} = \frac{\tilde{A}_\ell^{(1)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1 \cdot \vec{r})}{v_1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}_{(0,x,y,z)} \\ \text{- Champ magnétique réfléchi : } \vec{B}^{(1')} &= \frac{1}{v_1} \cdot \vec{u}_1' \wedge \vec{\varepsilon}_\ell^{(1')} = \frac{\tilde{A}_\ell^{(1')} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_1' \cdot \vec{r})}{v_1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \\ \text{- Champ magnétique transmis : } \vec{B}^{(2)} &= \frac{1}{v_2} \cdot \vec{u}_2 \wedge \vec{\varepsilon}_\ell^{(2)} = \frac{\tilde{A}_\ell^{(2)} \cdot \exp(-j \cdot \vec{k}_2 \cdot \vec{r})}{v_2} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 168 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Au niveau du dioptre, la conservation des composantes tangentielles du champ électrique (selon y) et du vecteur excitation électrique (selon z) implique que :

$$\begin{cases} \cos i_1 \times (-\tilde{A}_\ell^{(1)} + \tilde{A}_\ell^{(1')}) = -\cos i_2 \times \tilde{A}_\ell^{(2)} \\ \frac{1}{v_1 \cdot \mu_1} \times (\tilde{A}_\ell^{(1)} + \tilde{A}_\ell^{(1')}) = \frac{1}{v_2 \cdot \mu_2} \times \tilde{A}_\ell^{(2)} \end{cases}$$

A nouveau, en introduisant (121.a), (121.b) et (122), avec $v_i = c / n_i$ et $\mu_1 = \mu_2$, on a :

$$\begin{cases} n_1 \cdot (1 + r_\ell) = n_2 \cdot t_\ell \\ \cos i_1 \times (1 - r_\ell) = \cos i_2 \times t_\ell \end{cases}$$

Ce qui donne :

$$r_\ell(i_1) = \frac{n_2 \cdot \cos i_1 - n_1 \cdot \cos i_2}{n_2 \cdot \cos i_1 + n_1 \cdot \cos i_2} \quad (124)$$

♦ Expression pour le cas d'une transition air / mer :

L'indice de l'air $n_1 = 1$. L'indice de l'eau est posé $n_2 = m$ (réel dans le domaine du visible).

On utilise la relation de Descartes pour exprimer $\cos i_2$ en fonction de i_1 :

$$\cos i_2 = \sqrt{1 - \sin^2 i_2} = \sqrt{1 - (\sin i_1 / m)^2} = \frac{1}{m} \times \sqrt{m^2 - \sin^2 i_1}$$

On obtient en définitive :

$$\text{- Pour la composante parallèle : } r_\ell(i_1) = \frac{m^2 \cdot \cos i_1 - \sqrt{m^2 - \sin^2 i_1}}{m^2 \cdot \cos i_1 + \sqrt{m^2 - \sin^2 i_1}} \quad (125)$$

$$\text{- Pour la composante perpendiculaire : } r_r(i_1) = \frac{\cos i_1 - \sqrt{m^2 - \sin^2 i_1}}{\cos i_1 + \sqrt{m^2 - \sin^2 i_1}} \quad (126)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 169 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX.2.1.b PARAMETRES DE STOKES

Les calculs de transfert radiatif utilisent les paramètres de Stokes I, Q, U et V, plutôt que les composantes du vecteur champ électrique. Il nous faut préciser la relation existant entre ces paramètres et le champ électrique.

Dans un article de 1959 [DR10], Kuscer et Ribaric ont développé la formulation matricielle de l'Equation de Transfert Radiatif qui décrit la diffusion de la lumière polarisée dans un milieu diffusant et absorbant. Partant de ces travaux, Siewert [DR16] a repris le formalisme de Kuscer et Ribaric pour le généraliser à une atmosphère inhomogène dont l'éclairement incident sur une couche est polarisé. Il a de plus ramené les formulations aux paramètres de Stokes classiques.

La théorie de Siewert décompose les paramètres de Stokes en séries de Fourier sur le corps des complexes, alors que la théorie des OS les décompose sur le corps des réels. Nous avons vérifié la cohérence du passage du formalisme de Siewert à celui des OS pour l'expression de la matrice de phase (après décomposition en séries de Fourier). Le formalisme introduit dans le code des OS du LOA [DR5] est donc compatible avec les développements de Siewert. La définition des paramètres de Stokes est ainsi la même entre les travaux du LOA, de Siewert et de Kuscer et Ribaric.

Kuscer et Ribaric définissent :

$$\begin{cases} 0.5 \times (I + Q) = \tilde{\epsilon}_\ell \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^* \\ 0.5 \times (I - Q) = \tilde{\epsilon}_r \cdot \tilde{\epsilon}_r^* \\ 0.5 \times (U + i.V) = \tilde{\epsilon}_\ell \cdot \tilde{\epsilon}_r^* \\ 0.5 \times (U - i.V) = \tilde{\epsilon}_r \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^* \end{cases} \quad (127)$$

Pour les OS, on a :

$$\begin{cases} I = \tilde{\epsilon}_\ell \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^* + \tilde{\epsilon}_r \cdot \tilde{\epsilon}_r^* \\ Q = \tilde{\epsilon}_\ell \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^* - \tilde{\epsilon}_r \cdot \tilde{\epsilon}_r^* \\ U = \tilde{\epsilon}_\ell \cdot \tilde{\epsilon}_r^* + \tilde{\epsilon}_r \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^* \\ V = -i.(\tilde{\epsilon}_\ell \cdot \tilde{\epsilon}_r^* - \tilde{\epsilon}_r \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^*) \end{cases} \quad (128)$$

Notons que V est opposé à la définition de Van de Hulst.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 170 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX.2.1.c MATRICE DE REFLEXION

Pour une représentation des champs électriques en fonction des paramètres de Stokes, la réflexion de Fresnel s'exprime par une matrice.

Le champ réfléchi au niveau du dioptre est donné par :

$$\begin{cases} I_1' = \tilde{\epsilon}_\ell^{(1')} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1')} + \tilde{\epsilon}_r^{(1')} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1')} \\ Q_1' = \tilde{\epsilon}_\ell^{(1')} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1')} - \tilde{\epsilon}_r^{(1')} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1')} \\ U_1' = \tilde{\epsilon}_\ell^{(1')} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1')} + \tilde{\epsilon}_r^{(1')} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1')} \\ V_1' = -i \cdot (\tilde{\epsilon}_\ell^{(1')} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1')} - \tilde{\epsilon}_r^{(1')} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1')}) \end{cases}$$

Or, selon les relations (121.a) et (121.b), on peut aussi écrire pour le champ réfléchi :

$$\begin{cases} I_1' = r_\ell \cdot r_\ell^* \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1)} + r_r \cdot r_r^* \cdot \tilde{\epsilon}_r^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1)} \\ Q_1' = r_\ell \cdot r_\ell^* \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1)} - r_r \cdot r_r^* \cdot \tilde{\epsilon}_r^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1)} \\ U_1' = r_\ell \cdot r_r^* \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1)} + r_r \cdot r_\ell^* \cdot \tilde{\epsilon}_r^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1)} \\ V_1' = -i \cdot (r_\ell \cdot r_r^* \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1)} - r_r \cdot r_\ell^* \cdot \tilde{\epsilon}_r^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1)}) \end{cases}$$

$$\text{Avec, selon (127), : } \begin{cases} \tilde{\epsilon}_\ell^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1)} = 0.5 \times (I_1 + Q_1) \\ \tilde{\epsilon}_r^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1)} = 0.5 \times (I_1 - Q_1) \\ \tilde{\epsilon}_\ell^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_r^{*(1)} = 0.5 \times (U_1 + i \cdot V_1) \\ \tilde{\epsilon}_r^{(1)} \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^{*(1)} = 0.5 \times (U_1 - i \cdot V_1) \end{cases}$$

$$\text{on trouve que : } \begin{pmatrix} I_1' \\ Q_1' \\ U_1' \\ V_1' \end{pmatrix} = \overline{\overline{F}}_k^*(i_1) \cdot \begin{pmatrix} I_1 \\ Q_1 \\ U_1 \\ V_1 \end{pmatrix} \quad (129)$$

La matrice de réflexion de Fresnel s'écrit :

$$\overline{\overline{F}}_k^*(i_1) = \frac{1}{2} \times \begin{pmatrix} r_\ell \cdot r_\ell^* + r_r \cdot r_r^* & r_\ell \cdot r_\ell^* - r_r \cdot r_r^* & 0 & 0 \\ r_\ell \cdot r_\ell^* - r_r \cdot r_r^* & r_\ell \cdot r_\ell^* + r_r \cdot r_r^* & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_\ell \cdot r_r^* + r_r \cdot r_\ell^* & i \cdot (r_\ell \cdot r_r^* - r_r \cdot r_\ell^*) \\ 0 & 0 & -i \cdot (r_\ell \cdot r_r^* - r_r \cdot r_\ell^*) & r_\ell \cdot r_r^* + r_r \cdot r_\ell^* \end{pmatrix} \quad (130)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 171 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

♦ **Expression pour le cas d'une transition air / mer :**

Pour la réflexion sur mer, les expressions des coefficients de réflexion sont connues (125 et 126). On obtient :

$$\bar{F}_k^* (\cos \omega) = \begin{pmatrix} R_{11}(\omega) & R_{12}(\omega) & 0 & 0 \\ R_{12}(\omega) & R_{11}(\omega) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{33}(\omega) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{33}(\omega) \end{pmatrix} \quad (131)$$

avec

$$\begin{cases} R_{11}(\omega) = 0.5 \times (r_\ell^2(\omega) + r_r^2(\omega)) \\ R_{12}(\omega) = 0.5 \times (r_\ell^2(\omega) - r_r^2(\omega)) \\ R_{33}(\omega) = r_\ell(\omega) \times r_r(\omega) \end{cases} \quad (132)$$

où r_ℓ et r_r donnés respectivement par les équations (125) et (126).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 172 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

IX-2.2 Introduction de la réflexion de Fresnel dans les OS

IX.2.2.a FORMALISME SANS SEPARATION DE LA DEPENDANCE AZIMUTALE ET ZENITHALE

Exprimée par rapport aux plans méridiens, la matrice de réflexion de Fresnel est :

$$\overline{\overline{F}}(\mu, \phi, \mu', \phi') = \Delta(\mu + \mu') \Delta(\phi - \phi') \overline{\overline{F}}_k^*(\mu) \quad (133)$$

pour une direction d'incidence ($\mu' < 0, \phi'$) et une direction d'émergence ($\mu > 0, \phi$). La fonction de Dirac $\Delta(x)$ est nulle sauf si $x = 0$. Cette formulation traduit bien que la réflexion de Fresnel se fait dans le même plan que le plan d'incidence et que la direction de réflexion est $\mu = -\mu' > 0$.

• Réflexion d'ordre $n > 1$

La réflexion de Fresnel de la lumière incidente d'ordre $n-1$ s'exprime par :

$$\overline{\overline{L}}_n^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu, \phi) = \int_0^{2\pi} \int_{-1}^0 \overline{\overline{F}}(\mu, \phi, \mu', \phi') \overline{\overline{L}}_{n-1}^{\downarrow}(\delta^*, \mu', \phi') d\mu' d\phi'$$

qui se réduit à $\overline{\overline{L}}_n^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu, \phi) = \overline{\overline{F}}_k^*(\mu) \overline{\overline{L}}_{n-1}^{\downarrow}(\delta^*, -\mu, \phi)$

avec δ^* l'épaisseur optique totale de la couche (au sol).

Avec (131), on obtient :

$$\overline{\overline{L}}_n^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu, \phi) = \begin{pmatrix} R_{11}(\mu) \times I_{n-1}^{\downarrow}(\delta^*, -\mu, \phi) + R_{12}(\mu) \times Q_{n-1}^{\downarrow}(\delta^*, -\mu, \phi) \\ R_{12}(\mu) \times I_{n-1}^{\downarrow}(\delta^*, -\mu, \phi) + R_{11}(\mu) \times Q_{n-1}^{\downarrow}(\delta^*, -\mu, \phi) \\ R_{33}(\mu) \times U_{n-1}^{\downarrow}(\delta^*, -\mu, \phi) \\ R_{33}(\mu) \times V_{n-1}^{\downarrow}(\delta^*, -\mu, \phi) \end{pmatrix} \quad (134)$$

• Réflexion d'ordre 1

La réflexion du faisceau solaire direct atteignant le sol est un cas particulier de l'équation (134). Le champ de rayonnement solaire direct atteignant le sol s'exprime en fonction des paramètres de Stokes par :

$$\Delta(\mu' - \mu_0) \Delta(\phi' - \phi_0) \cdot \begin{pmatrix} L_{\text{SUN}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \exp(\delta^* / \mu_0) \quad \text{avec } \mu_0 = -\cos \theta_s < 0.$$

Pour L_{SUN} la luminance solaire normalisée au TOA (correspondant à $E_s = \pi$).

Elle se déduit de la valeur de l'éclairement solaire E_s par :

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 173 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
-------	------------------------------------	---

$$E_s = \frac{1}{d^2} \iint_{\text{disc}} L(M) \cdot dS$$

avec d : la distance Terre-Soleil

L(M) : la luminance sur un point du disque solaire

dS : un élément de surface du Soleil (l'angle solide étant : $d\omega = dS / d^2$)

En considérant constante la luminance sur le disque solaire, on aboutit à :

$$E_s = L_s^{\text{TOA}} \times \Delta\Omega \quad \text{soit} \quad L_{\text{SUN}} = L_s^{\text{TOA}} = E_s / \Delta\Omega = \pi / \Delta\Omega$$

$$L_s^{\text{TOA}} = E_s / \Delta\Omega = \pi / \Delta\Omega \quad (135)$$

avec $\Delta\Omega = \pi \frac{R^2}{d^2}$ où R est le rayon du disque solaire

d : la distance Terre-Soleil

On introduit dans SOS.h la constante **SOS_SOLAR_DICS_SOLID_ANGLE** dont la valeur par défaut est $\Delta\Omega = 6.8 \times 10^{-5} \text{ sr}$ pour la distance Terre-Soleil moyenne.

La valeur de L_{SUN} , la luminance solaire normalisée au TOA (pour un éclairement solaire $E_s = \pi$), **correspond à l'angle solide du disque solaire apparent** tel que défini dans SOS.h par la constante **SOS_SOLAR_DICS_SOLID_ANGLE**.

Aussi, le calcul de réflexion sur mer plate n'est exact que pour la distance Terre-Soleil qui correspond à cet angle solide du disque solaire (**il n'y a pas de prise en compte de la date d'observation par le code SOS**).

Le terme de réflexion directe sur mer plate est ainsi à considérer comme une valeur indicative qui **correspond à la distance Terre-Soleil pour l'angle solide du disque solaire tel que défini dans SOS.h**.

La réflexion de Fresnel de ce faisceau s'écrit alors simplement :

$$\bar{L}_1^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu, \phi) = \bar{F}(\mu, \varphi, \mu_0, \phi_0) \cdot \begin{pmatrix} L_{\text{SUN}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \exp(\delta^* / \mu_0)$$

Soit

$$\bar{L}_1^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu, \phi) = \Delta(\mu + \mu_0) \cdot \Delta(\phi - \phi_0) \cdot \begin{pmatrix} R_{11}(-\mu_0) \\ R_{12}(-\mu_0) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot L_{\text{SUN}} \cdot \exp(\delta^* / \mu_0) \quad (136)$$

Réflexion de surface : réflexion de Fresnel sur mer plate

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 174 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

IX.2.2.b APPLICATION AU FORMALISME DES OS

Le code des OS sépare la dépendance azimutale de la dépendance zénithale.

• Réflexion d'ordre $n > 1$ dans les OS

Avec le formalisme de Fourier, on peut écrire que :

$$\bar{L}_{n>1}^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu, \phi) = \begin{pmatrix} \sum_{S=0}^{\infty} (2 - \delta_{0S}) \cdot \cos[s(\phi - \phi_0)] I_n^{S \uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu) \\ \sum_{S=0}^{\infty} (2 - \delta_{0S}) \cdot \cos[s(\phi - \phi_0)] Q_n^{S \uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu) \\ \sum_{S=0}^{\infty} (2 - \delta_{0S}) \cdot \sin[s(\phi - \phi_0)] U_n^{S \uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu) \\ \sum_{S=0}^{\infty} (2 - \delta_{0S}) \cdot \sin[s(\phi - \phi_0)] V_n^{S \uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu) \end{pmatrix}$$

L'équation (134) peut aussi s'écrire en décomposant I_{n-1}^{\downarrow} , Q_{n-1}^{\downarrow} , U_{n-1}^{\downarrow} et V_{n-1}^{\downarrow} en séries de Fourier :

$$\bar{L}_n^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu, \phi) = \begin{pmatrix} \sum_{S=0}^{\infty} (2 - \delta_{0S}) \cdot \cos[s(\phi - \phi_0)] [R_{11}(\mu) I_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu) + R_{12}(\mu) Q_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu)] \\ \sum_{S=0}^{\infty} (2 - \delta_{0S}) \cdot \cos[s(\phi - \phi_0)] [R_{12}(\mu) I_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu) + R_{11}(\mu) Q_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu)] \\ \sum_{S=0}^{\infty} (2 - \delta_{0S}) \cdot \sin[s(\phi - \phi_0)] [R_{33}(\mu) U_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu)] \\ \sum_{S=0}^{\infty} (2 - \delta_{0S}) \cdot \sin[s(\phi - \phi_0)] [R_{33}(\mu) V_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu)] \end{pmatrix}$$

Par identification avec l'équation précédente, on trouve que :

$$\bar{L}_n^{S \uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu, \phi) = \begin{pmatrix} R_{11}(\mu) \times I_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu) + R_{12}(\mu) \times Q_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu) \\ R_{12}(\mu) \times I_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu) + R_{11}(\mu) \times Q_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu) \\ R_{33}(\mu) \times U_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu) \\ R_{33}(\mu) \times V_{n-1}^{S \downarrow}(\delta^*, -\mu) \end{pmatrix} \quad (137)$$

• Réflexion du faisceau solaire direct dans les OS

La discontinuité de $\bar{L}_1^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta^*, \mu, \phi)$ ne permet pas d'y associer un développement en séries de Fourier. Ainsi, on ne calcule pas directement ce terme dans le code des OS. Par contre, on introduit la diffusion de ce rayonnement montant. On peut l'exprimer dans la décomposition en séries de Fourier.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 175 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

En effet, la luminance à un niveau δ du profil est :

$$\bar{L}_1^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta, \mu, \phi) d\mu d\phi = \begin{pmatrix} R_{11}(-\mu_0) \\ R_{12}(-\mu_0) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot L_{\text{SUN}} \cdot \exp(\delta^*/\mu_0) \cdot \exp((\delta^* - \delta)/\mu_0) \cdot d\mu_0 \cdot d\phi_0$$

Sa valeur est non nulle uniquement dans l'angle solide $\Delta\Omega$ du disque apparent du Soleil, autour de la direction de réflexion.

Elle crée une fonction source :

$$F(\delta, \mu, \phi) = \frac{\omega_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \bar{P}_{\text{ST}}(\delta, \mu, \phi, \mu', \phi') \bar{L}_1^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta, \mu', \phi') d\mu' d\phi'$$

Comme **l'intégration spatiale est non nulle sur l'angle solide $\Delta\Omega$** uniquement, en considérant constante la luminance $\bar{L}_1^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta, \mu, \phi)$ dans le cône $\Delta\Omega$ et en négligeant les variations de la fonction de phase autour de la direction solaire, avec $E_S = L_{\text{SUN}} \times \Delta\Omega$ **$E_S = L_S^{\text{TOA}} \times \Delta\Omega$** , on trouve

$$F(\delta, \mu, \phi) = \frac{\omega_0}{4\pi} \bar{P}_{\text{ST}}(\delta, \mu, \phi, -\mu_0, \phi_0) \cdot \begin{pmatrix} R_{11}(-\mu_0) \\ R_{12}(-\mu_0) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot E_S \cdot \exp(2\delta^*/\mu_0) \cdot \exp(-\delta/\mu_0)$$

On se ramène au formalisme de Fourier en exprimant la décomposition en séries de Fourier de la matrice de phase (seule fonction de ϕ). Ce qui donne :

$$F^S(\delta, \mu) = \frac{E_S \cdot \exp(2\delta^*/\mu_0) \cdot \exp(-\delta/\mu_0)}{4\pi} \cdot \omega_0 \cdot \bar{P}^S(\delta, \mu, -\mu_0) \cdot \begin{pmatrix} R_{11}(-\mu_0) \\ R_{12}(-\mu_0) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

L'expression de la matrice de phase dans les OS, réduite aux paramètres I, Q et U, est :

$$\bar{P}^S(\mu, \mu') = \begin{bmatrix} \text{BP}^S(\mu, \mu') & \text{GR}^S(\mu, \mu') & -\text{GT}^S(\mu, \mu') \\ \text{GR}^S(\mu', \mu) & \text{ARR}^S(\mu, \mu') & -\text{ART}^S(\mu', \mu) \\ -\text{GT}^S(\mu', \mu) & -\text{ART}^S(\mu, \mu') & \text{ATT}^S(\mu, \mu') \end{bmatrix} \quad (138)$$

Nous préciserons les fonctions BP^S , GR^S , ARR^S , GT^S , ART^S et ATT^S par la suite (relation 145).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 176 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

On peut ainsi écrire que :

$$F^S(\delta, \mu) = \frac{E_s \cdot \exp(2\delta^*/\mu_0) \cdot \exp(-\delta/\mu_0)}{4\pi} \times \omega_0(\delta) \cdot \begin{bmatrix} FI^S(\delta, \mu) \\ FQ^S(\delta, \mu) \\ FU^S(\delta, \mu) \end{bmatrix} \quad (139)$$

$$\text{avec} \quad \begin{bmatrix} FI^S(\delta, \mu) \\ FQ^S(\delta, \mu) \\ FU^S(\delta, \mu) \end{bmatrix} = \omega_0(\delta) \cdot \begin{bmatrix} BP^S(\mu, -\mu_0) \times R_{11}(-\mu_0) + GR^S(\mu, -\mu_0) \times R_{12}(-\mu_0) \\ GR^S(-\mu_0, \mu) \times R_{11}(-\mu_0) + ARR^S(\mu, -\mu_0) \times R_{12}(-\mu_0) \\ -GT^S(-\mu_0, \mu) \times R_{11}(-\mu_0) - ART^S(\mu, -\mu_0) \times R_{12}(-\mu_0) \end{bmatrix} \quad (140)$$

Le calcul du champ diffus induit par la réflexion du faisceau solaire est obtenu par intégration de proche en proche. Pour le champ montant, on écrit :

$$\bar{L}_1^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta, \mu) = \bar{L}_1^{\uparrow \text{fresnel}}(\delta + \Delta\delta, \mu) \times \exp(-\Delta\delta/\mu) + \bar{V}^{S\uparrow}(\delta, \Delta\delta, \mu) \quad (141)$$

$$\text{avec} \quad \bar{V}^{S\uparrow}(\delta, \Delta\delta, \mu) = \frac{1}{\mu} \int_{\delta}^{\delta+\Delta\delta} \bar{F}^S(\delta', \mu) \cdot \exp(-(\delta'-\delta)/\mu) \cdot d\delta' \quad (142)$$

L'intégration n'est pas faite par linéarisation de la fonction source comme c'est le cas pour les autres diffusions. On se contente d'approximer la fonction intégrée par sa valeur moyenne sur l'intervalle $\Delta\delta$:

$$\bar{V}^{S\uparrow}(\delta, \Delta\delta, \mu) = \frac{\Delta\delta}{2 \cdot \mu} \times \left[\bar{F}^S(\delta, \mu) + \bar{F}^S(\delta + \Delta\delta, \mu) \cdot \exp(-\Delta\delta/\mu) \right] \quad (143)$$

Cette approximation peut être une source d'écarts modérés.

Le calcul du champ diffus descendant est similaire.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 177 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

IX.2.2.c IMPLEMENTATION DANS LE CODE DES OS

Dans le code des OS, les directions intervenant pour les éléments de la matrice de phase sont indicées de la façon suivante :

$$\begin{cases} +\mu \leftrightarrow J \\ -\mu \leftrightarrow -J \\ +\mu_0 \leftrightarrow 0 \end{cases} \quad (144)$$

Pour appliquer les indices adaptés à l'équation (140), il faut faire intervenir des permutations d'angles sur les fonctions BP^s , GR^s , ARR^s , GT^s , ART^s et ATT^s pour passer de $-\mu_0$ à $+\mu_0$.

$$\text{Or } \begin{cases} BP^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \beta_k \cdot P_s^k(\mu) \cdot P_s^k(\mu') \\ GR^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \gamma_k \cdot P_s^k(\mu) \cdot R_s^k(\mu') \\ GT^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \gamma_k \cdot P_s^k(\mu) \cdot T_s^k(\mu') \\ ARR^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \alpha_k \cdot R_s^k(\mu) \cdot R_s^k(\mu') + \xi_k \cdot T_s^k(\mu) \cdot T_s^k(\mu') \\ ART^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \alpha_k \cdot R_s^k(\mu') \cdot T_s^k(\mu) + \xi_k \cdot R_s^k(\mu) \cdot T_s^k(\mu') \\ ATT^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \alpha_k \cdot T_s^k(\mu) \cdot T_s^k(\mu') + \xi_k \cdot R_s^k(\mu) \cdot R_s^k(\mu') \end{cases} \quad (145)$$

avec les fonctions $P_s^k(\mu)$, $R_s^k(\mu)$ et $T_s^k(\mu)$ définis à partir des fonctions généralisées de Legendre.

Ces fonctions vérifient les propriétés de permutations suivantes :

$$\begin{cases} P_s^k(\mu) = (-1)^{k-s} \times P_s^k(-\mu) \\ R_s^k(\mu) = (-1)^{k-s} \times R_s^k(-\mu) \\ T_s^k(\mu) = (-1)^{k-s+1} \times T_s^k(-\mu) \end{cases} \quad (146)$$

Ce qui permet de déduire que :

$$\begin{cases} BP^S(\mu, -\mu_0) = BP^S(-\mu, \mu_0) = BP^S(\mu_0, -\mu) \\ GR^S(\mu, -\mu_0) = GR^S(-\mu, \mu_0) \\ GR^S(-\mu_0, \mu) = GR^S(\mu_0, -\mu) \\ ARR^S(\mu, -\mu_0) = ARR^S(-\mu, \mu_0) = ARR^S(\mu_0, -\mu) \\ GT^S(-\mu_0, \mu) = -GT^S(\mu_0, -\mu) \\ ART^S(\mu, -\mu_0) = -ART^S(-\mu, \mu_0) \end{cases} \quad (147)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 178 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

Ainsi, l'équation (140) peut aussi s'écrire :

$$\begin{bmatrix} \text{FI}^S(\delta, \mu) \\ \text{FQ}^S(\delta, \mu) \\ \text{FU}^S(\delta, \mu) \end{bmatrix} = \omega_0(\delta) \times \begin{bmatrix} \text{BP}^S(\mu_0, -\mu) \times R_{11}(-\mu_0) + \text{GR}^S(-\mu, \mu_0) \times R_{12}(-\mu_0) \\ \text{GR}^S(\mu_0, -\mu) \times R_{11}(-\mu_0) + \text{ARR}^S(\mu_0, -\mu) \times R_{12}(-\mu_0) \\ \text{GT}^S(\mu_0, -\mu) \times R_{11}(-\mu_0) + \text{ART}^S(-\mu, \mu_0) \times R_{12}(-\mu_0) \end{bmatrix} \quad (148)$$

Nous avons introduit dans la routine « SOS_NOYAUX » du logiciel, l'extension du calcul de la matrice de phase aux valeurs pour $-1 < \mu < 1$. L'implémentation des indices dans les OS est alors :

- Pour $\mu < 0$:

$$\begin{bmatrix} \text{FI}^S(\delta, -J) \\ \text{FQ}^S(\delta, -J) \\ \text{FU}^S(\delta, -J) \end{bmatrix} = \omega_0(\delta) \cdot \begin{bmatrix} \text{BP}^S(0, J) \times R_{11}(0) + \text{GR}^S(J, 0) \times R_{12}(0) \\ \text{GR}^S(0, J) \times R_{11}(0) + \text{ARR}^S(0, J) \times R_{12}(0) \\ \text{GT}^S(0, J) \times R_{11}(0) + \text{ART}^S(J, 0) \times R_{12}(0) \end{bmatrix} \quad (149)$$

- Pour $\mu > 0$:

$$\begin{bmatrix} \text{FI}^S(\delta, J) \\ \text{FQ}^S(\delta, J) \\ \text{FU}^S(\delta, J) \end{bmatrix} = \omega_0(\delta) \cdot \begin{bmatrix} \text{BP}^S(0, -J) \times R_{11}(0) + \text{GR}^S(-J, 0) \times R_{12}(0) \\ \text{GR}^S(0, -J) \times R_{11}(0) + \text{ARR}^S(0, -J) \times R_{12}(0) \\ \text{GT}^S(0, -J) \times R_{11}(0) + \text{ART}^S(-J, 0) \times R_{12}(0) \end{bmatrix} \quad (150)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 179 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX-3 Réflexion pour le modèle de BRDF de Roujean

IX-3.1 Modèle de BRDF de Roujean

La BRDF de Roujean est définie par [DR14]:

$$\rho_R(\theta_1, \theta_2, \phi) = k_0 + k_1 \times \rho_1(\theta_1, \theta_2, \phi) + k_2 \times \rho_2(\theta_1, \theta_2, \phi) \quad (151.a)$$

avec

$$\rho_1(\theta_1, \theta_2, \phi) = \frac{1}{2\pi} [(\pi - \phi) \cos \phi + \sin \phi] \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2 - \frac{1}{\pi} \times \left[\tan \theta_1 + \tan \theta_2 + \sqrt{\tan^2 \theta_1 + \tan^2 \theta_2 - 2 \cdot \tan \theta_1 \cdot \tan \theta_2 \cdot \cos \phi} \right] \quad (151.b)$$

$$\text{et} \quad \rho_2(\theta_1, \theta_2, \phi) = \frac{4}{3\pi} \cdot \frac{1}{\cos \theta_1 + \cos \theta_2} \times \left[\left(\frac{\pi}{2} - \xi \right) \cdot \cos \xi + \sin \xi \right] - \frac{1}{3} \quad (151.c)$$

$$\text{où } \xi \text{ est l'angle de phase défini par : } \cos \xi = \cos \theta_1 \times \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \times \sin \theta_2 \times \cos \phi \quad (152)$$

Remarque importante :

La publication de Roujean [DR14] fournit des valeurs des paramètres **k₀, k₁ et k₂**, pour différents types de végétation. Il est à noter que ces valeurs sont exprimées en pourcentage de réflectance alors que le code **SOS attend en entrée des valeurs relatives à une réflectance**, soit 100 fois plus faible.

Par exemple, les coefficients pour le cas « Plowed field » sont dans la Table 1 de [DR14] : k₀=24.3, k₁=7.3 et k₂=64.2. Pour le paramétrage de SOS, il faut donc introduire : k₀=0.243, k₁=0.073 et k₂=0.642.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 180 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX-3.2 Application au formalisme des OS

La réflexion par un modèle de BRDF correspond au terme M_{11} de la matrice de réflexion. La matrice correspondante peut s'écrire :

$$\overline{\overline{M}}(\mu, \phi, \mu', \phi') = \begin{pmatrix} M_{11}(\mu, \phi, \mu', \phi') & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

avec, par analogie entre les équations (112) et (113) :

$$M_{11}(\mu, \phi, \mu', \phi') = \frac{-\mu' \times \rho_R(\mu, \phi, \mu', \phi')}{\pi} \quad (153)$$

L'utilisation du modèle de Roujean amène le logiciel à calculer un fichier « Surface » contenant la décomposition en séries de Fourier de cette matrice de réflexion sous un format adéquat pour le code des OS (cf. section IX.1.1.d, eq. 116). Le logiciel calcule donc les termes de la série de Fourier :

$$P_{11}^S(\mu', \mu) = \mu \cdot \pi \times M_{11}^S(\mu', \mu) = -\mu' \cdot \mu \times \rho_R^S(\mu', \mu) \quad (154)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 181 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX-4 Réflexion pour des modèles de BPDF

Une complexité supplémentaire peut être introduite en prenant en compte la polarisation des surfaces. Ce type de développement peut être réalisé pour la réflexion spéculaire sur mer (cas du glitter pour une mer agitée) comme sur terres émergées. Le formalisme de réflexion fait alors intervenir une matrice de réflexion pour prendre en compte l'interaction en polarisation avec les paramètres de Stokes I, Q et U.

La réflexion de surface est régie par les lois de Fresnel. La matrice de réflexion se calcule ainsi à partir de la matrice de réflexion de Fresnel $\mathbf{F}(u, \phi, u', \phi')$ pondérée par une fonction $g(u, \phi, u', \phi')$ relative à une statistique d'inclinaison des éléments de surface (orientation des vagues, des feuilles ou des facettes de surface).

$$\overline{\mathbf{M}}(u, \phi, u', \phi') = g(u, \phi, u', \phi') \times \overline{\mathbf{F}}(u, \phi, u', \phi') \quad (155)$$

pour

- $u' = \cos \theta'$: angle zénithal d'incidence ($0 < \theta' < \pi/2$),
- $u = \cos \theta$: angle zénithal de réflexion ($0 < \theta < \pi/2$),
- $\Delta\phi$: angle azimutal relatif entre les directions d'incidence et de réflexion selon la convention des OS,
- $\mathbf{F}(u, \phi, u', \phi')$ la matrice de réflexion de Fresnel,
- $g(u, \phi, u', \phi')$ une fonction liée à la statistique d'orientation des facettes.

IX-4.1 Fonctions G de probabilité d'orientation des facettes de surface

IX.4.1.a FORMALISME CLASSIQUE

- **Cas de la réflexion du Glitter** (loi de Cox & Munk [DR3], [DR5]) :

$$g_{\text{Glitter}}(u, \phi, u', \phi) = \frac{1}{4\pi \cdot u \cdot \sigma^2} \times \frac{1}{\mu_n^4} \cdot \exp\left(\frac{-\tan^2 \theta_n}{\sigma^2}\right) \quad (156.a)$$

avec $\sigma = 0,003 + 0,00512 \times \text{vent (m/s)}$ (156.b)

et $\mu_n = \cos \theta_n$ où θ_n est l'angle zénithal de la normale à la facette des vagues.

- **Cas de la réflexion du modèle de Rondeaux** [DR13] :

$$g_{\text{Rondeaux}}(u, \phi, u', \phi) = \frac{1}{4\pi \times (1 + u / u')} \quad (157)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 182 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

- **Cas de la réflexion du modèle de Bréon [DR2] :**

$$g_{\text{Bréon}}(u, \phi, u', \phi) = \frac{1}{4\pi \times u} \quad (158)$$

- **Cas de la réflexion du modèle de Nadal [DR12] :**

$$g_{\text{Nadal}}(u, \phi, u', \phi) = \frac{F_{12}^{\text{Nadal}}(u, \phi, u', \phi)}{F_{12}^{\text{Fresnel}}(u, \phi, u', \phi)} \quad (159.a)$$

avec

$$\begin{cases} F_{12}^{\text{Nadal}}(u, \phi, u', \phi) = \alpha \times \left[1 - \exp\left(-\beta \times \frac{F_{12}^{\text{Fresnel}}(\omega)}{u + u'}\right) \right] \\ F_{12}^{\text{Fresnel}}(\omega) = 0.5 \times (r_r^2(\omega) - r_\ell^2(\omega)) \end{cases} \quad (159.b)$$

où $F_{12}^{\text{Fresnel}}(\omega)$ est opposée à la valeur R12 de la matrice de Fresnel (cf. eq. 132, page 171) par convention de signe du modèle de Nadal.

IX.4.1.b FORMALISME POUR LES OS

Le programme SOS_SURFACE ne calcule pas la matrice $\mathbf{M}^S(u', u)$ mais $\mathbf{P}^S(u', u) = u \cdot \pi \times \mathbf{M}^S(u', u)$. Le terme multiplicatif $u \cdot \pi$ est appliqué directement au calcul de la fonction G.

De plus, la routine SOS_MAT_REFLEXION calculant la décomposition en séries de Fourier de la matrice de réflexion divise G par $4\sigma^2$ dans ses calculs, avec σ défini par la relation (156.b). Ce traitement initié pour le calcul du glitter a été conservé pour le calcul des autres types de réflexion. Afin de compenser le coefficient $1/4\sigma^2$, les fonctions G des modèles autres que le glitter sont multipliées par $4\sigma^2$. L'intervention du coefficient $4\sigma^2$ pour ces modèles est purement un artefact et n'affecte pas les traitements. Par convention, on calcule pour ces modèles σ^2 avec un vent nul.

On utilise ainsi dans le programme SOS_SURFACE (routines SOS_GSF et SOS_GSF_RONDEAUX_BREON) :

$$\begin{cases} g_{\text{Glitter}}^{OS}(u, \phi, u', \phi) = u \cdot \pi \cdot 4\sigma^2 \times g_{\text{Glitter}}(u, \phi, u', \phi) = \frac{1}{\mu_n^4} \cdot \exp\left(\frac{-\tan^2 \theta_n}{\sigma^2}\right) \\ g_{\text{Rondeaux}}^{OS}(u, \phi, u', \phi) = u \cdot \pi \cdot 4\sigma^2 \times g_{\text{Rondeaux}}(u, \phi, u', \phi) = \sigma^2 / \left(\frac{1}{u} + \frac{1}{u'}\right) \\ g_{\text{Bréon}}^{OS}(u, \phi, u', \phi) = u \cdot \pi \cdot 4\sigma^2 \times g_{\text{Bréon}}(u, \phi, u', \phi) = \sigma^2 \\ g_{\text{Nadal}}^{OS}(u, \phi, u', \phi) = u \cdot \pi \cdot 4\sigma^2 \times g_{\text{Nadal}}(u, \phi, u', \phi) \end{cases} \quad (160)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 183 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

IX-4.2 Formalisme de décomposition en séries de Fourier de la matrice de réflexion de surface

La matrice de réflexion spéculaire s'écrit comme le produit d'une fonction $g(\mu, \phi, \mu', \phi')$ et de la matrice de réflexion de Fresnel $\bar{F}(\mu, \phi, \mu', \phi')$:

$$\bar{M}(\mu, \phi, \mu', \phi') = g(\mu, \phi, \mu', \phi') \times \bar{F}(\mu, \phi, \mu', \phi') \quad (155.bis)$$

IX.4.2.a DECOMPOSITION EN SERIES DE FOURIER DE LA FONCTION G

La fonction $g(\mu, \phi, \mu', \phi')$ est symétrique par rapport au plan principal solaire. On peut l'exprimer par une décomposition en séries de Fourier par rapport à $\phi - \phi'$:

$$g(\mu, \phi, \mu', \phi') = \sum_{k=0}^{\infty} (2 - \delta_{0k}) \times \cos[k.(\phi - \phi')] g^k(\mu, \mu') \quad (161.a)$$

avec pour ordre k de la série :

$$g^k(\mu, \mu') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \cos[k.(\phi - \phi')] g(\mu, \phi, \mu', \phi') d\phi' \quad (161.b)$$

IX.4.2.b DECOMPOSITION EN SERIES DE FOURIER DE LA MATRICE DE REFLEXION DE FRESNEL

- En section IX-2.1, nous avons vu que la matrice de réflexion de Fresnel s'écrit :

$$\bar{F}_k^*(i_1) = \frac{1}{2} \times \begin{bmatrix} r_\ell \cdot r_\ell^* + r_r \cdot r_r^* & r_\ell \cdot r_\ell^* - r_r \cdot r_r^* & 0 \\ r_\ell \cdot r_\ell^* - r_r \cdot r_r^* & r_\ell \cdot r_\ell^* + r_r \cdot r_r^* & 0 \\ 0 & 0 & r_\ell \cdot r_r^* + r_r \cdot r_\ell^* \end{bmatrix}$$

avec pour coefficients de réflexion :

$$\text{- Pour la composante parallèle : } r_\ell(i_1) = \frac{m^2 \cdot \cos i_1 - \sqrt{m^2 - \sin^2 i_1}}{m^2 \cdot \cos i_1 + \sqrt{m^2 - \sin^2 i_1}}$$

$$\text{- Pour la composante perpendiculaire : } r_r(i_1) = \frac{\cos i_1 - \sqrt{m^2 - \sin^2 i_1}}{\cos i_1 + \sqrt{m^2 - \sin^2 i_1}}$$

pour une expression des paramètres de Stokes selon la définition de Kuscer et Ribaric :

$$\begin{cases} I = \tilde{\epsilon}_\ell \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^* + \tilde{\epsilon}_r \cdot \tilde{\epsilon}_r^* \\ Q = \tilde{\epsilon}_\ell \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^* - \tilde{\epsilon}_r \cdot \tilde{\epsilon}_r^* \\ U = \tilde{\epsilon}_\ell \cdot \tilde{\epsilon}_r^* + \tilde{\epsilon}_r \cdot \tilde{\epsilon}_\ell^* \end{cases}$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 184 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

• Le développement de la matrice de Fresnel dans la base des polynômes de Legendre aboutit à l'expression suivante :

$$\overline{\overline{F}}_k^*(\omega) = \begin{bmatrix} \sum_{k=0}^L b_k \cdot \hat{P}_k(\cos \Omega) & \sum_{k=2}^L g_k \cdot \hat{P}_2^k(\cos \Omega) & 0 \\ \sum_{k=2}^L g_k \cdot \hat{P}_2^k(\cos \Omega) & \sum_{k=0}^L b_k \cdot \hat{P}_k(\cos \Omega) & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{k=0}^L d_k \cdot \hat{P}_k(\cos \Omega) \end{bmatrix} \quad (162)$$

où $\Omega = \pi - 2\omega$ est l'angle de diffusion correspondant à la réflexion pour un angle ω .

Il y a une analogie de formalisme stricte avec la matrice de phase [DR5]. Aussi, on peut exprimer la matrice de réflexion de Fresnel par une décomposition en séries de Fourier selon :

$$\overline{\overline{F}}(\mu, \phi, \mu', \phi') = \sum_{n=0}^L (2 - \delta_{0n}) \times \left\{ \cos[n(\phi - \phi')] \times \overline{\overline{F}}_C^n(\mu, \mu') + \sin[n(\phi - \phi')] \times \overline{\overline{F}}_S^n(\mu, \mu') \right\} \quad (163)$$

avec

$$\overline{\overline{F}}^n(\mu, \mu') = \overline{\overline{F}}_C^n(\mu, \mu') + \overline{\overline{F}}_S^n(\mu, \mu') \times \overline{\overline{D}} \quad (164)$$

où

$$\overline{\overline{D}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (165)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 185 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

On

écrit

ainsi :

$$\overline{F}^n(\mu, \mu') = \begin{bmatrix} BP^n(\mu, \mu') & GR^n(\mu, \mu') & -GT^n(\mu, \mu') \\ GR^n(\mu', \mu) & ARR^n(\mu, \mu') & -ART^n(\mu', \mu) \\ -GT^n(\mu', \mu) & -ART^n(\mu, \mu') & ATT^n(\mu, \mu') \end{bmatrix} \quad (166)$$

soit :

$$\overline{F}_C^n(\mu, \mu') = \begin{bmatrix} BP^n(\mu, \mu') & GR^n(\mu, \mu') & 0 \\ GR^n(\mu', \mu) & ARR^n(\mu, \mu') & 0 \\ 0 & 0 & ATT^n(\mu, \mu') \end{bmatrix} \quad (167)$$

$$\overline{F}_S^n(\mu, \mu') = \begin{bmatrix} 0 & 0 & GT^n(\mu, \mu') \\ 0 & 0 & ART^n(\mu', \mu) \\ -GT^n(\mu', \mu) & -ART^n(\mu, \mu') & 0 \end{bmatrix} \quad (168)$$

avec

$$\left\{ \begin{array}{l} BP^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \beta_k \cdot P_s^k(\mu) \cdot P_s^k(\mu') \\ GR^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \gamma_k \cdot P_s^k(\mu) \cdot R_s^k(\mu') \\ GT^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \gamma_k \cdot P_s^k(\mu) \cdot T_s^k(\mu') \\ ARR^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \alpha_k \cdot R_s^k(\mu) \cdot R_s^k(\mu') + \xi_k \cdot T_s^k(\mu) \cdot T_s^k(\mu') \\ ART^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \alpha_k \cdot R_s^k(\mu') \cdot T_s^k(\mu) + \xi_k \cdot R_s^k(\mu) \cdot T_s^k(\mu') \\ ATT^S(\mu, \mu') = \sum_{k=S}^{\infty} \alpha_k \cdot T_s^k(\mu) \cdot T_s^k(\mu') + \xi_k \cdot R_s^k(\mu) \cdot R_s^k(\mu') \end{array} \right. \quad (169)$$

pour les fonctions $P_s^k(\mu)$, $R_s^k(\mu)$ et $T_s^k(\mu)$ définis à partir des fonctions généralisées de Legendre.

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 186 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

IX.4.2.c MATRICE DE REFLEXION

L'injection des relations (161) et (163) dans (155.bis) permet de montrer que :

$$\begin{aligned} & \overline{\overline{M}}(\mu, \phi, \mu', \phi') \\ &= \sum_{p=0}^{\infty} (2 - \delta_{0p}) \times \left\{ \cos[p.(\phi - \phi')] \times \overline{\overline{M}}_C^p(\mu, \mu') + \sin[p.(\phi - \phi')] \times \overline{\overline{M}}_S^p(\mu, \mu') \right\} \quad (170) \end{aligned}$$

$$\text{avec} \quad \left\{ \begin{aligned} \overline{\overline{M}}_C^p(\mu, \mu') &= g^p(\mu, \mu') \times \overline{\overline{F}}_C^0(\mu, \mu') \\ &+ \sum_{n=1}^N \left[g^{p+n}(\mu, \mu') + g^{|p-n|}(\mu, \mu') \right] \times \overline{\overline{F}}_C^p(\mu, \mu') \\ \overline{\overline{M}}_S^p(\mu, \mu') &= \sum_{n=1}^N \left[g^{p+n}(\mu, \mu') - g^{|p-n|}(\mu, \mu') \right] \times \overline{\overline{F}}_S^p(\mu, \mu') \end{aligned} \right. \quad (171)$$

$$\text{donnant} \quad \overline{\overline{M}}^p(\mu, \mu') = \overline{\overline{M}}_C^p(\mu, \mu') + \overline{\overline{M}}_S^p(\mu, \mu') \times \overline{\overline{D}} \quad (172)$$

Soit encore :

$$\begin{aligned} \overline{\overline{M}}_{théorie}^p(\mu, \mu') &= g^p(\mu, \mu') \times \begin{bmatrix} \text{BP}^0(\mu, \mu') & \text{GR}^0(\mu, \mu') & 0 \\ \text{GR}^0(\mu', \mu) & \text{ARR}^0(\mu, \mu') & 0 \\ 0 & 0 & \text{ATT}^0(\mu, \mu') \end{bmatrix} \\ &+ \sum_{n=1}^N \left[g^{p+n}(\mu, \mu') + g^{|p-n|}(\mu, \mu') \right] \times \begin{bmatrix} \text{BP}^n(\mu, \mu') & \text{GR}^n(\mu, \mu') & 0 \\ \text{GR}^n(\mu', \mu) & \text{ARR}^n(\mu, \mu') & 0 \\ 0 & 0 & \text{ATT}^n(\mu, \mu') \end{bmatrix} \\ &+ \sum_{n=1}^N \left[g^{p+n}(\mu, \mu') - g^{|p-n|}(\mu, \mu') \right] \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\text{GT}^n(\mu, \mu') \\ 0 & 0 & -\text{ART}^n(\mu', \mu) \\ -\text{GT}^n(\mu', \mu) & -\text{ART}^n(\mu, \mu') & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (173)$$

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 187 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	--

IX.4.2.d SPECIFICITES D'IMPLEMENTATION

$$\begin{aligned}
\overline{\overline{M}}_{code}^p(\mu, \mu') &= g^p(u, u') \times \begin{bmatrix} BP_{code}^0(u, u') & GR_{code}^0(u, u') & 0 \\ GR_{code}^0(u', u) & ARR_{code}^0(u, u') & 0 \\ 0 & 0 & -ATT_{code}^0(u, u') \end{bmatrix} \\
&+ \sum_{n=1}^N (-1)^n \times [g^{p+n}(u, u') + g^{|p-n|}(u, u')] \times \begin{bmatrix} BP_{code}^n(u, u') & GR_{code}^n(u, u') & 0 \\ GR_{code}^n(u', u) & ARR_{code}^n(u, u') & 0 \\ 0 & 0 & -ATT_{code}^n(u, u') \end{bmatrix} \\
&+ \sum_{n=1}^N (-1)^n \times [g^{p+n}(u, u') - g^{|p-n|}(u, u')] \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & GT_{code}^n(u, u') \\ 0 & 0 & ART_{code}^n(u', u) \\ -GT_{code}^n(u', u) & -ART_{code}^n(u, u') & 0 \end{bmatrix}
\end{aligned}
\tag{174}$$

Les fonctions BP^S , GR^S , ARR^S , ART^S et ATT^S , associées à la réflexion de Fresnel, sont calculées pour les conditions suivantes :

- la réflexion de Fresnel est calculée en fonction de l'angle $\Omega' = 2\omega$ (au lieu de l'angle $\Omega = \pi - 2\omega$),
- le coefficient de réflexion parallèle r_ℓ est opposé à la valeur vraie,
- $u' = -\mu' > 0$.

L'expression de la matrice de Fresnel en fonction de l'angle Ω' et l'opposition de r_ℓ aboutissent à :

$$\begin{cases} \beta_k^{code} = (-1)^k \times \beta_k^{théorie} \\ \gamma_k^{code} = (-1)^k \times \gamma_k^{théorie} \\ \delta_k^{code} = -(-1)^k \times \delta_k^{théorie} \\ \alpha_k^{code} = (-1)^k \times \alpha_k^{théorie} \\ \xi_k^{code} = -(-1)^k \times \xi_k^{théorie} \end{cases}
\tag{175}$$

Le calcul de la matrice de Fresnel à partir de $u = \mu > 0$ et de $u' = -\mu' > 0$, joint à la sommation des termes avec le facteur $(-1)^n$ permettent de faire concorder la théorie et l'implémentation. La démonstration se fait en

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 188 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

jouant sur les règles des fonctions $P_s^k(\mu)$, $R_s^k(\mu)$ et $T_s^k(\mu)$ dont dépendent les fonctions BP^S , GR^S , ARR^S , ART^S et ATT^S (cf. eq. 146) :

$$\begin{cases} P_s^k(\mu) = (-1)^{k-S} \times P_s^k(-\mu) \\ R_s^k(\mu) = (-1)^{k-S} \times R_s^k(-\mu) \\ T_s^k(\mu) = -(-1)^{k-S} \times T_s^k(-\mu) \end{cases}$$

<p>CS SI</p>	<p>Manuel utilisateur du code des OSD</p>	<p>Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 189 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017</p>
---------------------	--	--

IX-5 Rôle des routines associées au programme SOS SURFACE

IX-5.1 Procédures du fichier SOS SURFACE

- **SOS_SURFACE** : Programme principal gérant l'ensemble des traitements permettant la création d'un fichier SURFACE pour les OS : décomposition en séries de Fourier d'une matrice de réflexion de surface pour les modèles du glitter, de BRDF de Roujean, de BPDF de Rondeaux, Bréon ou Nadal. Les options de traitements sont définies en section III-2.

- **Routine SOS_MAT_FRESNEL** : Calcule le développement de la matrice de Fresnel dans la base des polynômes de Legendre. Calculs utilisant l'opposé du coefficient de réflexion parallèle (voir section IX.4.2.d). Crée le fichier temporaire RES_FRESNEL.

- **Routine SOS_MAT_REFLEXION** : Calcule la matrice de réflexion de surface pour le glitter ou autres BRDF / BPDF. Les angles d'incidence et de réflexion sont exprimés comme étant inférieurs à 90 degrés (μ de Gauss > 0). Crée le fichier temporaire RES_MAT_REFLEX.

- **Routine SOS_NOYAUX_FRESNEL** : Calcule la décomposition en séries de Fourier de la matrice de Fresnel selon l'azimut, pour les directions d'incidence et de réflexion θ_1 et θ_2 .

- **Routine SOS_MISE_FORMAT** : Réordonne les éléments de la matrice de réflexion, enregistrés dans le fichier RES_MAT_REFLEX, pour être utilisable par le code des OS. Les enregistrements dans le fichier d'entrée RES_MAT_REFLEX bouclent sur chaque couple d'angles (θ_1, θ_2) et donnent la décomposition en séries de Fourier associée. Le format d'enregistrement du fichier résultat, utilisable par le code des OS, boucle sur les ordres IS de la décomposition en séries de Fourier et donne pour chaque IS, les valeurs $P_{ij}^{IS}(\theta_1, \theta_2)$ associées à l'ensemble des couples (θ_1, θ_2) .

- **Routine SOS_BPDF_AJOUT_BRDF** : Fait la sommation de deux matrices de réflexion, décomposées en séries de Fourier.

- **Routine SOS_COMPLETE_NOM_FIC_SURF** : Complète le nom des fichiers du nombre d'angles de Gauss et du nom du fichier des « angles utilisateur ».

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 190 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX-5.2 Procédures du fichier SOS NOM FIC SURFACE

• **Routine SOS_NOM_FICGLITTER** : Gère la définition par défaut du nom des fichiers de Glitter en fonction de :

- L'indice de réfraction de l'eau : IND **format F5.3** (précision à 10^{-3}).
- La vitesse du vent : WIND **format F4.1** (précision à 10^{-1}).
- Nombre d'angles de Gauss utilisés : nnn.
- Nom du fichier des angles complémentaires de l'utilisateur : USERFILE (sans son arborescence).

Le nom du fichier de Glitter est de la forme : **GLITTER-IND-WIND- MU_{nnn}_USERFILE** avec

- IND sur 5 caractères (ex : 1.400)
- WIND sur 4 caractères (ex : 12.5)

Exemple : IND = 1.4, WIND = 12.5 et 24 angles de Gauss \Rightarrow « GLITTER-1.400-12.5-MU24 »

Les paramètres de simulations sont convertis en chaînes de caractères après multiplication par une puissance de 10 permettant d'obtenir un entier. Exemple pour la conversion de WIND en une chaîne de caractères CWIND(1:4) : on passe du format F4.1 au format I4 en multipliant WIND par 10, avant conversion en une chaîne de caractères A4. Le dernier caractère CWIND(4) est la décimale de WIND.

• **Routine SOS_NOM_FICROUJ** : Gère la définition par défaut du nom des fichiers de BRDF de Roujean en fonction de :

- Paramètres de modèles k_0 , k_1 et k_2 **format F7.3** (précision à 10^{-3}).
- Valeur limite de l'angle zénithal de visée : SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN (précisée dans « SOS.h »).
- Valeur limite de l'angle zénithal solaire : SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN (précisée dans « SOS.h »).
- Nombre d'angles de Gauss utilisés : nnn.
- Nom du fichier des angles complémentaires de l'utilisateur : USERFILE (sans son arborescence).

Le nom du fichier de Roujean est de la forme :

ROUJ-K₀-K₁-K₂-VL{SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN}-SL{SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN}-MU_{nnn}_USERFILE
avec K_x sur 7 caractères (ex : 000.243)

Exemple : SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN = 60°, SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN = 60°, K₀ = 0.243, K₁ = 0.073, K₂ = 0.642 et 24 angles de Gauss \Rightarrow « ROUJ-000.243-000.073-000.642-VL60-SL60-MU24 »

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 191 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

• **Routine SOS_NOM_FICRH** : Gère la définition par défaut du nom des fichiers de BRDF / BPDF du modèle de Rondeaux en fonction de :

- L'indice de réfraction de la végétation : IND **format F5.3** (précision à 10^{-3}).
- Du modèle de BRDF de Roujean associé pour la composante d'intensité :
 - Paramètres k_0 , k_1 et k_2 **format F7.3** (précision à 10^{-3}).
 - Valeur limite de l'angle zénithal de visée : SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN (précisée dans « SOS.h »).
 - Valeur limite de l'angle zénithal solaire : SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN (précisée dans « SOS.h »).
 - Nombre d'angles de Gauss utilisés : nn.
 - Nom du fichier des angles complémentaires de l'utilisateur : USERFILE (sans son arborescence).

Le nom du fichier de Rondeaux est de la forme :

RH-IND-ROUJ-K₀-K₁-K₂-VL{SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN}-SL{SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN}-Munn_USERFILE
avec :

- IND sur 5 caractères (ex : 1.500),
- K_x sur 7 caractères (ex : 000.243)

Exemple : IND = 1.5, SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN = 60°, SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN = 60°, K₀ = 0.243, K₁ = 0.073, K₂ = 0.642 et 24 angles de Gauss
⇒ « RH-1.500-ROUJ-000.243-000.073-000.642-VL60-SL60-MU24 »

• **Routine SOS_NOM_FICBREON** : Gère la définition par défaut du nom des fichiers de BRDF / BPDF du modèle de Bréon en fonction de :

- L'indice de réfraction de sol : IND **format F5.3** (précision à 10^{-3}).
- Du modèle de BRDF de Roujean associé pour la composante d'intensité :
 - Paramètres k_0 , k_1 et k_2 **format F7.3** (précision à 10^{-3}).
 - Valeur limite de l'angle zénithal de visée : SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN (précisée dans « SOS.h »).
 - Valeur limite de l'angle zénithal solaire : SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN (précisée dans « SOS.h »).
 - Nombre d'angles de Gauss utilisés : nn.
 - Nom du fichier des angles complémentaires de l'utilisateur : USERFILE (sans son arborescence).

Le nom du fichier de Bréon est de la forme :

BREON-IND-ROUJ-K₀-K₁-K₂//
-VL{SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN}-SL{SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN}-Munn_USERFILE
avec :

- IND sur 5 caractères (ex : 1.500),
- K_x sur 7 caractères (ex : 000.243)

<p>CS SI</p>	<p>Manuel utilisateur du code des OSD</p>	<p>Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 192 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017</p>
---------------------	--	--

Exemple : $IND = 1.5$, $SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN = 60^\circ$, $SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN = 60^\circ$, $K_0 = 0.243$, $K_1 = 0.073$, $K_2 = 0.642$ et 24 angles de Gauss
 \Rightarrow « BREON-1.500-ROUJ-000.243-000.073-000.642-VL60-SL60-MU24 »

• **Routine SOS_NOM_FICNADAL** : Gère la définition par défaut du nom des fichiers de BRDF / BPDF du modèle de Nadal en fonction de :

- L'indice de réfraction de surface : IND **format F5.3** (précision à 10^{-3}).
- La valeur du paramètre α du modèle **format F6.4** (précision à 10^{-4}).
- La valeur du paramètre β du modèle **format F4.1** (précision à 10^{-1}).
- Du modèle de BRDF de Roujean associé pour la composante d'intensité :
 - Paramètres k_0 , k_1 et k_2 **format F7.3** (précision à 10^{-3}).
 - Valeur limite de l'angle zénithal de visée : $SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN$ (précisée dans « SOS.h »).
 - Valeur limite de l'angle zénithal solaire : $SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN$ (précisée dans « SOS.h »).
 - Nombre d'angles de Gauss utilisés : nn.
 - Nom du fichier des angles complémentaires de l'utilisateur : USERFILE (sans son arborescence).

Le nom du fichier de Nadal est de la forme :

NADAL-IND- α - β //

-ROUJ- K_0 - K_1 - K_2 -VL{SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN}-SL{SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN}-MUnn_USERFILE

avec :

- α sur 6 caractères (ex : 0.02229)
- β sur 4 caractères (ex : 38.0)
- IND sur 5 caractères (ex : 1.500),
- K_x sur 7 caractères (ex : 000.243)

Exemple : Pour un modèle de Nadal défini par un indice $IND = 1.5$, $\alpha = 0.0229$, $\beta = 38$, et un modèle de Roujean pour $SOS_TETAV_LIM_ROUJEAN = 60^\circ$, $SOS_TETAS_LIM_ROUJEAN = 60^\circ$, $K_0 = 0.243$, $K_1 = 0.073$, $K_2 = 0.642$ et 24 angles de Gauss
 \Rightarrow « NADAL-1.500-0.0229-38.0-ROUJ-000.243-000.073-000.642-VL60-SL60-MU24 »

<p>CS SI</p>	<p>Manuel utilisateur du code des OSD</p>	<p>Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 193 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017</p>
---------------------	--	--

IX-5.3 Procédures du fichier SOS ROUJEAN

- **Routine SOS_ROUJEAN** : Génère les fichiers de BRDF du modèle de Roujean.

Si on nomme $F_R(\theta_1, \theta_2, \phi)$ la BRDF de Roujean (dimension d'une réflectance), la routine calcule la décomposition en séries de Fourier sur ϕ de la fonction F suivante :

$$F(\theta_1, \theta_2, \phi) = F_R(\theta_1, \theta_2, \phi) \times \cos \theta_1 \times \cos \theta_2 \quad (176)$$

pour

- θ_1 : angle zénithal d'incidence ($0 < \theta_1 < \pi/2$),
- θ_2 : angle zénithal de réflexion ($0 < \theta_2 < \pi/2$),
- ϕ : angle azimutal relatif entre les directions d'incidence et de réflexion selon la convention du modèle de Roujean ($0 \leq \phi \leq \pi$) : $\phi_{OS} = \pi - \phi_{Roujean}$,
- $F_R(\theta_1, \theta_2, \phi)$ la BRDF de Roujean définie par les paramètres K_0, K_1, K_2 (de grandeurs donnant une réflectance).

Le résultat de la décomposition en séries de Fourier de la fonction $F(\theta_1, \theta_2, \phi)$ est enregistré sous un format adéquat pour le code des OSD (voir section IX-3).

- **Routine SOS_CALC_F_ROUJEAN** : Calcule la fonction $F(\theta_1, \theta_2, \phi)$ pour un couple d'angles (θ_1, θ_2) et un azimut ϕ .

- **Routine SOS_FSF_ROUJEAN** : Réalise la décomposition en séries de Fourier sur ϕ de la fonction $F(\theta_1, \theta_2, \phi)$ et enregistre les résultats dans le fichier "RES_MAT_REFLEX" pour chaque couple d'angles (θ_1, θ_2).

- **Routine SOS_MISE_FORMAT_RJ** : La décomposition en séries de Fourier de la fonction F correspond au terme P_{11} d'une matrice de réflexion. La routine intègre cet élément dans une matrice P_{ij} , en posant nuls les autres termes, relatifs à la polarisation par réflexion. Les enregistrements dans le fichier d'entrée "RES_MAT_REFLEX" bouclent sur chaque couple d'angles (θ_1, θ_2) et donnent la décomposition en séries de Fourier associée. Le format d'enregistrement du fichier résultat, utilisable par le code des OS, boucle sur les ordres IS de la décomposition en séries de Fourier et donne pour chaque IS, les valeurs $P_{ij}^{IS}(\theta_1, \theta_2)$ associées à l'ensemble des couples (θ_1, θ_2).

CS SI	Manuel utilisateur du code des OSD	Nomenclature : SOS-MU-001-II PAGE : 194 EDIT. : 04 REV. : 01 DATE : 05/09/2017
--------------	---	---

IX-5.4 Procédures du fichier SOS GLITTER

- **Routine SOS_GLITTER** : Génère les fichiers de BRDF / BPDF de la réflexion du Glitter.
- **Routine SOS_CALCG** : Calcule la fonction $g_{\text{Glitter}}^{OS}(u, \phi, u', \phi')$ pour un couple d'angles (θ_1, θ_2) et un azimut ϕ (cf. eq. 160, page 182).
- **Routine SOS_GSF** : Décompose en séries de Fourier la fonction $g_{\text{Glitter}}^{OS}(u, \phi, u', \phi')$.

IX-5.5 Procédures du fichier SOS RONDEAUX BREON

- **Routine SOS_RONDEAUX_BREON** : Génère les fichiers de BRDF / BPDF de la réflexion des modèles de Rondeaux ou Bréon.
- **Routine SOS_GSF_RONDEAUX_BREON** : Décompose en séries de Fourier la fonction $g_{\text{Rondeaux}}^{OS}(u, \phi, u', \phi')$ ou $g_{\text{Bréon}}^{OS}(u, \phi, u', \phi')$ du modèle de Rondeaux ou Bréon (cf. eq. 160, page 182).

IX-5.6 Procédures du fichier SOS NADAL

- **Routine SOS_NADAL** : Génère les fichiers de BRDF / BPDF de la réflexion du modèle de Nadal.
- **Routine SOS_CALC_F21_NADAL_SUR_FRESNEL** : Calcule la fonction $g_{\text{Nadal}}^{OS}(u, \phi, u', \phi')$ du modèle de Nadal (cf. eq. 160, page 182).
- **Routine SOS_F21SF_NADAL** : Décompose en séries de Fourier la fonction $g_{\text{Nadal}}^{OS}(u, \phi, u', \phi')$.