

Dossier de définition des algorithmes IASI

Préparé par :

Eric PEQUIGNOT

DCT/SI/MO

Vincent LONJOU

DCT/ME/EI

Vérifié par :

Denis BLUMSTEIN

DCT/SI/MO

Approuvé par :

Carole LARIGAUDERIE

DCT/ME/OT

GERE EN CONFIGURATION :

OUI

☒

NON

☐

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 2 of : 502
---	---	--	--

LISTE DE DIFFUSION

X	NOM/PRENOM		SIGLE	BPI	TELEPHONE	FAX
X	BLUMSTEIN	Denis	DCT/SI/MO	811	05 61 28 26 35	05 61 27 36 33
X	BUFFET	Laurence	DCT/SI/IN	3601	05 61 28 26 68	05 61 28 26 92
X	FIEDLER	Lars	EUMETSAT			
X	LONJOU	Vincent	DCT/SI/EI	902	05.61.27.40.29	05.61.27.36.61
X	GAUDEL	Ines	DCT/ME/EI	902	05.61.28.23.23	05.61.27.36.61
X	KAYAL	GÖkhan	EUMETSAT			
X	LARIGAUDERIE	Carole	DCT/ME/OT	612	05 61 28 21 99	05 61 28 18 09
X	MEUNIER	Frederique	DCT/ME/EI	902	05 61 27 35 69	05 61 27 36 61
X	PHULPIN	Thierry	DCT/SI/IM	2111	05.61.27.39.01	05 61 28 18 15
X	PEQUIGNOT	Eric	DCT/SI/MO	811	05 61 28 13 97	05 61 27 36 33
X	TOURNIER	Bernard	NOVELTIS		05 62 88 11 15	05 62 88 11 10

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 3 of : 502
---	---	--	--

MODIFICATION DU DOCUMENT

ISSUE	REV	DATE	Total pages	DESCRIPTION DES MODIFICATIONS
1	0	12 / 03 / 99	131	Edition Originale
2	0	20 / 04 / 00	369	Refonte complète du corps du document Mise à jour des fiches descriptives des annexes 1, 2, 3 et 4 Ajout des annexes 5, 6 et 8 Ajout références croisées données / algorithmes dans l'annexe 8
3	0	7/09/2001		Prise en compte : – RIDs de la GSSR – commentaires de MPI – commentaires de QTIS – commentaires Alcatel Description du modèle optico-géométrique de l'instrument. Précisions concernant la représentation des IPSF. Mise en évidence des interfaces avec EPS-CGS pour la localisation des produits Description des surveillances Description de la gestion des erreurs Introduction de l'algorithme de calcul des radiances AVHRR. Mises à jour des fiches descriptives des annexes 1, 2, 3, 4.
3	1	26/10/2001		Ecriture pseudo-code des fiches RNS ₆₇ , NLB ₆₈ , SHB ₁₀₁ , SDB ₇₄ , SEP ₁₀₂ , SRC ₈₂ . Fusion des fiches OSB ₅₂ et SBL ₅₆ .
				Modification fiches CTC ₅₀ , SRF ₇₈ , CAF ₇₉ . Compléments Annexe 8, et 9

4	0	19 / 4 / 2002	476	<p>Actions de la RDP TEC (Rids BM-31, IB-04)</p> <p>Ajouts</p> <ul style="list-style-type: none"> - surveillances du contraste et des interférogrammes de calibration - filtrage de la température du corps noir interne (FTB₃₀) et utilisation dans HEC₃₂ - modèle d'évolution orbital (températures...) - calcul du modèle orbital (CMO₈₁) - création du code de l'algorithme (QIS₄₅) <p>Modification CCS₄₁, IAC₄₀, DPT₁₁₀, SSS₂₁, SME₃₃, S1C₃₇, ICC₃₈, GEO₄₄, SMM₆₃, EXS₁₀₀, DPT₁₁₀, MCX₁₁₁</p> <p>Correction FAX₂₅, SMC₃₄, ISF₄₃, SAF₇₆, ISC₁₀₉, ann.7</p>
4	1	31/10/2002	491	<p>CCS₄₁ : utilisation image IIS en cas dégradé AVHRR. pages modifiées 238-255, 453, 454 + 14 pages insérées après 255</p> <p>IAC₄₀ : modification pour résoudre le problème de performance rencontré en utilisant les fonctions METOP. pages modifiées 233, 234</p> <p>GEO₄₄ : précisions sur le pseudo-code + correction d'interface. pages modifiées : 259, 260, 455 + 1 page insérée</p> <p>SSS₂₁ : Prise en compte de IISRot. pages modifiées 195,196,199, 200, 443</p> <p>RNS₆₇, MZQ₇₀ : - pages modifiées 311, 312, 315</p> <p>Correction PSP₇₅ : page modifiée 323</p> <p>Corrections annexe 9, page 451, 459</p>

4	2	10/1/2003	491	<p>Les modifications sont identifiées par rapport à la révision 4.1</p> <p>QIS₄₅ : Gestion des indices en cohérence avec le PFS IASI, prise en compte des cas dégradés OPS Pages modifiées : 258-260, 456</p> <p>CCS₄₁ : Interpolation linéaire pour résoudre le problème de performance rencontré en utilisant les fonctions METOP. Pages modifiées : 238, 239, 242, 249, 250, 453</p> <p>IACS₄₀ : Paramétrisation de la sous-grille d'interpolation de la localisation Avhrr Pages modifiées : 231, 233, 405, 452</p> <p>Correction diverses annexes 8 et 9 Pages modifiées : 397, 427, 438, 442</p>
4	3	28/4/2003		<p>Corrections diverses suite à la génération des jeux de test de l'OPS V1. Cette version correspond aux algorithmes codés dans la Version V1 du logiciel OPS.</p> <p>Les modifications sont identifiées par rapport à la révision 4.2</p> <p>SSS₂₁ : page 198</p> <p>IAX₄₀ : page 208</p> <p>FAX₂₅ : page 212</p> <p>S1C₃₇ : page 225</p> <p>IAC₄₀ : pages 235, 236</p> <p>CCS₄₁ : pp.241,242,244-253,255,257,259,260, 263, 265-268</p> <p>ISF₄₃ : page 271</p> <p>QIS₄₅ : pp. 276-278</p> <p>EXS₁₀₀ : pp. 359,360</p> <p>Annexe 7 : pages 405</p> <p>Annexe 9 : pp. 452,474</p>

5	0	30/4/2003	497	<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 4.2</p> <p>1/ Corrections des algorithmes de l'OPS (correspondant à la version V2)</p> <p>FAX_25, FTB_30 : test du nombre de points pages 211-214</p> <p>2/ Adaptations d'interfaces des algorithmes TEC pour préparer la phase de conception</p> <ul style="list-style-type: none"> - CTC_50, USB_51, ZSB_53, SBL_56 - PEF_60 - NLB_68 - SDB_74, SRF_78, CAF_79, SRC_82 - SHB_101 - SEP_102 - modifications correspondantes de l'annexe9 <p>3/ - SRC_82 : précision sur le pseudo-code</p> <p>4/ Ann. 7 et 8 : Constantes physiques c1,c2</p>
5	1	18/11/2003		<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 5.0 (CR216, CR221 et CR222)</p> <p>1/ Modifs. suite au traitement des mesures du Vide Optique IASI PFM</p> <ul style="list-style-type: none"> - Surveillances §8.2.5, 8.2.19, 8.2.20 - CCO_57 : nouvelle définition - FFT_8 : Mise en cohérence avec code DPS <p>2/ Modifs. suite aux retours CD/Codage/TU des outils et algos TEC</p> <p>2.1/ Précisions</p> <ul style="list-style-type: none"> - DCO_01a, NLC_2, SPK_3, IRS_5, ZSB_53, WNP_58, SMT_66, SAS_77, <p>2.2/ Corrections</p> <ul style="list-style-type: none"> - CTC_50, RSC_54, RSH_55, SBL_56, ATT_61, SMM_63, NLB_68, MZQ_70, SAF_76, SRF_78, CAF_79, SRC_82, SHB_101, SEP_102 <p>+ modifs. annexe 9 en cohérence</p> <p>3/ Modifs. suite à la génération des jeux d'essais et la recette de l'OPS</p> <p>3.1/ Précisions</p> <ul style="list-style-type: none"> - FAX_25 <p>3.2/ Corrections</p> <ul style="list-style-type: none"> - SSS_21, FTB_30, HEC_32, ISF_43 <p>4/ EXS_100 : Prise en compte de la température minimum encodable dans l'interface OPS->TEC</p>

5	2	23/03/2004		<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 5.1 suite à la validation scientifique de l'OPS (CR236 et CR239)</p> <ul style="list-style-type: none"> – SSS₂₁, HEC₃₂, SME₃₃ : précision de la date de référence de la ligne IASI (SN=15), – IAX₂₄ : corrections – FAX₂₅ : corrections et précisions sur cas dégradés, – FTB₃₀ : corrections et précisions sur cas dégradés, – IAC₄₀ : corrections et précisions sur cas dégradés, – CCS₄₁ : corrections et précision sur gestion des pixels non classés, – GEO₄₄ : corrections (prise en compte offsets) – QIS₄₅ : Traitement spécifique Ext.Cal pour la TEC, – Annexe 7 : Définition de la fonction d'amortissement d'une fenêtre spectrale.
5	3	4/06/2004		<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 5.2</p> <ul style="list-style-type: none"> - GEO₄₄ : prise en compte du cas dégradé de fonctionnement sans localisation AVHRR, - MCX₁₁₁ : correction
5	4	13/05/2005		<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 5.3.</p> <p>1/ Précisions</p> <ul style="list-style-type: none"> - §6.4.2.5, §8.2.6, §8.2.10, SMM₆₃ <p>2/ Corrections</p> <ul style="list-style-type: none"> - CTC₅₀ (+ utilisation du bruit RNS lissé) - RSC₅₄, RSH₅₅, CCO₅₇, WNP₅₈, ATT₆₁ - SAF₇₆ (signe offset chromatique) - RNS₆₇, SHB₁₀₁ (ajout de sorties supplémentaires) - ISC₁₀₉ <p>3/ Typos</p> <ul style="list-style-type: none"> - SBL₅₆, SMT₆₆, SRC₈₂ <p>4/ Nouveaux algorithmes</p> <ul style="list-style-type: none"> - IHB₁₀₅, HCD₁₀₆
5	5	09/03/2007		<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 5.4</p> <p>1/ Modifications ZPD₄ (scènes froides)</p> <p>2/ Modifications mineures des algorithmes OPS en fin de Cal/Val A</p> <ul style="list-style-type: none"> - FAX₂₅ : indice de qualité moins pessimiste - IAC₄₀ : offsetGuess utilisé dans les cas d'erreur - QIS₄₅ : suppression flags IAC dans GQisFlagQual - EXS₁₀₀ : pas d'appel en cas de spectre erroné - DPT₁₁₀ : inversion du ratio MDptPixQual - MCX₁₁₁ : pas d'appel en cas de spectre erroné + correction

5	6	1/06/2007		<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 5.5</p> <p>Modifications mineures des algorithmes OPS en fin de Cal/Val B</p> <ul style="list-style-type: none"> - SSD_23 : calcul WnShiftQual (saturé à 1) - FAX_25 : calcul indice de qualité de l'axe interféro - QIS_45 : modification calcul indices de qualité - MCX_111: CoeffCalRad passe en NeDT à 280 K
5	7	15/10/2007		<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 5.6</p> <p>Modifications mineures des algorithmes OPS en fin de Cal/Val C (V4-0 de l'OPS) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - SSD_23 : Cutoff adimensionnel - IAC_40 : Mise en cohérence traitement d'erreur - QIS_45 : Correction calcul QualIndexLocAvg en cas d'erreur ; prise en compte flag GOPSFlaGeoAvhrMiss <p>Mise à jour des rédacteurs et de la liste de diffusion</p>
5	8	25/04/2008		<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 5.7</p> <p>Modification mineure des algorithmes OPS avant évolutions « day 2 » (V4-0-1 de l'OPS) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - QIS_45 : Modification de la valeur de QualIndexLocAvg en cas d'erreur <p>Mise à jour des rédacteurs et de la liste de diffusion</p>
6	0	14/10/2009		<p>Modifications tracées par rapport à l'issue 5.8</p> <p>Prise en compte des évolution DAY 2 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 42_PCH : NEW – computation of the 4 pseudo-channels (Task 2) - 46_HIP : NEW – computation of Nzpd interpixel differences (Task 7a) - 21_SSS : UPDATE (Task 1) - 23_SSD : UPDATE (Task 5) - 25_FAX : Ajout d'un commentaire pour tenir compte du changement lors de la “construction des paramètres d'entrée” : guess dans la position de l'AI (HRPT) (Task 10) - 40_IAC : UPDATE (Task 3b) - 41_CCS : UPDATE (Task 9) - 45_QIS : UPDATE (Task 6: band dependant + new detailed flag and Task 8) <p>Mise à jour des rédacteurs et de la liste de diffusion</p>
6	1	10/02/2009		<ul style="list-style-type: none"> - Correction de quelques typo dans les algos pendant le developpement DAY2 - 46_HIP : FlagInterPixNZpdNonQual devient PN dependant pour etre en accord avec le PFS et QIS₄₅. Rem : ceci n'est a priori pas necessaire !
6	2	19/02/2009		<ul style="list-style-type: none"> - 46_HIP : modification. Pour des raisons de cohérence avec l'OPS, on a supprimé les flags GOPS en entrée
6	3	05/03/2009		<ul style="list-style-type: none"> - 45_QIS : élimination du bug dans le calcul de QualIndexSpect - 41_CCS : mise à jour de FlagAvhrrIntoFov

6	4	30/03/2009		- Mise en cohérence de 45_QIS et 46_HIP avec l'OPS
6	5	04/06/2009		<ul style="list-style-type: none"> - Modification de 42_PCH : DWnSpect a été retiré de la somme AvhrrPseudoChn(i+2) car il est déjà pris en compte dans AvhrrWgt. RadAnalNbClass(PN,SN) a été remplacé par IdefCcsNbClusMax pour la construction des pseudos-canaux AVHRR like. Il n'y a pas de problème car lorsqu'une classe est inexistante son poids est à 0. - Modification de la section « construction des paramètres d'entrée » de 59_SMA - Suppression cd Nharmonic de 23_SSD qui n'est pas utilisé - MaJ de la section 9 sur l'implémentation des algorithmes

 CNES CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 10 of : 502
---	---	--	---

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	16
2. DOCUMENTATION	18
2.1 DOCUMENTS APPLIQUES	18
2.2 DOCUMENTS DE REFERENCE	18
3. PRESENTATION GENERALE DE L'ALGORITHMIE DE IASI	21
3.1 SONDAGE ATMOSPHERIQUE	21
3.2 INTERFEROMETRE DE MICHELSON	23
3.2.1 Principe	23
3.2.2 Transformée de Fourier optique	25
3.2.3 Résolution spectrale et différence de marche maximum	27
3.2.4 Echantillonnage et Transformée de Fourier Discrète	30
3.3 ASPECTS PRATIQUES	31
3.3.1 Nécessité d'une calibration radiométrique	31
3.3.2 Méthode de calibration radiométrique	33
3.3.3 Principe de détermination du NZPD	35
3.4 DESCRIPTION SIMPLIFIEE DE L'INSTRUMENT	37
3.4.1 Géométrie des visées atmosphériques (sondeur et imageur)	37
3.4.2 Définition « simplifiée » du sondeur	38
3.4.3 Séquencement temporel des acquisitions	40
3.4.4 Décomposition de la bande utile en trois bandes B1, B2, B3	41
3.4.5 Télémessure scientifique	42
3.4.6 Mode Calibration externe	42
3.5 CARACTERISTIQUES SPECTRALES	44
3.5.1 Modèle élémentaire de l'interféromètre	44
3.5.2 Effet du champ de vue – notion d'axe interférométrique	45
3.5.3 Fonction de calibration spectrale	47
3.5.4 Méthode de calibration spectrale	47
3.6 APODISATION DES SPECTRES	49
3.6.1 Auto apodisation	50
3.6.2 Apodisation des spectres 1C	54
3.7 CALCUL DES FONCTIONS D'INSTRUMENT (ISRF)	56
3.7.1 Introduction : on ignore la dépendance de A avec ν	58
3.7.2 Prise en compte de la dépendance en ν de A	59
3.8 PLACE DE L'ALGORITHMIE DANS LE SYSTEME	59
4. TRAITEMENTS BORD	62
4.1 ARCHITECTURE GENERALE	62
4.2 RELATION AVEC LES ALGORITHMES SOL	63
4.3 PRETRAITEMENTS	64
4.3.1 Algorithme NLC ₂ « Correction des non linéarités »	64
4.3.2 Algorithme SPK ₃ « Détermination des Spikes »	67
4.4 DETERMINATION DU NZPD	67
4.5 CALCUL DES SPECTRES BRUTS	69
4.6 CALIBRATION RADIOMETRIQUE DES SPECTRES	69
4.7 ALGORITHME MRG ₁₄ « COMBINAISON DES BANDES »	71
4.8 ALGORITHME COD ₁₅ « CODAGE DES SPECTRES »	73

 CNES CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 11 of : 502
---	---	--	---

4.9 LIMITES DE BANDES SPECTRALES UTILISEES A BORD	74
5 ALGORITHMES IASI DU SEGMENT SOL EPS.....	76
5.1 ARCHITECTURE GENERALE DU TRAITEMENT SOL	76
5.2 RELATION AVEC LES ALGORITHMES D'INITIALISATION	77
5.3 CALIBRATION RADIOMETRIQUE DES IMAGES.....	78
5.4 REECHANTILLONNAGE DES SPECTRES	79
5.4.1 Suréchantillonnage par Transformée de Fourier (S0S ₂₂)	80
5.4.2 Rééchantillonnage du spectre (S1B ₃₅)	81
5.5 APODISATION DES SPECTRES (S1C ₃₇).....	81
5.6 INTERPOLATION DES FONCTIONS SPECTRALES	83
5.7 POSITION DE L'AXE INTERFEROMETRIQUE	84
5.7.1 Détermination des décalages spectraux (SSD ₂₃)	85
5.7.2 Position de l'axe interférométrique instantané (IAX ₂₅)	88
5.7.3 Filtrage de l'axe interférométrique (FAX ₂₅)	89
5.8 POST CALIBRATION RADIOMETRIQUE	89
5.8.1 Principe de l'algorithme SCR ₃₁	90
5.8.2 Principes des algorithmes SMC ₃₄ et SME ₃₃	91
5.8.3 Principe de l'algorithme HEC ₃₂	91
5.9 GEOLOCALISATION DES PRODUITS IASI	92
5.9.1 Introduction et principe	92
5.9.2 Référentiels utilisés.....	93
5.9.3 Coregistration imageur IASI / AVHRR (IAC ₄₀)	94
5.9.4 Analyse des RADiances AVHRR (CCS ₄₁)	96
5.9.5 calcul des angles de mesure	96
5.9.6 Interfaces avec le système EPS-CGS	97
5.9.7 Calculs de géolocalisation (GEO ₄₄)	99
5.10 ALGORITHMES DE « SURVEILLANCE »	99
5.10.1 Mise à jour des spectres d'énergie minimale et maximale (EXS ₁₀₀)	100
5.10.2 Détermination de la table des pixels morts (DPT ₁₁₀)	100
5.10.3 Surveillance de la calibration radiométrique complexe (MCX ₁₁₁)	100
6. ALGORITHMES D'INITIALISATION (TEC)	102
6.1 ARCHITECTURE GENERALE	102
6.2 INITIALISATION DES TABLES DE CODAGE (CTC ₅₀)	103
6.3 INITIALISATION DES LIMITES DE BANDES	105
6.3.1 Contraintes bord	106
6.3.2 Architecture des algorithmes	107
6.3.3 Estimation du bruit.....	109
6.3.4 Initialisation des limites de bandes	109
6.4 INITIALISATION DES FONCTIONS SPECTRALES.....	111
6.4.1 Architecture générale.....	111
6.4.2 Modele optique et geometrique du sondeur IASI	112
6.4.3 Détermination de l'offset du coin de cube (CCO ₅₇).....	119
6.4.4 Calcul des fonctions d'auto-apodisation	122
6.4.5 Fonctions d'instrument (SRF ₇₈).....	122
6.4.6 Fonctions de calibration spectrale (SDB ₇₄).....	123
6.4.7 Fonctions d'apodisation (CAF ₇₉)	123
6.5 INITIALISATION DES SPECTRES REDUITS.....	124
6.5.1 Introduction	124

 CNES CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 12 of : 502
---	---	--	---

6.5.2 Définition des fonctions d'erreur de phase	124
6.5.3 Initialisation du spectre réduit espace froid (RSC ₅₄)	125
6.5.4 Initialisation du spectre réduit corps noir (RSH ₅₅)	128
6.5.5 Détermination des fonctions d'erreur de phase (PEF ₆₀)	129
6.6 CARACTERISATION DE LA NON LINEARITE ANALOGIQUE (ATT₆₁)	129
6.6.1 Introduction	129
6.6.2 Artefacts spectraux	130
6.6.3 Méthode de caractérisation (ATT ₆₁)	132
6.7 MATRICE DE COVARIANCE DE BRUIT	133
6.7.1 Introduction	133
6.7.2 Estimation empirique	134
6.7.3 Représentation compressée de la matrice	134
6.8 INITIALISATION DES PHASES NATURELLES (WNP₅₈)	135
6.8.1 Description de l'algorithme	135
6.8.2 Choix de la fenêtre spectrale	136
6.9 COREGISTRATION SONDEUR-IMAGEUR IASI (ISC₁₀₉)	137
6.10 CALCUL D'UN MODELE ORBITAL (CMO₈₁)	138
7. ALGORITHMES DE LA CHAINE DE RECETTE SOL (GSE)	139
8. SURVEILLANCE DU FONCTIONNEMENT DE L'ALGORITHMIE	140
8.1 INTRODUCTION	140
8.2 SURVEILLANCE DES OBSERVABLES	141
8.2.1 surveillance du bruit radiometrique de l'instrument	141
8.2.2 evolution des Spectres reduits filtres	142
8.2.3 Surveillance du NZPD	142
8.2.4 Surveillance de l'homogénéité du NZPD interpixel	143
8.2.5 Surveillance de l'offset constant du coin de cube	143
8.2.6 Surveillance du retard des chaînes d'acquisition	144
8.2.7 Surveillance des fonctions d'erreur de phase	145
8.2.8 Surveillance des non-linéarités analogiques	145
8.2.9 surveillance de la calibration radiometrique complexe	146
8.2.10 surveillance des coefficients de calibration radiométrique	146
8.2.11 Surveillance de la table des pixels morts de l'IAS	147
8.2.12 Surveillance de la coregistration Imageur-AVHRR	147
8.2.13 surveillance de la coregistration sondeur-imageur	147
8.2.14 surveillance des seuils de detection de spike	148
8.2.15 Surveillance de la calibration spectrale	148
8.2.16 Surveillance de la position de l'axe interférométrique	149
8.2.17 Surveillance des tables de codage et spectres extremes	149
8.2.18 qualite des interferogrammes de verification	149
8.2.19 Spectre espace froid	149
8.2.20 interferogrammes des visées de calibration	150
8.2.21 Contraste interférométrique	150
8.3 INDICES DE QUALITE SYSTEME (QIS₄₅)	151
8.4 INDICATEURS D'ERREURS (FLAGS)	151
9. REPERTOIRE DES ALGORITHMES	154
9.1 ALGORITHMES BORD	154
9.2 ALGORITHMES DU TRAITEMENT SOL	155
9.3 ALGORITHMES D'INITIALISATION	156

9.4 ALGORITHMES DE SURVEILLANCE..... 157

ANNEXE 1 – ALGORITHMES DU TRAITEMENT BORD	160
ANNEXE 2 – ALGORITHMES DU TRAITEMENT SOL.....	193
ANNEXE 3– ALGORITHMES D’INITIALISATION.....	281
ANNEXE 4 – ALGORITHMES DE SURVEILLANCE	364
ANNEXE 5 – TRANSFORMEE DE FOURIER ET FFT.....	391
ANNEXE 6 – MODELE ANALYTIQUE SIMPLIFIE DE L’INSTRUMENT IASI : INTERFEROMETRE HORS AXE.....	401
ANNEXE 7 – OPERATEURS DE LA BIBLIOTHEQUE.....	409
ANNEXE 8 – DICTIONNAIRE DES DONNEES.....	420
ANNEXE 9 – ENTREES / SORTIES DES ALGORITHMES	453

GLOSSAIRE

A(x,v)	Fonction d'auto-apodisation
Af(v)	Fonction d'apodisation
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
B1/B2/B3	Les 3 bandes spectrales de mesure
BB	Black Body (Visées de calibration sur le corps noir interne)
C ₁ , C ₂	Sommets des coins de cube
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CAU	Cold Acquisition Unit
CBS	Cold Box Subsystem
CC	Cube Corner
CCD	Cube Corner Direction (indicateur de direction)
CGS	Core Ground Segment
CS	Cold Space (Visée de calibration espace froid : CS ₁ et CS ₂)
DFT	Discrete Fourier Transform
DPS	Data Processing Subsystem
EPS	European Polar System
EW	Earth View (Visée atmosphérique)
FCS	Fonction de Calibration Spectrale
FFT	Fast Fourier Transform
GSE	Ground Support Equipment
IASI	Infrared Atmospheric Sounder Interferometer
IIS	Integrated Imager Subsystem
ILS	Instrument Line Shape
ISRF	Instrument Spectral Response Function
ISRF-EM	ISRF Estimation Model
LN	Line Number
MAS	Main Acquisition Subsystem
METOP	METeological OPERational satellite
NZPD	Sample Number of Zero Path Difference : numéro de l'échantillon le plus proche du ZPD
OPS	Operationnal Software

SCAN	Miroir de balayage (ou SCS)
SCS	Scanning Subsystem
SN	Scan Number
SP	Scan Position
TEC	Technical Expertise Centre
TF	Transformée de Fourier
ZPD	Zero Path Difference : différence de marche nulle

1. INTRODUCTION

Ce document décrit et spécifie les méthodes de calcul (ou algorithmes) qui sont nécessaires à l'élaboration des produits de niveau 1 du système IASI. Il constitue le document chapeau du dossier de définition des algorithmes qui comprend aussi les documents [DR2], [DR3] et [DR4].

Depuis le début du projet, l'équipe scientifique a produit un grand nombre de notes. Le présent document est essentiellement une synthèse d'une partie de ces notes. Le chapitre 2 liste ces références ainsi que les documents appliqués et renvoie à quelques références utiles dans la littérature ouverte.

Le chapitre 3 est un chapitre explicatif qui fournit une introduction générale à l'algorithmie employée dans le système IASI. Il définit les principaux concepts nécessaires à la compréhension, fixe les notations et le vocabulaire et enfin liste les raisons pour lesquelles tel ou tel algorithme a dû être introduit. On peut aussi le lire comme une introduction générale aux principes de fonctionnement de l'instrument.

Les chapitres 4, 5, 6 et 7 fournissent une explication plus détaillée mais informelle des différents algorithmes employés. Ils constituent une introduction destinée à faciliter la lecture des fiches descriptives qui sont fournies dans les annexes 1, 2, 3 et 4. Les relations entre les différents algorithmes, les principes de calcul employés et de façon générale ce que les algorithmes calculent sont décrits. Par opposition, les fiches descriptives décrivent, avec tous les détails nécessaires, comment les calculs sont réalisés. Les chapitres 4, 5, 6 et 7 ne sont pas spécificatoires. En cas d'incohérence avec la fiche descriptive des algorithmes c'est celle-ci qui fait foi.

Le chapitre 8 décrit les surveillances à implémenter pour s'assurer du bon fonctionnement de l'algorithmie décrite dans ce document et de la performance système globale. Les cas d'erreur sont référencés et les indicateurs de qualité des produits sont décrits.

Le chapitre 9 liste l'ensemble des algorithmes répertoriés.

Note : Les algorithmes décrits dans ce document sont conçus pour fonctionner sur des données issues de spectres étendus (corps noirs ou spectres atmosphériques.) Certains de ceux-ci (NZPD, calibration spectrale, etc.) sont connus pour ne pas fonctionner lorsqu'on les applique à des données issues de raies monochromatiques.

Les annexes constituent une part importante de ce document à la fois en volume et en contenu.

Les annexes 1, 2, 3 et 4 contiennent l'ensemble des fiches descriptives des algorithmes. Elles sont tirées du document [DR9].

L'annexe 8 répertorie l'ensemble des données gérées par l'algorithmie. Il s'agit d'une table donnant les caractéristiques de chacune des données (valeur lorsqu'elle est connue, unité, dimensions, plage de variation, etc.). Cette table est considérée comme quasiment complète à ce stade du projet. Des modifications légères sont toutefois à considérer compte tenu de l'avancement de l'instrument (essais de caractérisation sol finalisés en 2002/2003).

L'annexe 9 fait le lien entre ce dictionnaire de données et les algorithmes.

D'autre part, une base de données des algorithmes [DR39] est maintenant disponible, qui permet d'avoir beaucoup plus facilement une vue dynamique de ces données et de leurs relations avec les algorithmes décrits dans ce document.

L'annexe 5 définit la convention que nous employons pour définir la Transformée de Fourier ainsi que ses principales propriétés. Les relations entre TF et FFT, qui peuvent sembler subtiles au premier abord, y sont détaillées.

			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 17 of : 502
---	---	--	---

L'annexe 6 fournit deux modèles analytiques simplifiés qui permettent une compréhension plus profonde du fonctionnement de l'instrument. L'un, classique et connu de longue date, fait l'hypothèse d'un pixel circulaire centré, l'autre publié récemment [DR28] utilise toujours un pixel circulaire (comme celui de IASI) mais ce pixel est excentré. Il m'a semblé utile, sinon nécessaire, d'introduire de tels modèles dans ce document pour deux raisons. La première est de permettre à un lecteur non initié aux arcanes de la spectroscopie par Transformée de Fourier¹ de tester sa compréhension du sujet sur un exemple "concret" avant de passer à une implémentation informatique. La deuxième est de fournir un moyen permettant de générer de façon contrôlée des cas tests de premier niveau pour la validation du segment sol.

L'annexe 7 enfin décrit les opérateurs de la bibliothèque mathématique de base qui sont employés dans les fiches descriptives des algorithmes.

¹ Comme il ne manquera pas de s'en trouver avec la montée en puissance du projet segment sol.

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 18 of : 502
---	---	--	---

2. DOCUMENTATION

2.1 DOCUMENTS APPLIQUES

- DA1 IA-SM-0000-10-CNE/EUM
Mission rationale and requirements
- DA2 IA-SP-0000-11-CNE
System specification

2.2 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- DR1 IA-TN-0000-5805-CNE, Issue 2
Dossier de synthèse de l'algorithme du système IASI
- DR2 IA-SP-1000-5758-CNE, Issue 2
Requirements for on-board algorithms
- DR3 IA-SP-1000-5971-CNE, Issue 1
Spécification des algorithmes des moyens sol (instrument)
- DR4 IA-SB-2100-9462-CNE
Spécification Technique de Besoin des algorithmes du logiciel opérationnel IASI
- DR5 IA-DF-0000-5803-CNE, Issue 1
Définition de l'architecture du système IASI
- DR6 IA-ID-1000/2000-212-CNE, Issue 5, Rev 1
Measurement data interface specification
- DR7 IA-ID-1000/2000-216-CNE, Issue 5
Verification data specification
- DR8 IA-TN-0000-5482-CNE
Data Processing algorithms in IASI on-board and ground segment
- DR9 IA-DF-0000-5775-CNE (Iss. 3)
Fiches descriptives des algorithmes du système IASI
- DR10 IA-DF-0000-6005-CNE
Fiches descriptives des enchaînements des algorithmes du système IASI
- DR11 IA-TN-1000-6353-AER
Dossier de synthèse de l'instrument
- DR12 IA-TN-0000-5918-CNE
Calibration radiométrique des spectres complexes de IASI
Application aux mesures de la maquette
- DR13 IA-TN-1000-5464-CNE
NZPD Determination by software

 CNES CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 19 of : 502
---	---	--	---

- DR14 IA-TN-1000-5886-CNE
 Algorithme de détermination du NZPD des interférogrammes de IASI
 Application aux mesures de la maquette
- DR15 IA-TN-0000-5874-CNE
 Initialisation de l'algorithme de détermination du NZPD de IASI
 Application aux mesures de la maquette
- DR16 IA-TN-0000-5765-CNE
 Codage des spectres IASI et bilan de transmission
- DR17 IA-TN-0000-5685-CNE
 « Spikes » determination algorithm
- DR18 IA-TN-0000-5390-CNE
 Calibration spectrale des mesures de IASI
- DR19 IA-TN-0000-5885-CNE
 Calibration spectrale des mesures de IASI – Complément d'étude
- DR20 IA-TN-1210-5084-CNE
 Self apodization and spectral response functions model – Application to IASI
 interferometer
- DR21 IA-TN-0000-5895-CNE
 Calibration spectrale des spectres IASI. Initialisation de l'algorithme de calcul des
 décalages spectraux. Validation sur les interférogrammes de la maquette de IASI.
- DR22 IA-TN-0000-5919-CNE
 Calibration spectrale des spectres IASI. Algorithme de détermination de l'axe
 interférométrique.
 Validation sur les interférogrammes de la maquette de IASI
- DR23 IA-SP-1520-227-AER
 Data Processing Subsystem specification
- DR24 IA-TN-0000-5376-CNE
 Trade-off bord/sol pour les données scientifiques
- DR25 IA-TN-0000-7614-DIV
 Détermination de la non-linéarité des chaînes IASI
- DR26 SP-BOM-105/97 Iss. 3 Rev. A
 Technical note on Non-Linearity Characterization and Correction – Detailed Analysis
 of IASI algorithms
- DR27 IA-TN-0000-5799-CNE
 IASI data processing : validation of CNES described algorithms
- DR28 Instrument Line Shape of Fourier Transform Spectrometers : analytic solutions for non
 uniformly illuminated off-axis detectors. Jérôme Genest et Pierre Tremblay.
 App. Optics, Vol. 38, N. 25, 1 Septembre 1999.

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 20 of : 502
---	---	--	---

DR29	IA-TN-1000-5744-CNE Perturbation lunaire de la calibration de IASI
DR30	IA-SP-1000-201-CNE Instrument specification
DR31	IA-TN-0000P-5053-CNE IASI Modèle Numérique de Performance
DR32	Fourier Transform Infrared Spectrometry Peter R. Griffiths & James A de Haseth, Ed. JOHN WILEY & SONS (1986)
DR33	Numerical Recipes in C (Second Edition) Ed. Cambridge University Press (1994)
DR34	IA-TN-0000-5715-CNE Iss.1 du 27 / 1 / 97 Détermination d'un offset constant du mouvement du coin de cube
DR35	IA-TN-0000-5807-CNE Iss.1 du 18 / 6 / 97 Erreur sur la détermination des offsets constants du coin de cube
DR36	IA-TN-1270-5955-CNE du 6 / 7 / 98 Propriété de la configuration à lame compensatrice déportée
DR37	IA-TN-0000-2193-NOV du 31/8/00 Méthodologie d'extraction et d'analyse des covariances d'erreur de spectres mesurés à partir de la maquette IASI
DR38	EPS/SYS/SPE/990002 EPS Mission Conventions Document
DR39	IA-TN-0000-2306-NOV BD Algo IASI : Rapport technique – Manuel utilisateur
DR40	IA-SP-2200-2033-CNE Exigences fonctionnelles du Centre d'Expertise Technique
DR41	IA-TN-0000-2091-CNE Quality Indices inside IASI Level 1 Data
DR42	IA-ID-1000-6477-AER IASI Measurement and Verification Data
DR43	IA-TN-0000-2362-CNE Recette en vol de IASI – Liste préliminaire d'activités à prévoir à la TEC
DR44	IA-TN-1000--CNE Réglage chaîne de détection instrument IASI
DR45	IA-TN-1000-2672-CNE IASI PFM Optical Vacuum Test Results — Contrast evaluation
DR46	IA-TN-2100-9513-CNE OPS Configuration files and database format specification

3. PRESENTATION GENERALE DE L'ALGORITHMIE DE IASI

Ce chapitre se veut didactique afin de rendre le présent document auto suffisant. Il présente la mission et l'instrument IASI d'une manière simplificatrice mais avec un niveau de détail suffisant pour motiver l'introduction des algorithmes et pour comprendre le vocabulaire utilisé dans les fiches de description des algorithmes.

Pour une présentation plus précise et détaillée de l'instrument IASI on se reportera à la documentation correspondante (voir par exemple [DR11]).

3.1 SONDAGE ATMOSPHERIQUE

L'objectif du système IASI est de fournir des profils verticaux de température et d'humidité de l'atmosphère pour satisfaire les besoins de prévision des services de météorologie. IASI produit aussi des mesures de concentrations de certains gaz trace (CO_2 , H_2O , O_3 , N_2O , CO et CH_4) qui influencent directement le climat mondial [DA1].

Pour ce faire, l'instrument IASI réalise depuis l'espace² une mesure du spectre infrarouge³ émis par le système terre atmosphère. Les traitements scientifiques permettent d'extraire de cette mesure les profils verticaux recherchés par une technique dite d'inversion. On peut tenter d'expliquer cette méthode de manière très simplifiée sur l'exemple de la température.

Une couche atmosphérique de température T est supposée rayonner comme un corps noir. C'est-à-dire que son spectre d'émission est donné par la loi de Planck. On se reportera à la figure 3.1 qui représente le spectre de luminance énergétique⁴ de quatre sources de température 220, 250, 280 et 310K.

On observe sur cette figure que le flux de puissance rayonné croît fortement avec la température. Le nombre d'ondes du maximum d'émission augmente dans le même temps mais dans une moindre mesure. Ce sont ces 2 effets qui permettent de mesurer la température d'un corps à partir de l'analyse de son émission infrarouge.

² depuis une altitude d'environ 800 km

³ longueurs d'ondes de 3.6 à 15.5 μm , soit 645 à 2760 cm^{-1} en nombre d'ondes

⁴ puissance lumineuse émise par une source, par unité d'angle solide et par unité de surface, dans une bande spectrale de 1 cm^{-1} et à un nombre d'ondes donné (en $\text{W} / \text{m}^2 \text{sr cm}^{-1}$)

Fonction de Planck

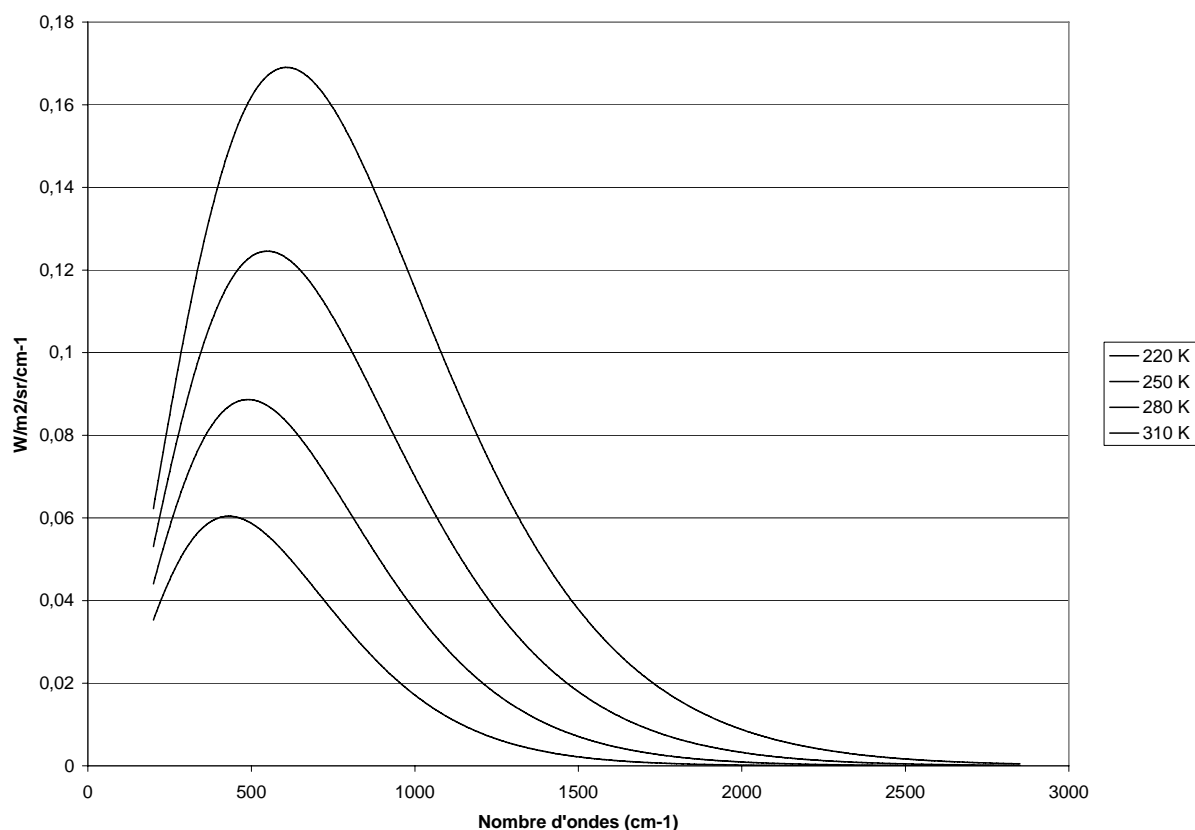


Figure 3.1 – Loi de Planck

Pour comprendre comment on peut remonter à la température des différentes couches atmosphériques, il faut faire intervenir l'absorption de l'atmosphère. Cette dernière n'est « transparente » pour le rayonnement infrarouge que dans quelques fenêtres spectrales.

Si la couche est située près du sol, le rayonnement émis va traverser une épaisseur importante d'atmosphère avant de parvenir à l'instrument. L'énergie qui sera détectée dans les bandes fortement absorbées sera donc extrêmement faible. En d'autres termes, dans ces bandes, l'instrument « verra » uniquement de l'énergie en provenance des couches d'altitude élevée. Si la quantité d'énergie reçue est mesurée de façon précise (bonne calibration radiométrique absolue) alors on peut remonter, par la loi de Planck, à la température de la couche supérieure. En utilisant le spectre mesuré dans une autre bande et en soustrayant de cette mesure la contribution de la couche supérieure⁵, on peut par la même méthode remonter à la température de la couche immédiatement inférieure. De proche en proche on obtient ainsi le profil vertical de température.

En réalité, les choses sont moins simples et il faut employer une technique un peu plus compliquée. Elle repose sur l'utilisation d'un modèle de transfert radiatif, modèle numérique prédisant le spectre mesuré en fonction de paramètres qui sont notamment, la température à différents niveaux de l'atmosphère et les

⁵ connue puisque sa température a été déterminée à l'étape précédente

concentrations en gaz mineurs (CO_2 , H_2O , O_3 , N_2O , CO et CH_4). Le spectre prédit pour une certaine valeur des paramètres d'entrée est alors comparé avec le spectre mesuré. Les corrections à apporter sur les paramètres d'entrée sont déduites des différences observées entre les 2 spectres. Ce processus est alors répété jusqu'à ce que les différences entre la prédiction et la mesure soient jugées acceptables. Les valeurs que prennent les entrées du modèle en fin de processus constituent alors les « mesures » de température, humidité, ... qu'on cherchait à obtenir.

Note : le modèle de transfert radiatif est un modèle de bout en bout qui fait intervenir les caractéristiques de l'atmosphère mais aussi celles de l'instrument de mesure. Ces dernières sont données par un modèle de l'instrument qui est déterminé par l'algorithmie décrite dans ce document.

Les mesures de concentration des différents gaz trace sont fournies par la profondeur des raies d'absorption. La détermination de ces raies impose les spécifications de résolution et de calibration spectrale de l'instrument.

La description précédente a montré comment des mesures de spectres atmosphériques permettent de remplir la mission affectée à IASI. Passons maintenant à la méthode d'obtention de ces spectres qui sont le résultat du traitement d'interférogrammes produits par un interféromètre de Michelson.

3.2 INTERFEROMETRE DE MICHELSON

3.2.1 PRINCIPE

Le schéma de principe d'un interféromètre de Michelson est présenté sur la figure 3.2 ci-dessous.

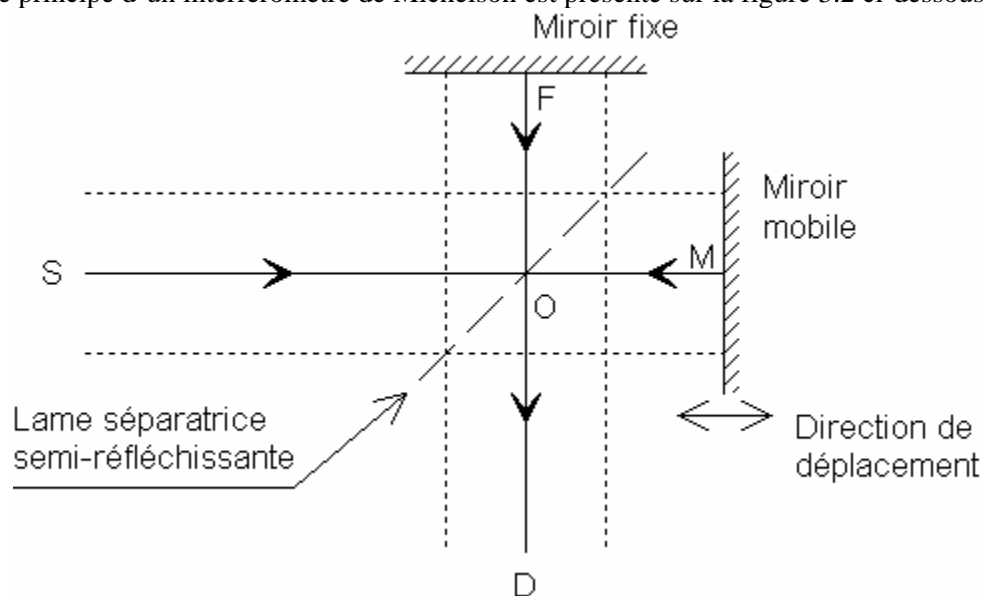


Figure 3.2 – Schéma de principe de l'interféromètre de Michelson

Il s'agit d'un dispositif optique qui

- sépare un flux lumineux provenant d'une source S en deux parties égales (à la traversée de la lame séparatrice la moitié du flux lumineux est dirigé vers le miroir fixe F, l'autre moitié traverse en direction du miroir mobile M),
- introduit une différence de marche entre les deux bras (par déplacement du miroir mobile M),

- recombine les 2 flux provenant des deux bras⁶ (à nouveau la lame séparatrice),
- pour observer les interférences qui en résultent (détecteur D).

Pour comprendre le principe de fonctionnement de cet appareil, considérons l'exemple idéalisé d'une onde plane monochromatique de longueur d'onde λ . On note dans toute la suite ν le nombre d'ondes associé.

$$\nu = 1/\lambda \quad (1)$$

Dans cet exemple on suppose de plus la lame séparatrice parfaite. C'est-à-dire qu'elle possède un coefficient d'absorption strictement nul et que la séparation se fait de façon parfaitement égale entre les deux voies. Pour cet instrument parfait, la différence de marche x qui existe entre les ondes arrivant sur le détecteur D est, avec les notations de la figure 3.2,

$$x = 2(OM - OF) \quad (2)$$

On voit aisément que si x est un multiple entier de λ alors les deux ondes arrivent en phase sur le détecteur. Elles interfèrent constructivement et on mesure une intensité maximum sur le détecteur D. Au contraire si x est un multiple impair de $\lambda/2$ alors les deux ondes arrivent en opposition de phase sur le détecteur et l'intensité mesurée est parfaitement nulle.

Plus précisément, si α est l'amplitude de l'onde émise par S, le détecteur voit la somme de deux ondes

$$\frac{\alpha}{4} \cos(\omega t) + \frac{\alpha}{4} \cos(\omega(t - x/c)) \quad \text{avec } \omega = 2\pi c / \lambda = 2\pi \nu c$$

Ce qui peut, après quelques manipulations algébriques simples, se mettre sous la forme

$$\frac{\alpha}{2} \cos(\omega x / 2c) \cos(\omega(t - x / 2c))$$

On observe donc sur le détecteur une radiation de même longueur d'onde que celle émise par la source S mais dont l'intensité I (proportionnelle au carré de l'amplitude) dépend de la différence de marche x .

$$I(x) = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 \cos^2(\pi \nu x) = \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 (1 + \cos 2\pi \nu x) \quad (3)$$



Si le miroir mobile M se déplace à une vitesse constante V comme c'est le cas de l'instrument IASI, on voit que l'intensité détectée est modulée avec une fréquence

$$f = 2V\nu \quad (4)$$

qui dépend du nombre d'onde de la radiation incidente. Si V est connue, on peut donc déduire ν de la mesure de la fréquence électrique f par la formule (4).

⁶ Cette description ainsi que la figure 3.2 ont été volontairement très simplifiées. En particulier, il faut bien se rendre compte qu'environ la moitié du flux incident est renvoyé vers la source S.

3.2.2 TRANSFORMÉE DE FOURIER OPTIQUE

Dans la réalité la source n'est pas monochromatique : elle émet un spectre continu d'énergie dans une certaine bande de fréquence (voir la figure 3.3 qui représente un spectre atmosphérique typique). Pour les besoins de l'exposé on peut considérer que la radiation reçue au niveau de l'instrument est constituée de la superposition d'une infinité d'ondes monochromatiques dont l'amplitude est définie par le spectre d'émission de la source $B(\nu)$.

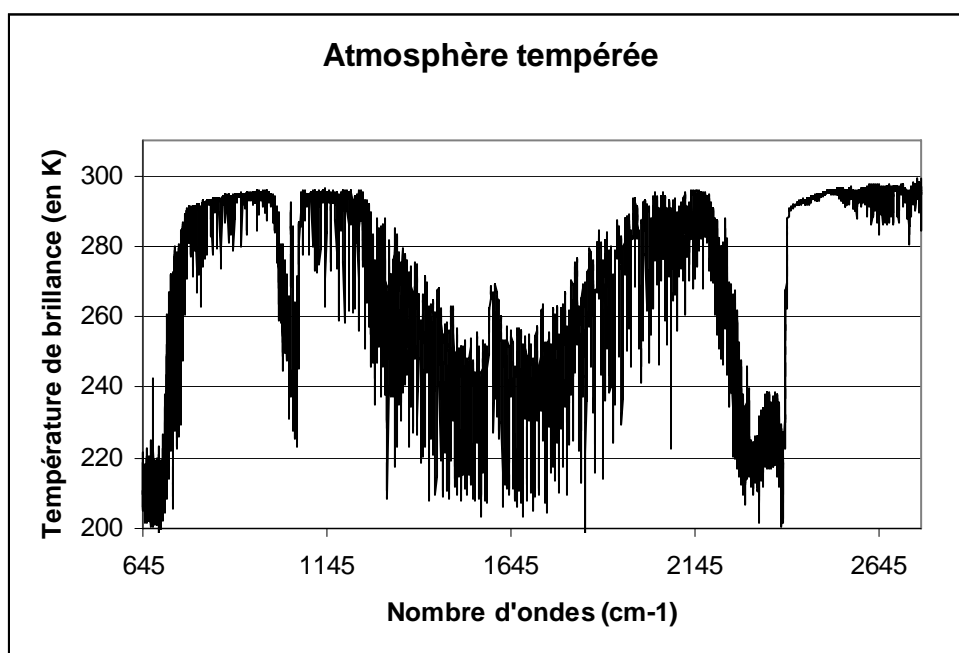


Figure 3.3 – Spectre atmosphérique typique

L'interférogramme mesuré est alors la somme des interférogrammes résultant de chacune de ces ondes élémentaires, soit d'après la formule (3)

$$I(x) = \frac{1}{4} \int_0^{\infty} B(\nu)(1 + \cos(2\pi\nu x))d\nu$$

La figure 3.4 ci-dessous représente la partie centrale de l'interférogramme d'un spectre atmosphérique typique. (mesuré dans la bande 3).

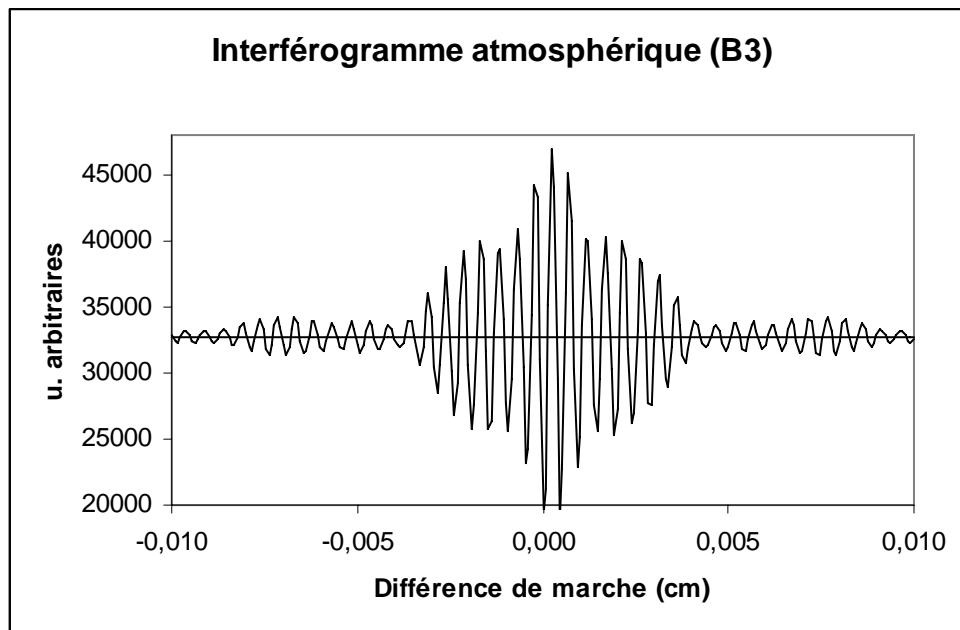


Figure 3.4 – Interférogramme typique (zone centrale)

Seule la partie modulée de l'interférogramme (partie dépendant de x) est intéressante pour la spectroscopie. On ne tient donc pas compte de la valeur moyenne et on définit généralement l'interférogramme par⁷

$$I(x) = \int_0^{\infty} B(\nu) \cos(2\pi\nu x) d\nu \quad (5)$$

Etant donné que la *Transformée de Fourier* (TF) d'une fonction B s'écrit

$$TF(B) : x \mapsto \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) e^{-2i\pi\nu x} d\nu = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu) (\cos(2\pi\nu x) - i \sin(2\pi\nu x)) d\nu \quad (6)$$

La formule (5) montre que I peut être considéré comme la partie réelle de $TF(B)$. On étend pour cela la définition du spectre B aux nombres d'ondes négatifs⁸ pour en faire une fonction paire. L'interféromètre de Michelson réalise donc une transformée de Fourier optique du spectre.

L'intérêt de cette notion est évidemment que la transformée de Fourier est inversible

$$TF^{-1}(I) : \nu \mapsto B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) e^{2i\pi\nu x} dx \quad (7)$$

D'autre part, il existe des moyens efficaces d'effectuer les calculs qui fournissent le spectre à partir de l'interférogramme mesuré (algorithmes de *Transformée de Fourier Rapide* ou FFT).

⁷ en ignorant les facteurs constants qui de toute façon sont éliminés par la calibration radiométrique (voir §3.3)

⁸ cette présentation (symétrisation du spectre) est classique mais n'est pas absolument nécessaire

Note : Pour faire le parallèle avec les présentations classiques de la Transformée de Fourier qui traitent du cas de signaux temporels on voit que x joue le rôle du temps t et ν joue le rôle de la fréquence f .

Remarque : On voit que l'on passe de $B(\nu)$ à $I(x)$ par une Transformée de Fourier directe et de $I(x)$ à $B(\nu)$ par une Transformée de Fourier inverse. Cette règle peut être généralisée à toutes les fonctions.

Règle : On applique la TF aux fonctions de ν et la TF^{-1} aux fonctions de x .

Cette règle est suivie sans exception dans tout ce document (texte et fiches descriptives des algorithmes). Tout manquement à cette règle est une erreur qui doit être signalée⁹.

3.2.3 RESOLUTION SPECTRALE ET DIFFERENCE DE MARCHE MAXIMUM

La formule (7) du paragraphe précédent montre qu'en théorie, on pourrait mesurer la totalité du spectre (nombres d'ondes allant de 0 à l'infini et résolution infiniment grande). Il faudrait pour cela que le miroir mobile ait une course infinie.

Dans un instrument réel les différences de marche possibles sont limitées

$$-\Delta \leq x < \Delta$$

Le spectre ne peut donc être calculé que par une approximation de la formule (7)

$$\tilde{B}(\nu) = \int_{-\Delta}^{\Delta} I(x) e^{2i\pi\nu x} dx \quad (8)$$

Si on applique cette formule avec l'interférogramme théorique d'une onde monochromatique ν_0 qui a été calculé au §3.1, on obtient

$$I(x) = B(\nu_0) \cos(2\pi\nu_0 x)$$

$$\tilde{B}(\nu) = B(\nu_0) \int_{-\Delta}^{\Delta} \cos(2\pi\nu_0 x) e^{2i\pi\nu x} dx$$

Tous calculs faits on a

$$\tilde{B}(\nu) = B(\nu_0) \Delta \left[\frac{\sin(2\pi(\nu - \nu_0)\Delta)}{2\pi(\nu - \nu_0)\Delta} + \frac{\sin(2\pi(\nu + \nu_0)\Delta)}{2\pi(\nu + \nu_0)\Delta} \right]$$

La figure 3.5 ci-après montre l'allure de la fonction sinus cardinal : $\text{sinc}(2\pi\nu\Delta) = \frac{\sin(2\pi\nu\Delta)}{2\pi\nu\Delta}$ pour un interféromètre théorique de différence de marche maximum égale à 2 centimètres.

⁹ Le non-respect de cette règle peut être la cause d'erreurs subtiles qui peuvent être difficiles à détecter au niveau système (remplacement de fonctions par leur image miroir). Le lecteur peut se reporter à l'annexe 5.

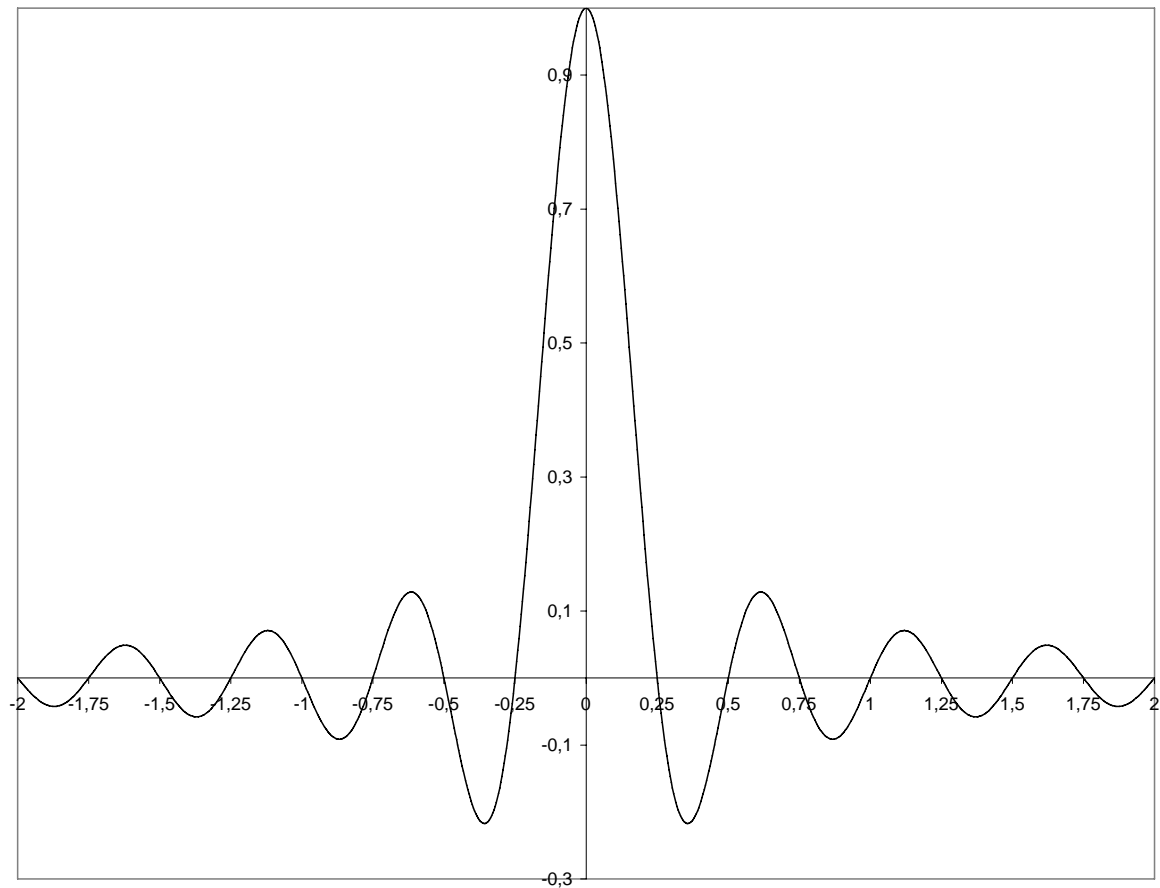


Figure 3.5 — Fonction sinus cardinal

Cette courbe montre¹⁰ que la course limitée du miroir mobile a pour effet direct d'élargir le spectre de la raie initiale ν_0 puisque la largeur au pied de la raie restituée est égale à $1/\Delta$. Elle permet de se faire une idée approximative de la résolution spectrale de l'instrument. On voit que si le spectre d'entrée est composé de deux raies distantes de Δ^{-1} , le calcul du spectre mesuré $\tilde{B}(\nu)$ fera apparaître distinctement les 2 raies (voir la figure 3.6a). En revanche si ces raies se rapprochent progressivement les 2 pics vont se confondre (voir la figure 3.6b qui est tracée pour deux raies distantes de $0.7 \Delta^{-1}$).

La résolution pratique de l'instrument est donc un peu meilleure que la valeur Δ^{-1} citée ci-dessus. Pour IASI, Δ vaut environ 2 cm et la résolution spectrale est donc meilleure que 0.5 cm^{-1} .

¹⁰ On voit que si on s'intéresse aux fréquences positives et si $\nu_0 \gg 1/\Delta$ on peut ignorer le deuxième terme de la somme qui n'est significatif que pour les nombres d'onde négatifs

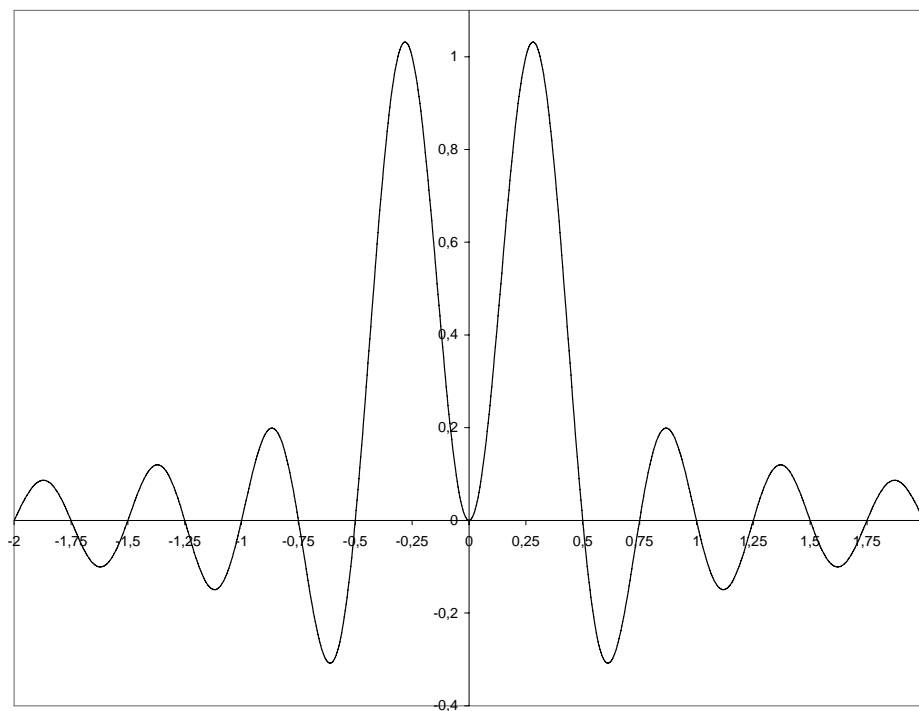


Figure 3.6a — Réponse de l'instrument à deux raies distantes de Δ^{-1}

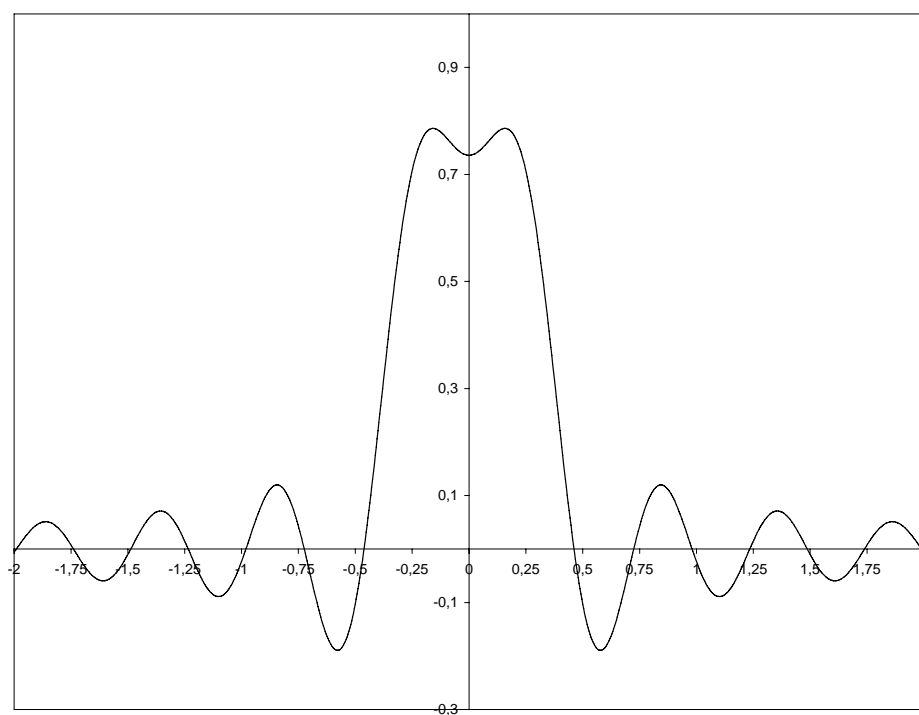


Figure 3.6b — Réponse de l'instrument à deux raies distantes de $0.7 \Delta^{-1}$

Un deuxième facteur important joue sur la résolution spectrale de l'instrument : il s'agit de l'apodisation. On réalise une apodisation en multipliant les valeurs de l'interférogramme par une fonction de poids¹¹ avant d'en faire la transformée de Fourier. Le but est de faire disparaître les pieds de la fonction sinus cardinal qui peuvent masquer une raie de faible amplitude qui se trouverait à proximité d'une autre raie plus intense. Ceci se paie par une détérioration de la résolution spectrale (élargissement de la raie mesurée). On se reportera à la section 3.6 pour un traitement plus complet de ces aspects.

3.2.4 ECHANTILLONNAGE ET TRANSFORMEE DE FOURIER DISCRETE

Dans un instrument réel, l'interférogramme n'est mesuré que pour N valeurs équidistantes de la différence de marche. Le pas d'échantillonnage est $\frac{2\Delta}{N}$. Les valeurs de la différence de marche aux instants d'échantillonnage sont données par la relation

$$x_m = \frac{2m\Delta}{N}, \quad \text{pour } m = -N/2, \dots, N/2 - 1 \quad (9a)$$

Les valeurs de la TF peuvent alors être calculées pour N nombres d'onde particuliers

$$\nu_n = \frac{n}{2\Delta}, \quad \text{pour } n = -N/2, \dots, N/2 - 1 \quad (9b)$$

avec un pas d'échantillonnage qui est légèrement inférieur à la résolution théorique de l'instrument.

On obtient alors une valeur approximative de l'intégrale (8) par une somme finie

$$B(\nu_n) = \left(\sum_{m=-N/2}^{N/2-1} I(x_m) e^{2i\pi\nu_n x_m} \right) \frac{2\Delta}{N}$$

Et en tenant compte du fait que $\nu_n x_m = \frac{nm}{N}$, on peut écrire

$$B(\nu_n) = 2\Delta \hat{I}_n$$

où on a fait intervenir le vecteur \hat{I}_n la Transformée de Fourier Discrète inverse¹² du vecteur I_m .

$$\hat{I}_n = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} I_m e^{\frac{2i\pi}{N} nm} \quad (9c)$$

Les algorithmes de Transformée de Fourier Rapide (ou FFT) sont des méthodes de calcul rapide de ces DFT.

Application IASI

¹¹ fonction de x qui tend vers 0 lorsque x tend vers +/- Δ

¹² L'annexe 5 fournit un rappel mathématique sur ces notions

$N=51200$ $D=2$ cm on a donc $|\nu_n| \leq 6400$ cm⁻¹

L'instrument a pour vocation de mesurer des spectres entre 645 et 2760 cm⁻¹. On voit que l'interférogramme de IASI est largement sur échantillonné (d'un facteur supérieur à 2) par rapport au critère de Nyquist.

Analyse des formules (9a) et (9b)

Sans anticiper sur la suite de la description de l'algorithmie, il est intéressant de se pencher dès maintenant sur ce qui se passe lorsqu'on fait varier le nombre de points utilisé dans le calcul des TF (voir aussi l'annexe 5).

Cas 1 : Spectres réduits (calculés à partir d'interférogrammes tronqués)

Si on utilise seulement les $N' < N$ points centraux de l'interférogramme, on va bien sûr réduire la durée nécessaire aux différents calculs. Cela se fera sans modifier la bande couverte (les valeurs maximum prises par ν restent inchangées). En revanche la discrétisation du spectre sera réalisée avec un échantillonnage plus espacé.

Cas 2 : Sur échantillonnage du spectre (réalise une interpolation non linéaire)

Au contraire, on peut augmenter artificiellement le nombre de points de l'interférogramme en ajoutant des zéros¹³ correspondant aux positions $|x_m| > \Delta$ pour lesquelles on n'a pas de mesure. Cela aura pour effet d'augmenter le nombre de points où le spectre est calculé, mais toujours sans modifier la bande couverte par l'instrument. Comme on n'a pas modifié l'amplitude Δ du déplacement du miroir mobile, la résolution physique de l'instrument n'a évidemment pas été modifiée. Cette technique permet simplement de réaliser une interpolation du spectre (ajout de points calculés entre les points effectivement mesurés).

3.3 ASPECTS PRATIQUES

Le chapitre précédent a fourni une description théorique simple des principes de fonctionnement du sondeur IASI. On aborde ici un certain nombre de problèmes pratiques qui entraînent « quelques complications » dans la définition de l'instrument et le traitement des données.

3.3.1 NECESSITE D'UNE CALIBRATION RADIOMETRIQUE

Le § 3.1 a montré la nécessité d'une bonne mesure absolue du flux d'énergie reçu par l'instrument dans chaque canal pour pouvoir remonter au profil vertical de température de l'atmosphère.

Cette mesure est très dépendante de la connaissance de diverses caractéristiques de l'instrument : transmission des optiques, sensibilité des détecteurs, etc. Ces paramètres sont caractérisés au sol. Mais, outre que leur mesure n'est pas d'une précision absolue, ils sont susceptibles de varier fortement en vol (vieillessement). Il est donc nécessaire de disposer d'un mécanisme qui permette de s'affranchir de ces variations.

Ce mécanisme repose sur la mesure en vol de 2 sources (une froide et une chaude) dont les spectres sont supposés parfaitement connus (corps noirs) et dont les températures encadrent celle de l'atmosphère. Si l'instrument est linéaire, une interpolation entre ces 2 spectres, par un moyen qui va être décrit dans la suite de cette section, fournit alors le flux d'énergie de chaque spectre atmosphérique.

¹³ Zero Padding en anglais

Avant de rentrer dans cette méthode d'interpolation, il faut tout d'abord introduire d'autres types de défauts qui vont être corrigés par la calibration radiométrique : il s'agit des dissymétries de l'interférogramme.

En théorie, l'interférogramme devrait être parfaitement symétrique ($I(x)=I(-x)$). Sa TF devrait donc être une fonction réelle. En effet, la TF d'une fonction réelle paire est une fonction réelle paire (voir par exemple l'annexe 5 de ce document¹⁴).

En pratique, cette relation n'est que très imparfaitement vérifiée pour de nombreuses raisons.

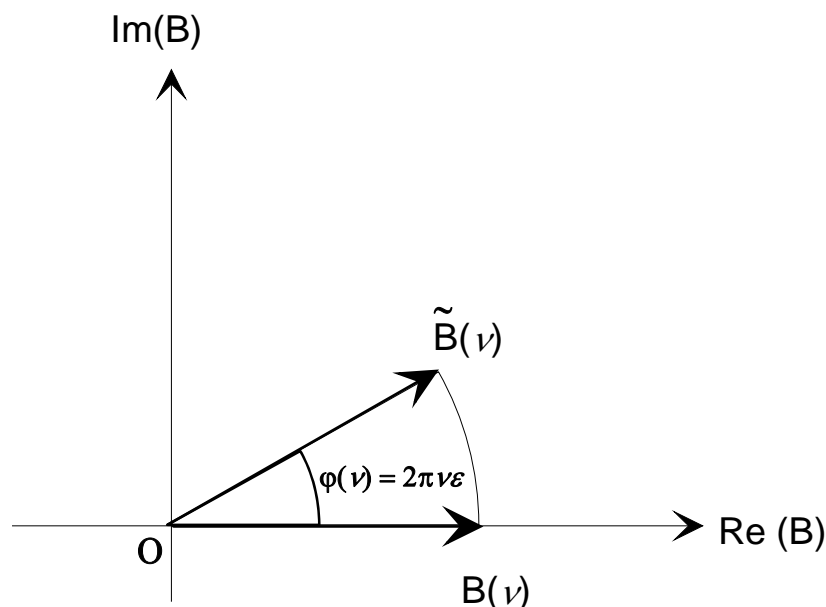
La première, et la plus importante, est que la position du miroir mobile lorsque $x=0$ ¹⁵ n'est pas connue très précisément. En revanche cette position reste stable au cours du temps

La deuxième est que l'échantillon central de l'interférogramme peut ne pas tomber exactement sur cette position. La formule (8) montre qu'une erreur ε sur la position de cet échantillon va entraîner une multiplication du spectre mesuré par un facteur complexe égal à $e^{2i\pi\nu\varepsilon}$.

Cette multiplication peut être interprétée dans le plan complexe comme une rotation (voir la figure 3.7 ci-après) dont l'angle φ est donné par la formule

$$\varphi(\nu) = 2\pi\nu\varepsilon \quad (10)$$

Elle a pour effet de rendre la fonction $\tilde{B}(\nu)$ complexe, alors que physiquement les spectres mesurés doivent être réels.



¹⁴ On peut aussi voir directement que la fonction $B(\nu) \sin(2\pi\nu x)$ est impaire, son intégrale entre $-\infty$ et $+\infty$ est donc nulle.

¹⁵ Différence de marche nulle ou ZPD (Zero Path Difference en anglais). On se réfère souvent à cette position dans la suite du document.

Figure 3.7 – Rotation complexe associée à une erreur sur le ZPD

On voit donc apparaître les deux fonctions de la calibration radiométrique :

- Permettre une mesure absolue précise du flux d'énergie reçu dans chaque canal
- Calculer les spectres atmosphériques (fonction réelle) à partir des TF (complexes) des interférogrammes

L'amplitude du résidu imaginaire du spectre après calibration constituera une bonne indication de la qualité de celle-ci.

3.3.2 METHODE DE CALIBRATION RADIOMETRIQUE

On dispose de deux spectres complexes de référence qui, dans le cas de IASI, correspondent à

- Une visée de l'espace froid dont le spectre est nul à la précision des mesures fournies par IASI¹⁶,
- Une visée d'un corps noir chaud intégré à l'instrument dont la température est suivie avec précision.

Notations :

- $S_{CS}(\nu)$ spectre complexe de la visée espace froid (CS = Cold Space)
- $S_{BB}(\nu)$ spectre complexe de la visée corps noir chaud (BB = Black Body)
- $S_{EW}(\nu)$ spectre complexe de la visée atmosphérique (EW = Earth View)
- $Planck(T_{BB}, \nu)$ luminance du corps noir à la température T_{BB}
- $L(\nu)$ luminance de la source (à déterminer)
- $S(\nu)$ spectre complexe de la scène visée (soit EW, soit visées de calibrations)

Hypothèse : l'instrument est linéaire en énergie.

Cette hypothèse s'exprime par l'équation suivante valable pour tous les nombres d'onde

$$S(\nu) = \alpha(\nu) * L(\nu) + \beta(\nu)$$

L est une fonction à valeurs réelles. S , α et β sont des fonctions complexes du nombre d'ondes ν . Pour chaque nombre d'onde ν , cette équation peut être représentée graphiquement dans le plan complexe (voir la figure 3.8 ci-après). Le point représentatif de $S(\nu)$ parcourt une droite lorsque L varie entre 0 et ∞ . Cette droite qui passe par les points représentatifs de $S_{CS}(\nu)$ et $S_{BB}(\nu)$ est appelée la droite de calibration¹⁷ dans toute la suite du document ainsi que dans les fiches de description d'algorithmes.

¹⁶ le spectre entrant dans l'instrument est nul (rayonnement d'un corps noir à 4 K) mais le spectre vu par les détecteurs ne l'est pas (émission thermique propre de l'instrument)

¹⁷ la figure 3.8 est tracée pour un nombre d'ondes ν donné. C'est donc un peu abusivement que l'on parle de « la » droite de calibration. Il y a en réalité une infinité de droites de calibration.

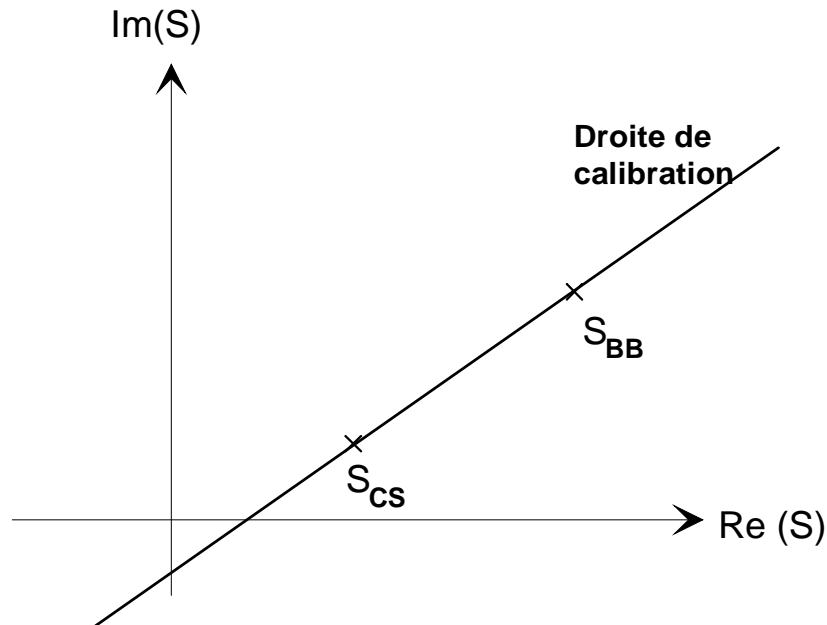


Figure 3.8 – Droite de calibration

La calibration radiométrique d'un spectre revient *approximativement* à projeter orthogonalement le point représentatif du spectre à calibrer $S(\nu)$ sur la droite de calibration. Plus précisément, on calcule

$$L(\nu) = \text{Planck}(T_{BB}, \nu) \text{Re} \left[\frac{S_{EW}(\nu) - S_{CS}(\nu)}{S_{BB}(\nu) - S_{CS}(\nu)} \right] = A(\nu)(S(\nu) - B(\nu)) \quad (11)$$

où $\text{Re}[z]$ représente la partie réelle du nombre complexe z ¹⁸. Cette formule revient à faire tourner le point représentatif de $S(\nu)$ autour de $S_{CS}(\nu)$ pour l'amener sur la droite de calibration.

La valeur résiduelle de la partie imaginaire du rapport permet de caractériser la qualité de la calibration réalisée.

La droite de calibration est supposée stable dans le temps. Elle est cependant susceptible d'évoluer sur le long terme¹⁹, les coefficients de cette droite sont donc recalculés périodiquement²⁰ afin de garantir la précision de calibration radiométrique absolue requise pour IASI.

¹⁸ on dérive très facilement cette formule en résolvant les 2 équations obtenues en écrivant $S(\nu) = \alpha(\nu) * L(\nu) + \beta(\nu)$ pour les 2 visées de référence espace froid et corps noir chaud.

¹⁹ par exemple à cause d'une dérive de la température du corps noir chaud, de variations à long terme sur la transmission optique de l'instrument ou de dérive de la sensibilité des détecteurs

²⁰ toutes les 8 secondes avec une constante de temps de filtrage du bruit égale à 80 secondes dans le cas de l'instrument IASI

On voit que (11) permet de s'affranchir de la connaissance de la position du ZPD réel. En effet une erreur ε commune aux trois mesures se traduira par un facteur complexe²¹ commun à $S_{CS}(\nu)$, $S_{BB}(\nu)$ et $S_{EW}(\nu)$. Ce facteur commun sera éliminé par la division effectuée en appliquant la formule (11).

En revanche, on voit aussi combien il est important que les échantillons centraux des trois interférogrammes I_{CS} , I_{BB} et I_{EW} correspondent bien à la même position du miroir mobile. Une erreur d'un échantillon sur l'un de ces interférogrammes se traduira par un déphasage qui s'écrit $\varphi = 2\pi\nu\varepsilon$ (d'après (10)). φ varie approximativement entre $\pi/10$ et $\pi/2.6$ pour les nombres d'ondes mesurés par IASI. Un déphasage de cette amplitude serait fatal à la calibration radiométrique.

Il est donc nécessaire de mettre en place un mécanisme qui assure que le même échantillon central est sélectionné pour toutes les visées (calibrations et atmosphère).

Sur IASI, il n'existe pas de dispositif matériel qui permette de déterminer le numéro NZPD de l'échantillon qui est le plus proche du ZPD réel. C'est un ensemble d'algorithmes embarqués dans l'instrument qui a la charge de cette détermination. Ces algorithmes fonctionnent selon une méthode décrite dans [DR13] et [DR14] et qui va être présentée succinctement dans la section suivante.

3.3.3 PRINCIPE DE DETERMINATION DU NZPD

Il existe plusieurs techniques de détermination du NZPD (voir [DR13]).

Certaines travaillent directement sur l'interférogramme en cherchant à déterminer la position de son maximum à partir de la connaissance partielle qu'on en a au travers de sa version échantillonnée²². Ces méthodes n'ont pas été retenues car elles ne donnent pas une position du ZPD suffisamment précise. Elles sont cependant utilisées à des degrés divers dans la méthode décrite ci-après ou bien pour initialiser les données qui sont nécessaires à cette méthode.

Les autres techniques travaillent à partir des spectres bruts obtenus par TF de l'interférogramme. La première qui vient à l'esprit a été proposée par J.CONNES [DR32]. L'idée de base de cette méthode consiste à noter que, si le NZPD est mal choisi, la phase du spectre varie linéairement en fonction du nombre d'onde (voir la formule (10)). La méthode de CONNES consiste à extraire la pente de cette phase. Elle utilise une régression linéaire effectuée sur les valeurs de la phase $\varphi(\nu_n)$ des échantillons du spectre brut. Une application de la formule (10) permet alors de déduire de cette pente la position du ZPD.

Cet algorithme n'est utilisé dans le système IASI qu'à des fins d'initialisation. Les raisons de ce choix sont exposées succinctement dans [DR13]. Elles sont liées à la prise en compte des erreurs de phase de l'instrument et on y revient plus en détail dans le § 6.4 lors de la discussion de ce sujet.

Un autre algorithme est utilisé en routine sur IASI. On sait qu'un décalage du ZPD d'un échantillon correspond à une rotation très importante du spectre restitué (l'angle $2\pi\nu\delta$ ²³ varie entre $\pi/10$ et $\pi/2.6$ radian ainsi qu'on l'a vu précédemment). Un choix erroné du NZPD va donc éloigner fortement le point représentatif du spectre de la droite de calibration. La figure 3.9 ci-dessous montre l'évolution de la position du point

²¹ $e^{i2\pi\nu\varepsilon}$ d'après la formule (10)

²² ou de façon plus sophistiquée et plus précise en calculant le centre de gravité de l'interférogramme

²³ δ est la différence de marche entre deux échantillons de l'interférogramme

représentatif de $S(\nu)$ lorsque le choix du NZPD est en erreur ($n=0$ lorsque le NZPD est le bon). L'algorithme choisit la valeur du NZPD qui rend minimum la distance du point $S(\nu)$ à la droite de calibration.

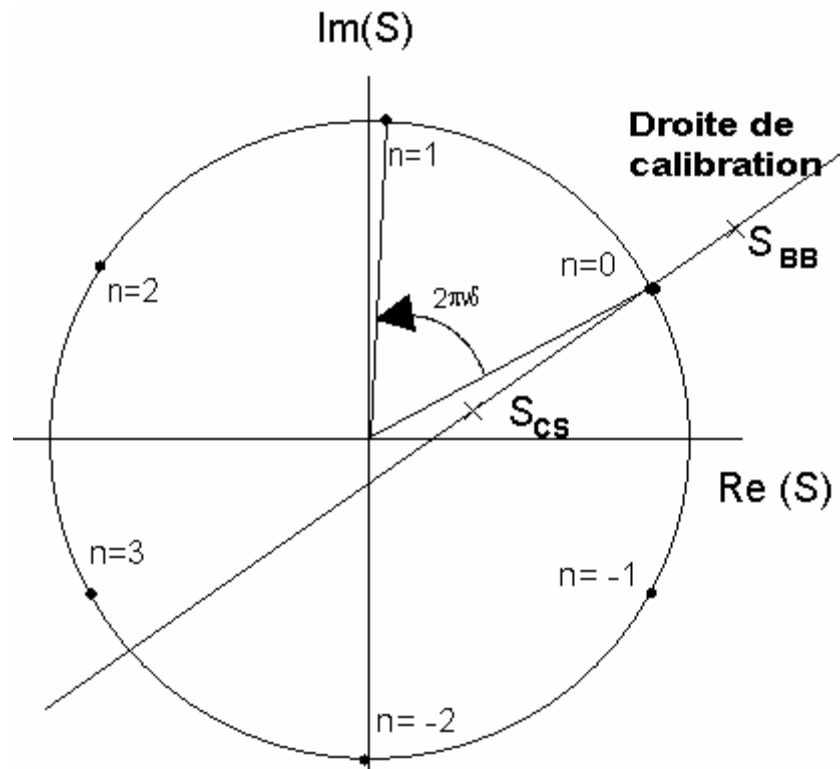


Figure 3.9 – Rotation du spectre pour plusieurs valeurs consécutives du NZPD

Cette figure permet d'identifier une difficulté de la méthode. Si l'angle $2\pi\nu\delta$ vaut environ $\pi/3$ alors les points correspondant à $n=\dots -6, -3, 0, 3, 6\dots$ sont eux aussi sur la droite de calibration. La distance à la droite de calibration est donc nulle pour ces différentes valeurs de n . Il y a dans ce cas ambiguïté sur la valeur du NZPD.

On remarque que cette ambiguïté n'existe que pour les valeurs de ν qui rendent l'angle $2\pi\nu\delta$ égal à π/p où p est un entier. Ces valeurs sont fournies dans le tableau ci-dessous.

$2\pi\nu\delta$	$\pi/2$	$\pi/3$	$\pi/4$	$\pi/5$	$\pi/6$	$\pi/7$	$\pi/8$	$\pi/9$	$\pi/10$	$\pi/11$
ν (cm ⁻¹)	3429	2286	1715	1372	1143	980	857	762	686	623

Pour supprimer la difficulté précédemment exposée, on travaille avec plusieurs nombres d'ondes en choisissant comme NZPD la valeur de n qui minimise la moyenne des distances obtenues pour de nombreuses valeurs de ν . Dans ce cas il ne subsiste plus qu'un seul minimum général et des minima locaux.²⁴

Cette moyenne permet aussi de minimiser le nombre de fausses déterminations du NZPD liées au bruit de mesure qui affecte les mesures de l'interférogramme et par contre coup le spectre restitué.

²⁴ En effet le vrai minimum est le même pour tous les ν alors que les fausses déterminations de n n'apparaissent que pour certaines valeurs de ν .

Note : Pour l'application de cet algorithme qui est assez lourd en temps de calcul, on n'utilise pas des spectres à la pleine résolution fournie par IASI, mais seulement des spectres réduits obtenus à partir d'un nombre limité de points de l'interférogramme proches de l'échantillon central²⁵. La position approximative de cet échantillon central est calculée à partir du centre de gravité de l'interférogramme.

3.4 DESCRIPTION SIMPLIFIEE DE L'INSTRUMENT

3.4.1 GEOMETRIE DES VISEES ATMOSPHERIQUES (SONDEUR ET IMAGEUR)

IASI réalise des sondages atmosphériques de part et d'autre de la verticale de manière à obtenir une couverture terrestre chaque jour (voir la figure 3-10 ci-dessous). Trente sondages sont réalisés à intervalle régulier le long de chaque ligne de balayage. Le balayage est réalisé par un miroir de changement de visée (*miroir de scan* dans les fiches de description d'algorithme) dont l'axe de rotation est parallèle à la vitesse du satellite²⁶.

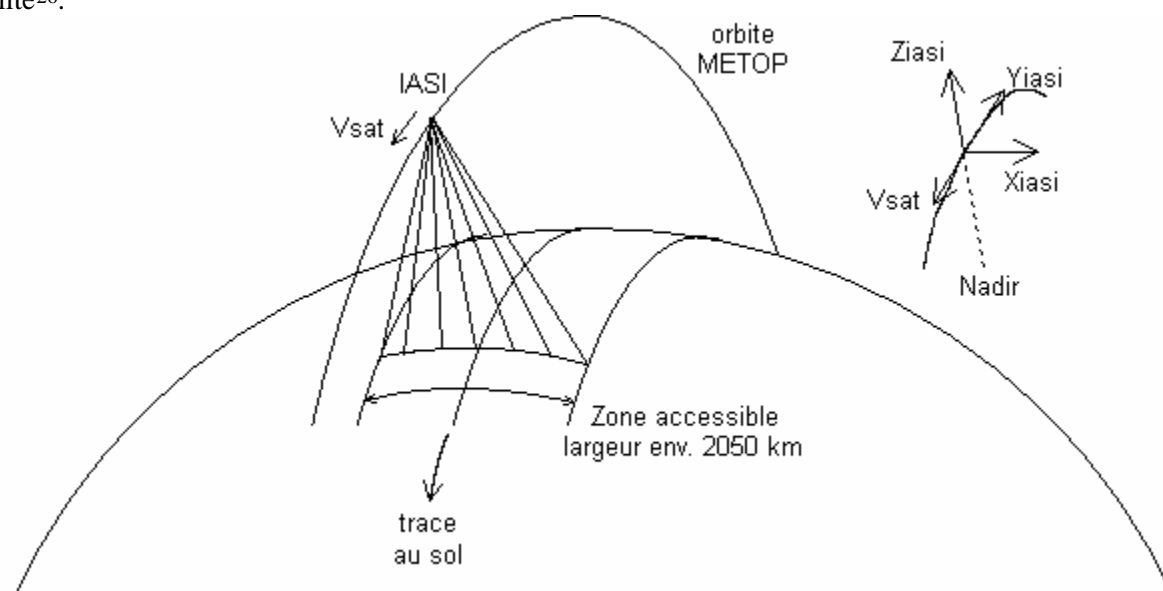


Figure 3.10 – Géométrie des visées atmosphériques de IASI

La figure 3.11 montre le champ de vue du sondeur IASI qui est constitué de 4 pixels circulaires dont le diamètre au niveau du sol est d'environ 12 km pour une visée au nadir. De plus un imageur infrarouge IIS ²⁷ (64x64 pixels) est embarqué sur IASI afin de détecter les nuages²⁸. Le champ de vue de cet imageur recouvre largement celui des 4 pixels du sondeur.

²⁵ rappel : voir la discussion en fin de §3.2.4

²⁶ Durant l'acquisition d'un interférogramme la position du miroir est aussi asservie selon un axe perpendiculaire (pour compenser le filé).

²⁷ Integrated Imager Subsystem

²⁸ Une couverture nuageuse même partielle dans un pixel sondeur est susceptible de rendre difficile voire impossible l'inversion des spectres pour en tirer des profils verticaux de température et d'humidité.

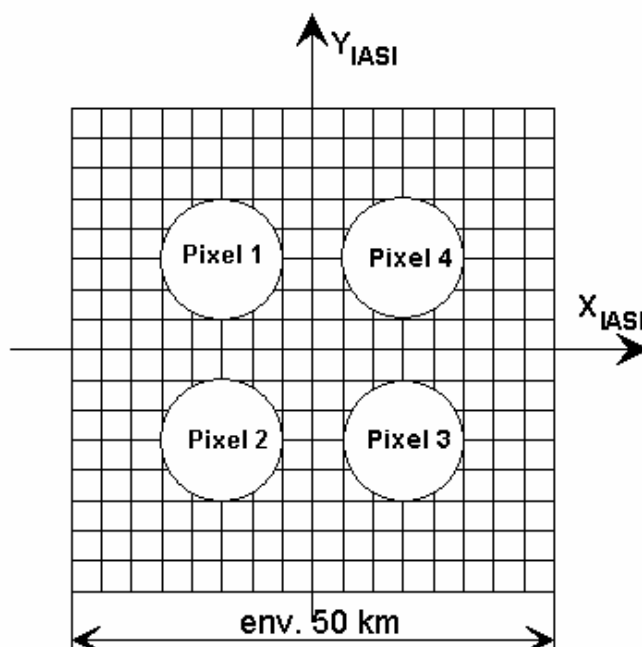


Figure 3.11 – Champs de vue du sondeur et de l'imageur(visée au nadir)

	angle	trace au sol
Diamètre du pixel sondeur	0.83 degré	12 km
Distance. Axe pixel / axe optique	0.88 degré	12.5 km
Champ de vue imageur	3.42 degrés	49 km

Table 3.1 – Dimension des champs de vue (au nadir)

3.4.2 DEFINITION « SIMPLIFIEE » DU SONDEUR

Le sondeur de IASI est un instrument qui diffère sensiblement du schéma de principe de l'interféromètre de Michelson présenté dans la section 2.1. La figure 3.12 ci-dessous montre les différences qui sont jugées significatives pour la définition des algorithmes. On a aussi fait figurer sur ce schéma les principaux sous-systèmes de l'instrument dont le nom apparaît dans les fiches descriptives des algorithmes.

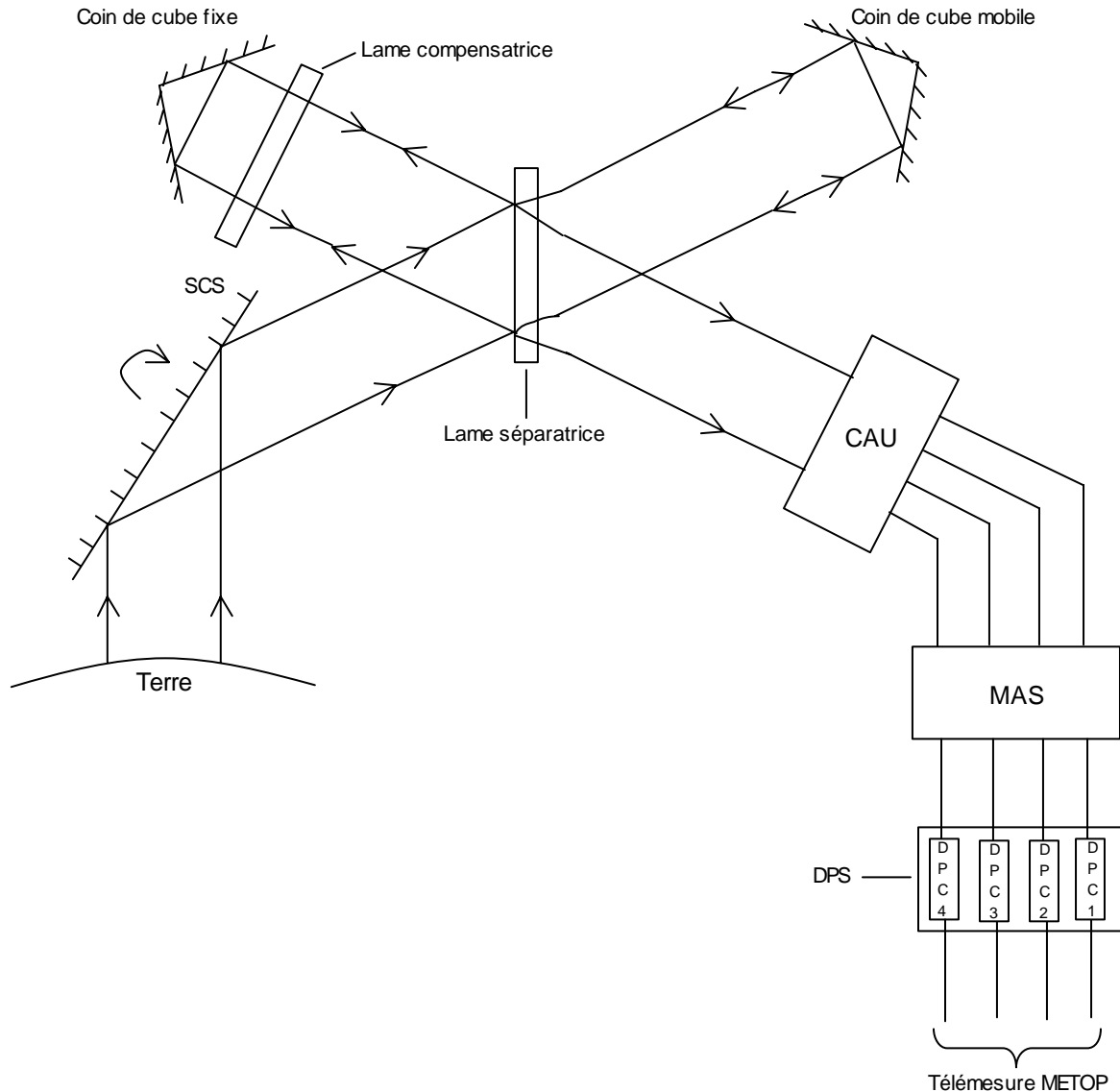


Figure 3.12 – Schéma simplifié de l'interféromètre de IASI

L'interféromètre de IASI est donc un interféromètre à coins de cube. Ces derniers, contrairement aux miroirs plans, tolèrent des mésalignements angulaires.

La configuration optique est une configuration à lame compensatrice déportée²⁹. Pour des raisons d'encombrement, cette compensation déportée n'a pas pu être aménagée classiquement, c'est-à-dire parallèlement à la séparatrice. Cette caractéristique introduit un chromatisme dans l'instrument dont il a fallu tenir compte dans la définition des algorithmes.

Les sous-systèmes représentés sur la figure sont :

²⁹ Cette configuration particulière a été adoptée afin de limiter le nombre de passages du faisceau optique à travers les lames et diminuer ainsi l'atténuation liée à l'absorption du matériau (ZnSe)

- le CAU : Cold Acquisition Unit
qui contient donc les détecteurs
- le MAS : Main Acquisition Subsystem
qui contient les chaînes d'acquisition et de numérisation du signal
- le DPS : Data Processing Subsystem
qui contient les chaînes de traitement. Les données de chaque pixel sont traitées par une unité séparée (DPC)
- le SCAN : Scanning mirror Subsystem
Miroir de changement de visée

3.4.3 SEQUENCEMENT TEMPOREL DES ACQUISITIONS

La période du cycle de balayage est de 8 secondes. Ce cycle est décomposé en 37 sous-cycles de 0,216 seconde qui sont référencés dans la documentation par leur numéro (SN pour *Step Number*). Dans le fonctionnement nominal de l'instrument les 30 premiers sous-cycles (SN=1 à 30) correspondent aux acquisitions des visées atmosphériques.

Afin d'optimiser le temps de fonctionnement utile de l'instrument, les interférogrammes sont acquis dans les 2 sens de déplacement du miroir mobile (CCD pour *Cube Corner Direction*). Ceci impose d'acquérir 2 interférogrammes pour chaque visée de calibration : un pour chaque valeur de CCD. En effet, les défauts entraînant des dissymétries de l'interférogramme dépendent de la direction du mouvement.

Les interférogrammes du Corps Noir chaud sont acquis au cours des sous-cycles 32 et 33, ceux de la visée espace froid au cours des sous-cycles 35 et 36. Pendant les trois sous-cycles restants (SN=31,34 et 37), le miroir de changement de visée est en cours de basculement, il n'y a pas d'acquisition.

Des images de l'espace froid et du corps noir chaud sont acquises au cours des sous-cycles 32, 33, 35 et 36. Ces quatre images (AC)³⁰ sont transmises au sol pour calibrer radiométriquement l'imageur.

La figure 3.13 ci-dessous représente le diagramme temporel de fonctionnement de l'instrument en mode normal. La durée d'acquisition d'un interférogramme est d'environ 151 millisecondes. Il reste donc environ 65 millisecondes pour le déplacement et la stabilisation du miroir de scan ainsi que pour l'inversion du mouvement du coin de cube.

³⁰ seules les deux images correspondant à SN=33 et SN=36 sont utilisées pour la calibration radiométrique (AC). Les autres images risquent d'être polluées par un problème de rémanence des micro bolomètres

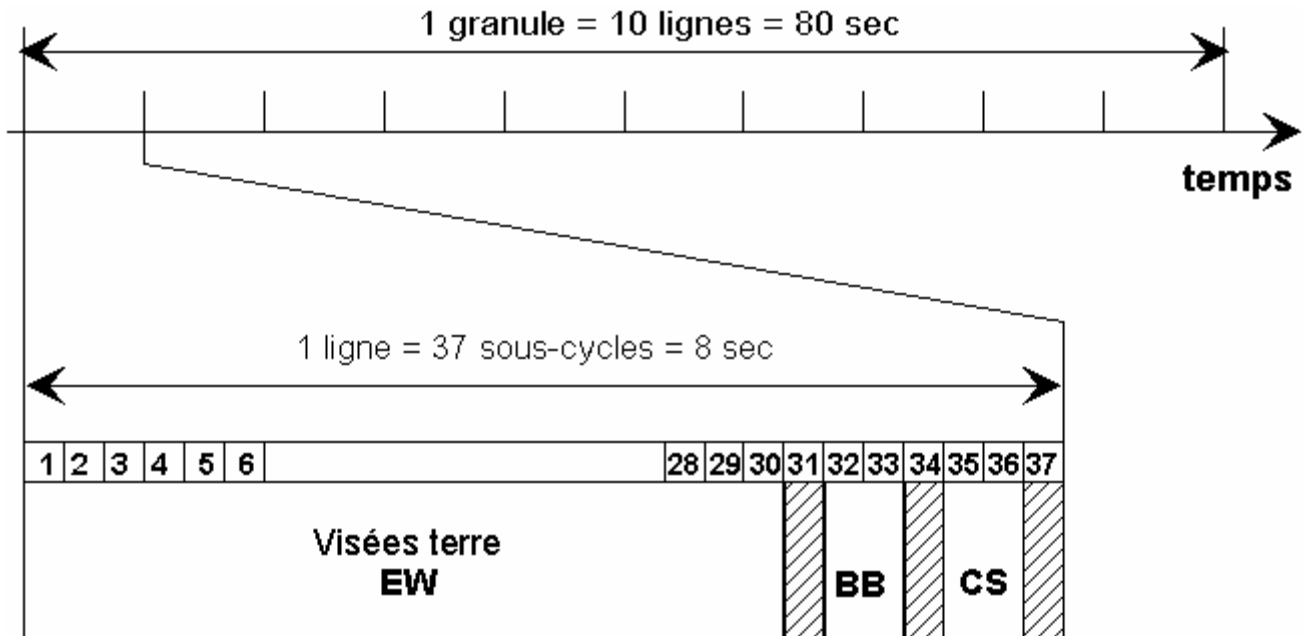


Figure 3.13 – Diagramme temporel des acquisitions (mode normal)

3.4.4 DECOMPOSITION DE LA BANDE UTILE EN TROIS BANDES B1, B2, B3

La technologie ne permet pas de fabriquer des détecteurs ayant les performances requises sur la totalité de la bande mission de IASI³¹. Cette bande est donc découpée en trois parties B1, B2 et B3 dont les limites nominales sont les suivantes :

- B1 : de 650 à 1210 cm^{-1} ,
- B2 : de 1210 à 1900 cm^{-1} ,
- B3 : de 1900 à 2760 cm^{-1} .

A chacune de ces bandes est associée un détecteur spécifique. Le traitement des données de chaque détecteur fournit alors le spectre atmosphérique limité à la bande correspondante.

En réalité, les limites de bandes ne sont pas fixées aussi rigide­ment que cela est indiqué ci-dessus. Le bruit de mesure augmente rapidement au voisinage des limites de bandes³², la limite entre les bandes est donc fixée en fonction de la performance relative des 3 détecteurs.

Plus précisément, on utilise le fait que chaque détecteur continue à fournir du signal en dehors de sa bande nominale. Il existe donc deux zones de recouvrement B1/B2 et B2/B3 dans lesquelles on dispose de deux spectres mesurés. Dans ces zones on combine les deux spectres mesurés pour obtenir une valeur du spectre qui est moins bruitée que les deux valeurs initiales. On se reportera à la section 4.6 de ce document qui décrit plus précisément la méthode de combinaison des bandes (*band merging*).

³¹ 645– 2760 cm^{-1} en terme de nombre d'ondes ν ou encore 3.6–15.5 μm exprimée en longueur d'onde.

³² les raisons principales de cette dégradation sont la diminution de transmission des optiques et la diminution de sensibilité des détecteurs.

3.4.5 TELEMESURE SCIENTIFIQUE

La télémessure scientifique est décomposée logiquement en

- Données de mesure [DR6]
- Données de vérification [DR7]

Ces données comprennent pour chaque visée terre

- quatre spectres réels³³ calibrés radiométriquement et l'image brute de 4096 pixels associée,
- des données auxiliaires nécessaires au traitement sol de ces données

La majeure partie de la bande passante disponible est bien sûr consommée (voir [DR16]) par les spectres et les images associées. La bande passante imposée par le satellite METOP est de 1,5 Mbits/sec en moyenne. Afin de rendre IASI compatible avec cette contrainte, il a été nécessaire de déporter à bord du satellite le calcul des spectres³⁴ ainsi que les traitements annexes nécessaires à ces calculs (calibration et détermination du NZPD).

Il est de plus possible de transmettre au sol un échantillonnage des interférogrammes bruts et des données annexes qui permettent de rejouer au sol les traitements bord. Ces données de vérifications comprennent plus précisément toutes les 8 secondes :

- un interférogramme brut,
- les coefficients de calibration radiométrique instantanés et filtrés,
- les spectres réduits des visées de référence
- les spectres calibrés avant la combinaison des bandes sur les parties du spectre en recouvrement.

L'interférogramme brut transmis dans les données de vérification peut être sélectionné par son numéro de pixel, de bande (B1, B2 ou B3) et la position du miroir de scan. Les positions possibles correspondent à une des 30 visées terre, le corps noir chaud ou un des deux types de visées de l'espace froid ³⁵.

Note : La direction de déplacement du coin de cube (CCD) est inversée à chaque sous-cycle (SN). Le nombre de sous-cycles par ligne étant impair, le CCD change de signe à chaque ligne. On tiendra compte de ce fait dans la programmation des données de vérification : *si les données de vérification doivent être acquises pour une valeur imposée du CCD, on programmera l'acquisition des données d'un même SN sur deux lignes consécutives.*

3.4.6 MODE CALIBRATION EXTERNE

Dans ce mode il n'y a pas de balayage de la ligne de visée pendant les 30 premiers sous-cycles. Le miroir de changement de visée qui reste fixe pendant cette première partie du cycle peut être placé sur une des positions suivantes :

- une des trente visées terre à une incidence donnée,
- la visée de calibration sur le corps noir chaud,
- un des deux types de visées de l'espace froid,
- la visée de la face arrière du miroir de scan.

³³ un pour chaque pixel du sondeur

³⁴ plus de 40 Mbits / sec seraient nécessaires pour transmettre les interférogrammes bruts

³⁵ on a jusqu'à présent passé sous silence l'existence de 2 visées espace froid (voir §3.4.6 ci-après).

Ce mode de fonctionnement de l'instrument permet donc de redescendre au sol les spectres obtenus à partir des visées de calibration, qui ne sont pas transmis dans la télémessure scientifique en mode nominal.

On l'utilisera en particulier pour déterminer le bruit de mesure de l'instrument ou pour ajuster au sol le modèle caractérisant l'instrument.

Jusqu'à présent, on a passé sous silence dans ce document l'existence de deux types de visées de l'espace froid. La visée espace froid N°1 est utilisée pour la calibration radiométrique comme cela a été discuté jusqu'à présent. La deuxième de ces visées (espace froid N°2) n'est utilisée que pour obtenir une mesure de l'émissivité du miroir de scan sous une deuxième incidence afin de rendre possible l'ajustement au sol d'un modèle.

De même on n'avait pas encore parlé ici de la possibilité d'observer la face arrière du miroir. Cette mesure permet une mesure de la température du miroir. Elle est utilisée pour ajuster au sol un modèle qui permet d'obtenir la température du miroir lorsqu'on connaît la température de sondes placées dans la cavité instrument. En effet, il n'a pas été possible de placer sur le miroir des sondes qui auraient permis une mesure directe de sa température.

Dans ce mode « calibration externe » le séquencement temporel de l'instrument est légèrement modifié (voir la figure 3.14). Les deux premiers (SN=1,2) et le dernier sous-cycle (SN=30) sont neutralisés pour laisser le temps au miroir de rejoindre n'importe quelle position spécifiée.

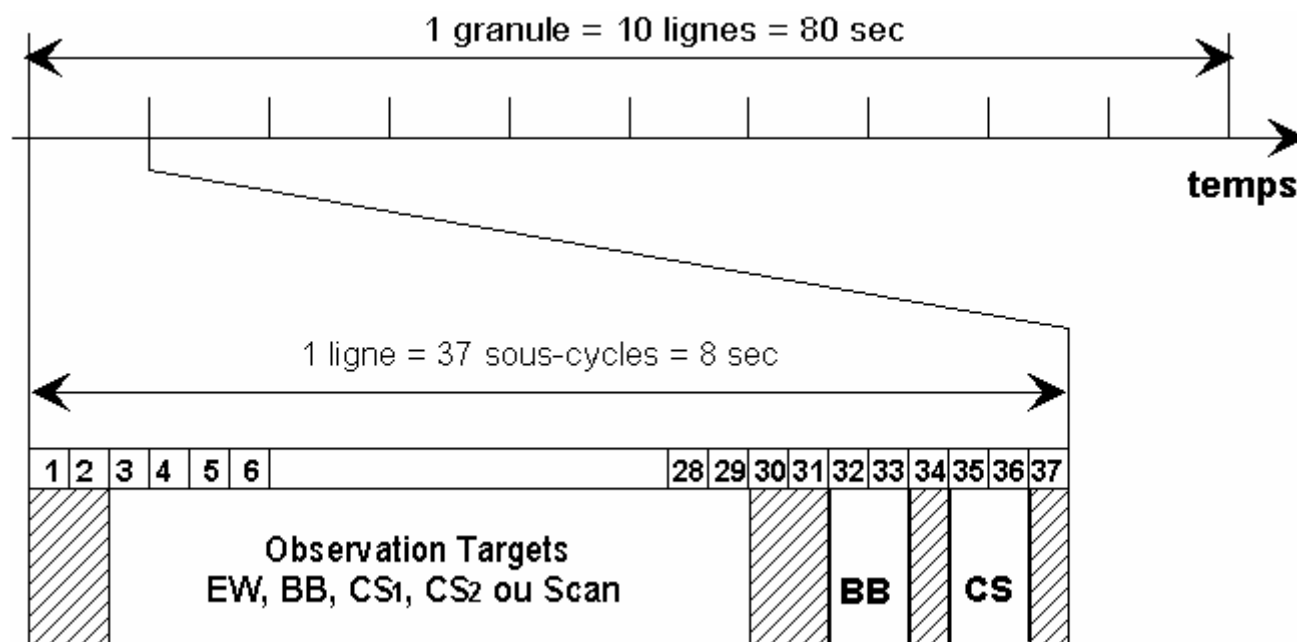


Figure 3.14 – Diagramme temporel des acquisitions (mode « calibration externe »)

3.5 CARACTERISTIQUES SPECTRALES

Cette section décrit les principales relations reliant les aspects géométriques et optiques du sondeur IASI et ses caractéristiques spectrales.

L'effet du champ de vue de l'instrument est discuté, l'axe interférométrique est défini. Ces descriptions reposent sur un modèle théorique élémentaire de l'interféromètre, modèle qui sera raffiné et complété dans la section 6.4 relative à l'initialisation des fonctions spectrales.

3.5.1 MODELE ELEMENTAIRE DE L'INTERFEROMETRE

La figure 3.15 ci-dessous présente le modèle optique et géométrique simplifié du sondeur qui va être continuellement utilisé dans la suite de cette section (3.5). Un coup d'œil à la figure 3.12 de la section précédente montre que ce modèle néglige l'épaisseur de la lame séparatrice³⁶. D'autre part on suppose aussi cette lame parfaite ainsi que les coins de cube : une onde plane pénétrant dans l'interféromètre en ressort donc plane.

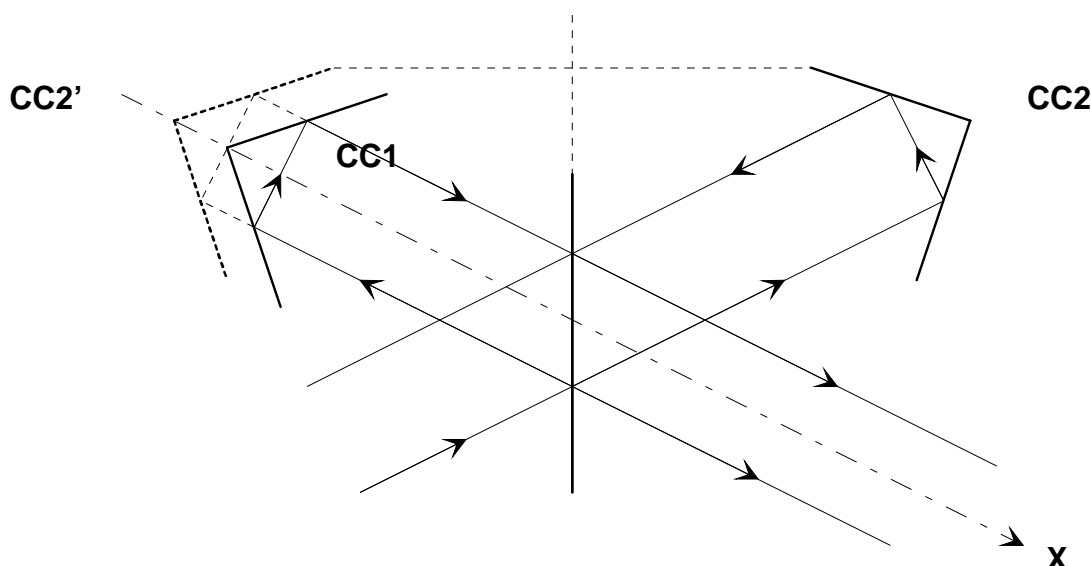


Figure 3.15 – Modèle élémentaire de l'interféromètre

On voit qu'avec les hypothèses simplificatrices de ce modèle il est possible de raisonner seulement sur les positions relatives du coin de cube fixe réel CC1 et de l'image virtuelle CC2' du coin de cube mobile. C'est ce qui est fait dans la section suivante où on analyse l'influence du champ de vue étendu de l'instrument sur ses caractéristiques spectrales.

On voit aussi en regardant cette figure que, pour une onde incidente sur l'axe³⁷, la différence de marche est égale à deux fois la distance qui sépare les sommets de CC1 et CC2'.

³⁶ en conséquence il néglige aussi la présence de la lame compensatrice

³⁷ c'est-à-dire dont la direction de propagation est parallèle au déplacement du coin de cube mobile

3.5.2 EFFET DU CHAMP DE VUE – NOTION D'AXE INTERFEROMETRIQUE

La figure 3.16 ci-dessous montre ³⁸ la différence de marche obtenue pour une onde plane faisant un angle d'incidence θ avec la droite qui joint les sommets de CC1 et CC2'. Cette différence de marche s'écrit simplement³⁹.

$$x = 2\overrightarrow{C_1C_2} * \vec{u} = 2\|\overrightarrow{C_1C_2}\| \cos \theta$$

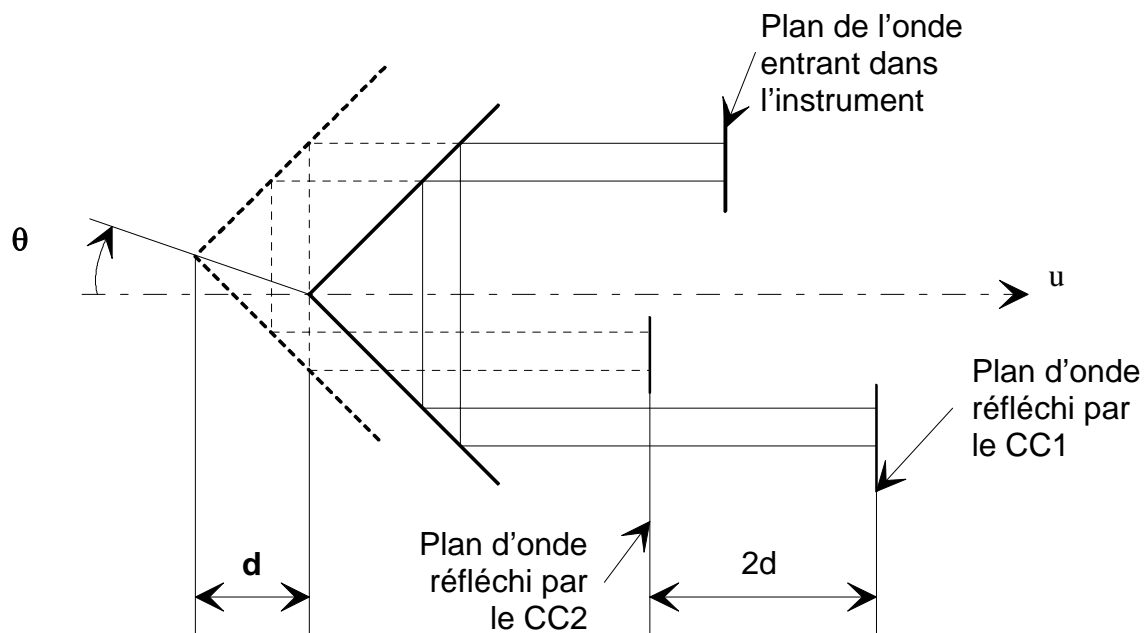


Figure 3.16 – Différence de marche pour une onde inclinée sur l'axe

La dépendance en θ de la différence de marche montre que pour une position donnée du coin de cube mobile on va observer une figure d'interférence dans le champ de l'instrument (franges à l'infini de l'interféromètre de Michelson). Ces franges dans le cas de IASI pourraient être observées sur un écran placé dans le plan focal du miroir M4⁴⁰ (défini sur la figure 3.17 page suivante).

³⁸ par rapport à la figure 3.15, les coins de cube ont été tournés autour de leur sommet de façon à faciliter le tracé des rayons. Cette modification est sans conséquence sur le résultat puisqu'un coin de cube parfait renvoie une onde plane dans la direction d'où elle est venue quelle que soit la direction incidente.

³⁹ Dans la section 6.4 cette formule sera affinée pour tenir compte de l'épaisseur non négligeable des lames séparatrice et compensatrice.

⁴⁰ ce plan contient le diaphragme qui définit les 4 pixels du sondeur IASI.

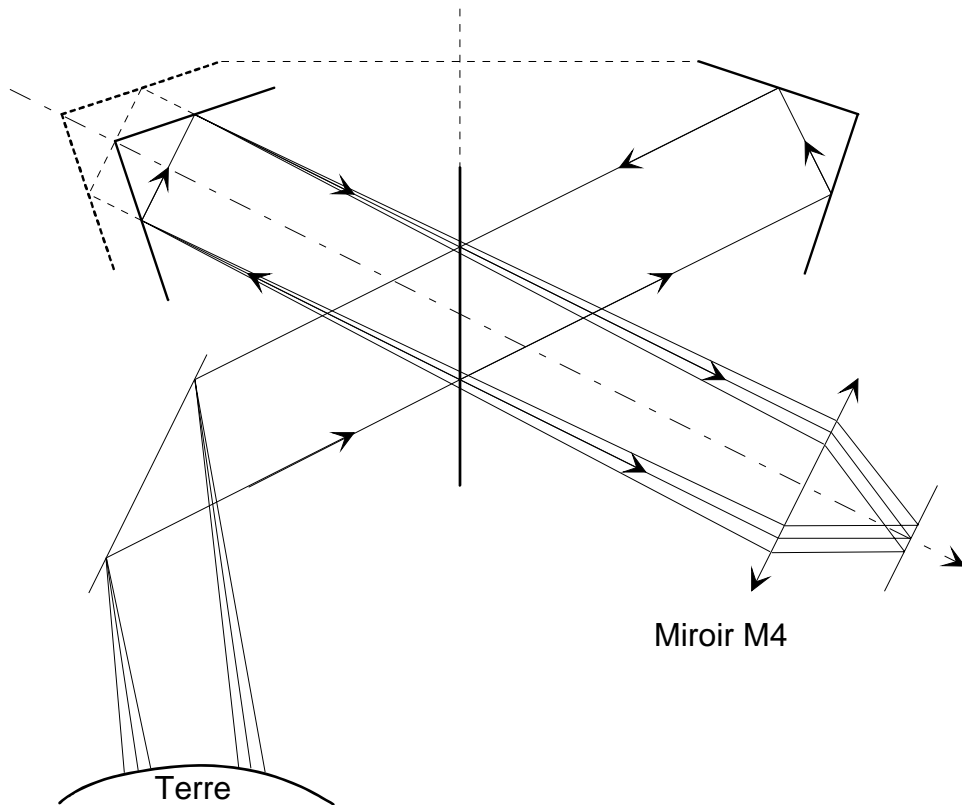


Figure 3.17 – Champ dans le modèle simplifié⁴¹

Une simulation de franges correspondant à une source monochromatique spatialement étendue est donnée par les figures 3.20 de la section suivante. Il s'agit de cercles concentriques dont le centre est la direction définie par les points C1 et C2 (apex des coins de cube).

Si les deux conditions suivantes sont simultanément respectées :

- la trajectoire du coin de cube mobile est parfaitement rectiligne,
- la trajectoire de l'image du coin de cube mobile passe par le coin de cube fixe (i.e. lorsque l'interféromètre est parfaitement aligné).

alors la direction du centre des franges reste fixe pendant toute la durée d'acquisition d'un interférogramme : c'est la direction du mouvement du coin de cube mobile. On appelle cette direction l'axe interférométrique.

Les défauts de mouvement du coin de cube ou d'alignement de l'interféromètre font que les deux conditions ci-dessus ne sont pas exactement vérifiées. Les algorithmes prennent en compte ces types de défaut (voir §6.5). Cependant pour la compréhension de la suite du chapitre 3 ou des traitements sol définis dans §5, il vaut mieux considérer la définition simplifiée de l'axe interférométrique qui est donnée ci-dessus.

⁴¹ la pupille étant imagée sur le miroir de scan et sur les coins de cube on a omis de tracer tous les rayons extrêmes tout au long de leur trajet.

3.5.3 FONCTION DE CALIBRATION SPECTRALE

On déduit de la section précédente que l'interférogramme d'une onde plane monochromatique ν dont la direction de propagation est situé à un angle θ de l'axe interférométrique s'écrit :

$$I(x) = \cos(2\pi\nu x \cos \theta)$$

où x représente le double du déplacement du coin de cube.

Cette équation montre immédiatement que le spectre obtenu en prenant la Transformée de Fourier inverse de I contiendra une raie située à la position

$$\nu \cos \theta$$

Cette équation implique que les spectres bruts sont mesurés pour des nombres d'ondes

$$\nu'_n = \nu_n \cos \theta = \nu_n C_n$$

qui diffèrent des nombre d'ondes nominaux ν_n par un coefficient multiplicatif C_n qui devrait être constant à cet ordre d'approximation. Plus précisément, d'autres imperfections instrumentales⁴² font que les coefficients de calibration spectrale C_n ne sont pas constants. On parle donc de fonction de calibration spectrale.

Si on ne tenait pas compte de cet angle de champ on commettrait donc une erreur de calibration spectrale inacceptable (erreur relative égale à $1 - \cos \theta$ soit environ 10^{-4} alors qu'on vise $2 \cdot 10^{-6}$ pour la calibration spectrale de IASI).

De plus la spécification de calibration est tellement serrée qu'elle nécessite de surveiller en permanence les variations de position de l'axe interférométrique par rapport aux pixels. On va décrire dans la section suivante comment cette surveillance est réalisée.

3.5.4 METHODE DE CALIBRATION SPECTRALE

Dans un premier temps on va supposer que les pixels IASI sont quasiment ponctuels. La géométrie relative des quatre pixels du sondeur IASI a été présentée sur la figure 3.11. Elle est fixée par le diaphragme de champ placé dans le plan focal du miroir M4 (figure 3.17). Si ce diaphragme, qui est placé en entrée de la CBS, se déplace par rapport à l'optique chaude de l'interféromètre, alors les pixels ne sont pas tous situés à la même distance de l'axe interférométrique. Ils n'ont donc pas la même fonction de calibration spectrale.

On définit pour chaque pixel i l'angle θ_i qu'il forme avec l'axe interférométrique (voir la figure 3.18 ci-dessous).

⁴² l'effet d'un décalage de la boîte froide est traité dans la section 3.5.4, l'effet de l'étendue non nulle des pixels peut être trouvé dans l'annexe 6.

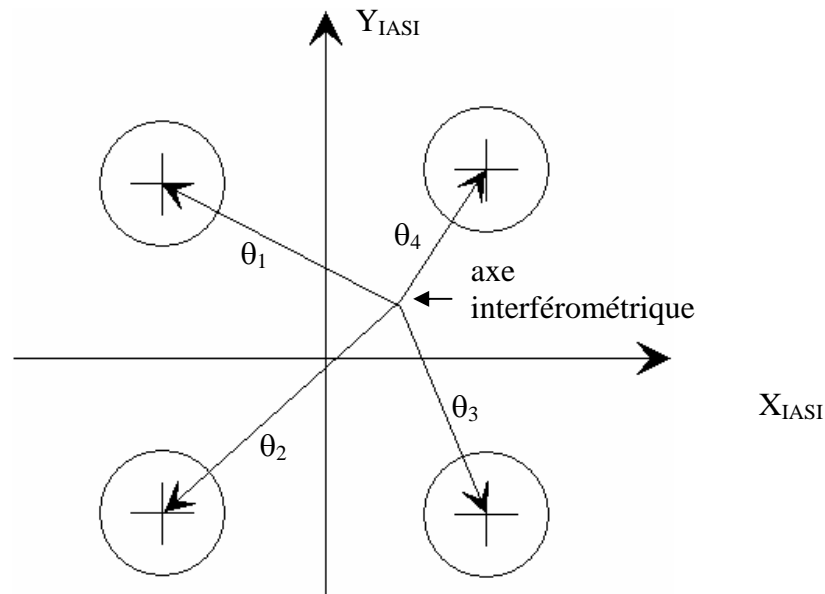


Figure 3.18 – Détermination de l’axe interférométrique

Si on reprend le raisonnement de la section précédente, on voit que le spectre qui est obtenu à partir des mesures du pixel i est décalé par rapport à la réalité d’une quantité

$$\Delta \nu_i(\nu) = \nu - \nu_i = (1 - \cos(\theta_i))\nu \quad (12)$$

où θ_i est l’angle entre la direction de l’axe interférométrique et le centre du pixel i .

Cette quantité $\Delta \nu_i$ peut être déterminée pour certains nombre d’ondes ν particuliers. La méthode employée qui est décrite dans la section 5.7.1 consiste à identifier le décalage spectral $\Delta \nu_i$ sur de petites portions de spectres atmosphériques qui contiennent des raies caractéristiques (peignes de raies) dont la fréquence est parfaitement connue.

Dans le cadre de l’approximation où les pixels sont ponctuels, on peut alors déduire directement par la formule (12) la valeur des quatre angles θ_i . Il est ensuite facile de remonter, à partir de ces angles, à la position de l’axe interférométrique par résolution d’un simple système linéaire de 4 équations à 2 inconnues⁴³. Dans la réalité, les pixels ne peuvent pas être considérés comme ponctuels, les décalages spectraux correspondent à une « valeur moyenne » de l’angle θ intégré sur la totalité du pixel. Cette valeur moyenne est déterminée par simulation d’un modèle d’instrument. Ce modèle est capable de prédire la valeur des décalages spectraux pour une position de l’axe interférométrique donnée. Une inversion de ce modèle par une technique ad hoc permet de remonter à la position de l’axe interférométrique à partir de la valeur connue des décalages spectraux pour un nombre d’ondes donné.

Une nouvelle utilisation du modèle dans lequel on introduit la position trouvée fournit alors la fonction de calibration spectrale sur l’ensemble du spectre à partir de sa mesure effectuée pour un seul nombre d’onde

⁴³ La formule (12) place l’axe interférométrique sur un cône centré sur le pixel i et de demi-angle au sommet égal à θ_i . Il faut donc trois de ces mesures pour déterminer la position de l’axe interférométrique sans ambiguïté. Deux mesures seulement fournissent deux positions possibles pour l’axe interférométrique (l’intersection de 2 cercles est constituée de 2 points)

(nominale). L'avantage de cette technique⁴⁴ est qu'elle fonctionne encore lorsque la fonction de calibration spectrale n'est pas constante pour tous les nombres d'ondes.

3.6 APODISATION DES SPECTRES

On a vu dans la section 3.2.3 que le spectre d'une raie monochromatique déterminé par l'instrument IASI est, à cause de la course limitée du coin de cube, un sinus cardinal (voir la figure 3.5). Cette fonction d'appareil a le défaut de présenter des lobes secondaires dont l'amplitude continue à être importante même lorsqu'on s'éloigne fortement de la position de la raie incidente. Une raie peut donc être masquée dans le spectre mesuré par une raie voisine qui aurait une amplitude plus importante.

Afin de résoudre ce type de problèmes, il est classique de corriger ces défauts de la réponse instrumentale en multipliant artificiellement l'interférogramme $I(x)$ par une fonction de poids $w(x)$ dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1 et qui tend vers 0 lorsque x atteint la différence de marche maximum ($\pm \Delta$). Cette fonction est nommée fonction d'apodisation puisqu'en effet son rôle est de supprimer les « pieds » de la fonction d'appareil.

La figure 3.19 ci-dessous montre l'effet de l'application d'une fonction d'apodisation triangulaire sur la réponse instrumentale. En traits fin, on observe la réponse instrumentale brute. En trait gras on observe la réponse instrumentale après qu'on a multiplié l'interférogramme par une fonction porte triangulaire.

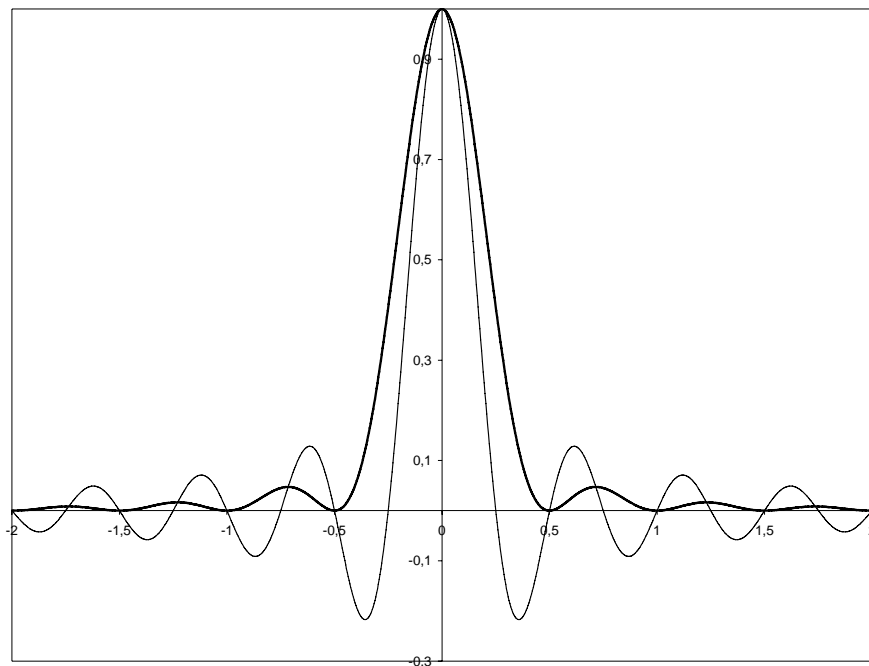


Figure 3.19 – Effet d'une fonction d'apodisation triangulaire

⁴⁴ par rapport à celle, plus simple, qui est décrite au début de cette section

La première conséquence de cette multiplication est, comme on l'a dit précédemment, de diminuer l'amplitude des « pieds » de la fonction d'appareil et surtout d'augmenter fortement la décroissance de leur amplitude lorsqu'on s'écarte du pic de réponse. Il s'agit d'un effet favorable.

Le deuxième effet n'est pas favorable puisqu'il s'agit d'un élargissement de la réponse : en d'autres termes, il s'agit d'une diminution de la résolution spectrale de l'instrument.⁴⁵

De nombreuses fonctions d'apodisation sont analysés dans la littérature dans le but de réaliser le meilleur compromis entre ces deux effets antagonistes. En pratique une fonction gaussienne tronquée, qui supprime quasiment les pieds de la fonction d'appareil est souvent utilisée.

3.6.1 AUTO APODISATION

Si on note x la différence de marche pour un rayon sur l'axe et x' celle correspondant à un rayon incliné d'un angle θ par rapport à l'axe interférométrique de l'instrument, on a (voir §3.5.2)

$$x' = x \cos \theta$$

Si on plaçait une caméra dans le « plan des détecteurs » on observerait donc pour une position du miroir mobile donnée une figure d'interférence constituée de cercles concentriques. Les figures 3.20 a, b et c ci dessous correspondent à la figure d'interférence qui serait observée pour une radiation incidente monochromatique de nombre d'ondes $\nu = 2760 \text{ cm}^{-1}$ correspondant à la plus grande fréquence observée par IASI.

⁴⁵ La figure 3.19 a été tracée en ignorant le fait que la fonction d'instrument doit être normalisée (voir §3.7). En effet, la normalisation dont on peut voir l'effet sur la figure 3.23 rend moins facile la visualisation de l'élargissement de la raie.

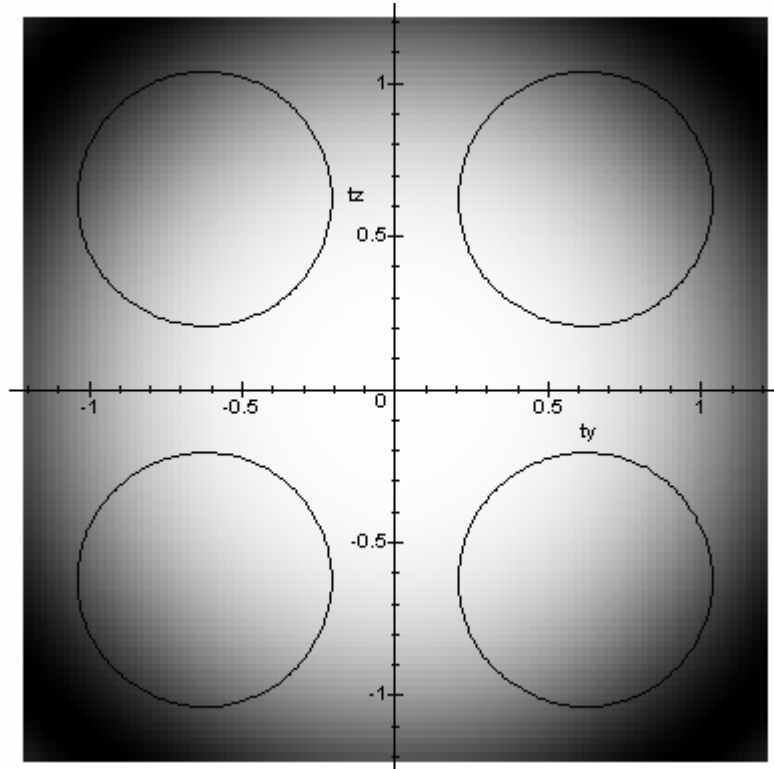


Figure 3.20a – Figure d'interférence dans le « plan des détecteurs » pour $x = 0.5$ cm

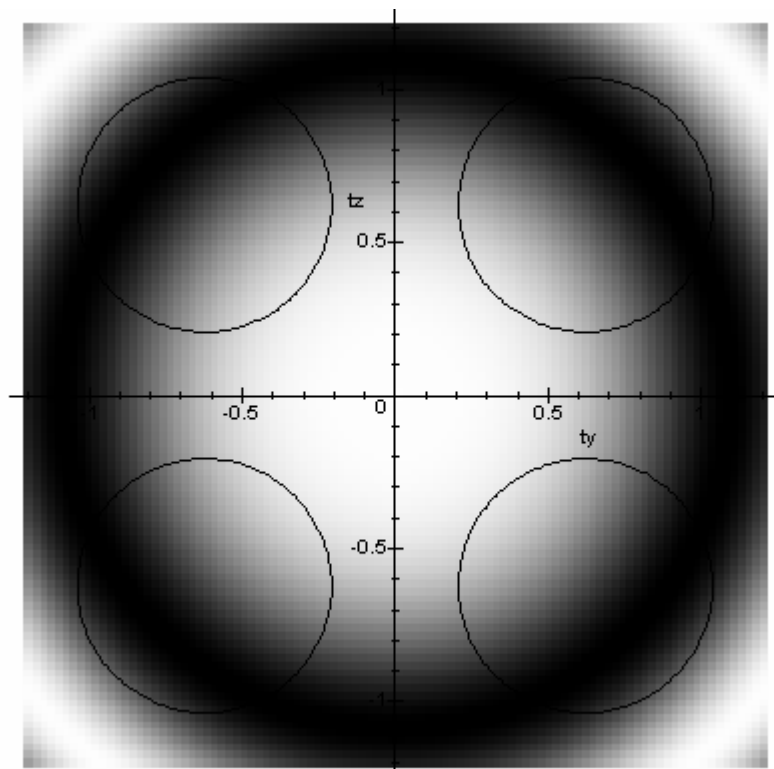


Figure 3.20b – Figure d'interférence dans le « plan des détecteurs » pour $x = 1$ cm

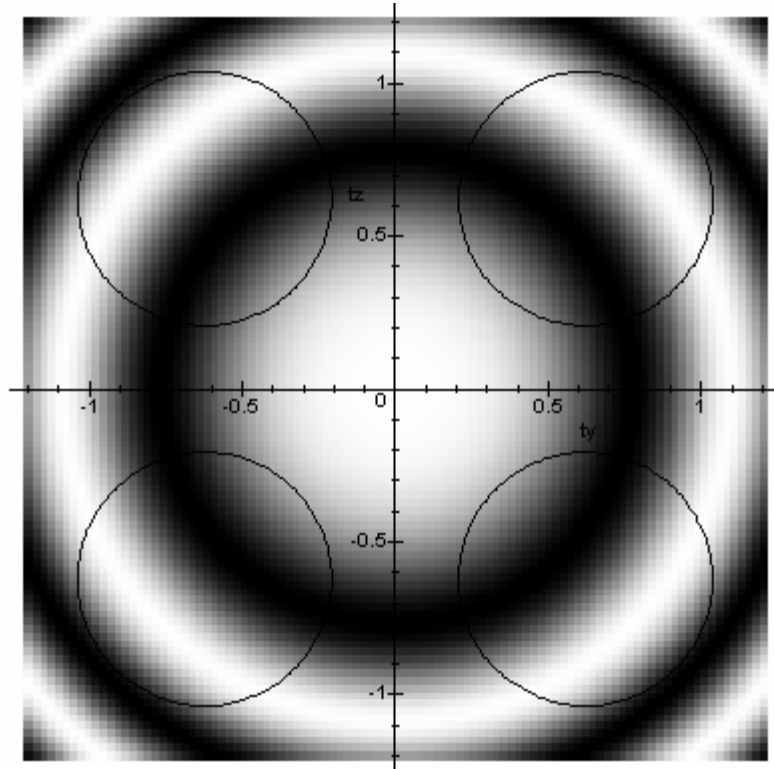


Figure 3.20c – Figure d’interférence dans le « plan des détecteurs » pour $x = 2$ cm

Ces figures permettent de comprendre qualitativement⁴⁶ que l’amplitude de l’interférogramme diminue lorsque la différence de marche augmente (voir la figure 3.21). En effet, au fur et à mesure que la différence de marche augmente, la figure incluse à l’intérieur d’un pixel contient à la fois des zones claires et des zones foncées. Il y a donc un effet de moyenne qui diminue l’amplitude des variations d’éclairement observées lorsque la différence de marche varie.

Cet effet purement instrumental a un effet similaire à la multiplication par une fonction d’apodisation. On parle d’autoapodisation.

Par définition la fonction d’auto apodisation $A(x, \nu)$ de l’instrument vaut

$$A(x, \nu) = \frac{I(x, \nu)}{I_0(x, \nu)} \quad (13)$$

où I est l’interférogramme observé en réponse à une raie incidente de nombre d’ondes ν . I correspond à l’instrument IASI⁴⁷ et I_0 est l’interférogramme théorique défini par la relation suivante⁴⁸

⁴⁶ Pour une compréhension plus précise et plus mathématique de ce phénomène, le lecteur pourra se reporter à l’annexe 6 de ce document qui décrit un modèle mathématique simplifié de l’instrument IASI sous forme de quelques formules analytiques simples. Ce modèle suffit pour comprendre précisément une grande partie des propriétés spectrales de IASI. On pourrait penser l’utiliser dans d’autres contextes : par exemple pour générer des cas tests de validation pour les logiciels du segment sol.

⁴⁷ l’interférogramme mesuré étant réel, on n’a pas accès à la partie imaginaire de la fonction d’auto-apodisation autrement que par modélisation

$$I_0(x, \nu) = e^{-2i\pi x \nu}$$

L'intérêt d'introduire cette notion, outre son utilisation dans les sections suivantes, est que le module de la fonction d'autoapodisation représente l'enveloppe de l'interférogramme réel qui serait obtenu à partir d'une raie monochromatique. Les figures 3.21a et 3.21b ci-dessous présentent l'évolution de cette enveloppe en fonction de la différence de marche x pour 3 nombres d'ondes caractéristiques $\nu = 645 \text{ cm}^{-1}$, $\nu = 2000 \text{ cm}^{-1}$, $\nu = 2700 \text{ cm}^{-1}$. On observe que l'autoapodisation augmente significativement avec le nombre d'onde.

La figure 3.21a est relative à un interféromètre parfait correspondant au modèle simplifié de la section 3.5.1.

La figure 3.21b correspond à un interféromètre qui présente un défaut d'alignement : la trajectoire de l'image CC2' du coin de cube mobile ne passe plus par le coin de cube fixe⁴⁹. On note alors que la position du maximum de l'enveloppe s'est significativement éloignée de la position $x=0$ et que l'interférogramme est alors franchement dissymétrique.

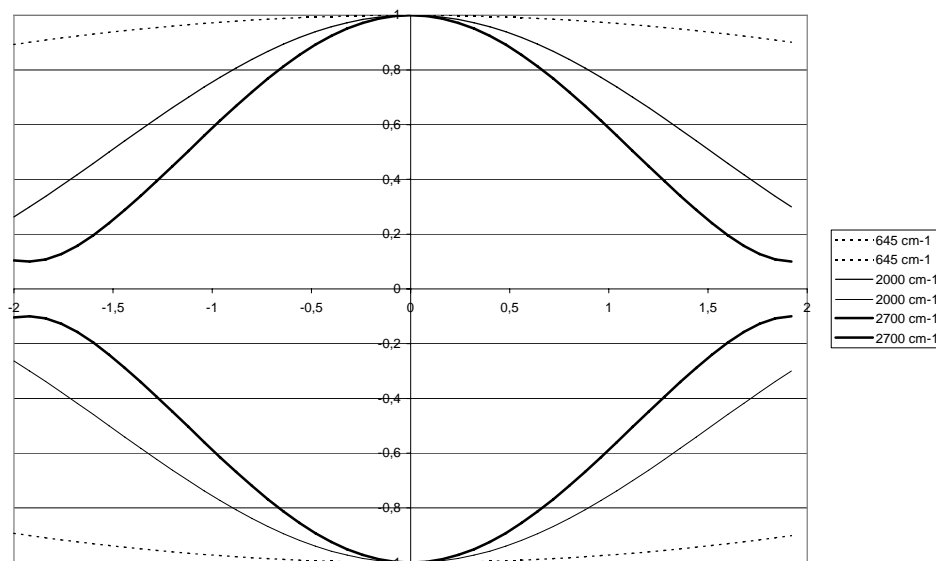


Figure 3.21a – Module de la fonction d'auto-apodisation d'un interféromètre parfait

⁴⁸ c'est la formule (6) appliquée avec $B(\nu) = \delta(\nu)$

⁴⁹ l'écart est appelé offset constant du coin de cube dans les fiches descriptives. On a pris ici un défaut typique égal à $20 \mu\text{m}$

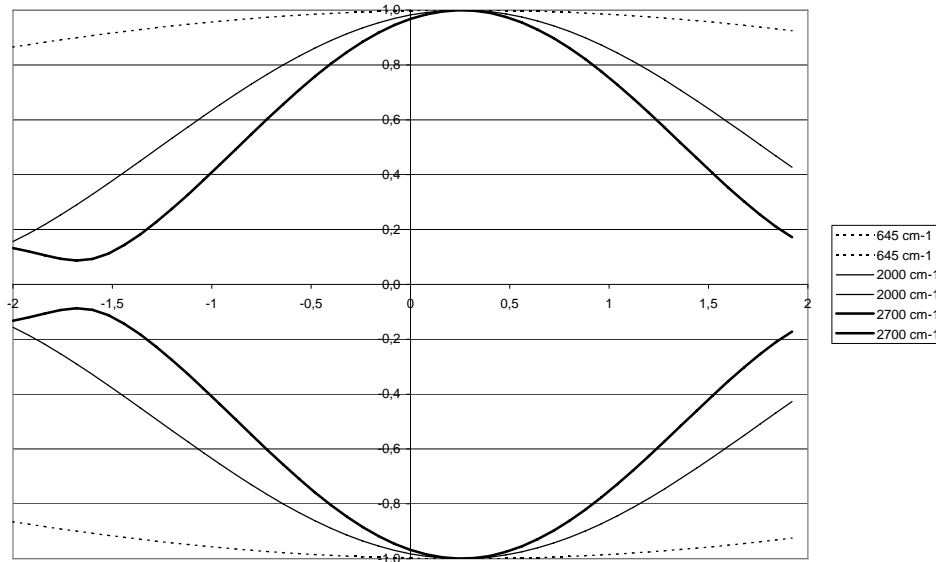


Figure 3.21b – Module de la fonction d’auto-apodisation d’un interféromètre imparfaitement aligné

3.6.2 APODISATION DES SPECTRES 1C

L’apodisation des spectres 1C a pour but de fournir aux utilisateurs finaux des spectres atmosphériques débarrassés de tous les effets instrumentaux ou plus précisément des spectres atmosphériques correspondant à des interférogrammes qui seraient mesurés par un instrument parfait de différence de marche limitée et auxquels on aurait appliqué une fonction d’apodisation donnée (pour le moment il s’agit d’une gaussienne AC).

On vient de voir dans la section précédente que la fonction d’auto apodisation de IASI dépend de la fréquence de la radiation incidente.

Cependant, on négligera dans un premier temps cet effet pour introduire la méthode d’apodisation des spectres 1C.

3.6.2.1 INTRODUCTION : ON IGNORE LA DEPENDANCE DE A AVEC

En présence d’un spectre $S(\nu)$, l’instrument mesure un interférogramme

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu) I(x, \nu) d\nu$$

qui s’écrit, puisqu’on néglige la dépendance en ν de la fonction d’auto apodisation

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu) A(x) I_0(x, \nu) d\nu = A(x) \int_{-\infty}^{\infty} S(\nu) e^{-2i\pi x \nu} d\nu$$

Ce qui s’écrit en appliquant la définition de la transformée de Fourier

$$I = A \cdot TF(S)$$

En se rappelant que le spectre mesuré par l'instrument est donné par la transformée de Fourier inverse de l'interférogramme (voir section 3.2.2), on obtient

$$TF(S_{1B}) = A \cdot TF(S) \quad (14)$$

On veut d'autre part que le spectre transmis aux utilisateurs s'écrive comme la convolution du spectre en entrée avec une fonction d'instrument théorique G donnée

$$S_{1C} = S \otimes G$$

où on a noté \otimes le produit de convolution des deux fonctions.

En passant aux transformées de Fourier ⁵⁰ on obtient

$$S_{1C} = S \otimes G \Leftrightarrow TF(S_{1C}) = TF(S) \times TF(G) \quad (15)$$

Et en éliminant $TF(S)$ entre les équations (14) et (15) on obtient la relation qui permet de calculer S_{1C} à partir de S_{1B} .

$$\boxed{TF(S_{1C}) = TF(S_{1B}) \frac{TF(G)}{A}} \quad (16)$$

La fonction $A_f = TF(G)/A$ est appelée fonction d'apodisation. Le passage des spectres de niveau 1B au niveau 1C se fait en appliquant la formule (16)

3.6.2.2 PRISE EN COMPTE DE LA DEPENDANCE EN ν DE A

On a vu que la fonction d'autoapodisation A dépend de ν ⁵¹. On peut donc calculer plusieurs spectres S_{1C} à partir de la formule (16) selon la valeur que l'on affecte à ν pour évaluer A dans (16). Plus formellement on peut définir une fonction de deux variables par

$$S(\nu, \mu) = TF^{-1} \left(TF(S_{1B}) \frac{TF(G)}{A_\mu} \right) (\nu)$$

On commence par définir une discrétisation de la bande utile de IASI.

$$\nu_{\min} = \mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_k = \nu_{\max}$$

Le spectre S_{1C} est alors défini pour chaque ν dans l'intervalle $[\mu_i, \mu_{i+1}]$ par interpolation linéaire entre les valeurs $S(\nu, \mu_i)$ et $S(\nu, \mu_{i+1})$. Cela revient à définir approximativement

$$\boxed{\forall \nu \in [\nu_{\min}, \nu_{\max}], S_{1C}(\nu) = S(\nu, \nu)} \quad (17)$$

⁵⁰ Quelques rappels mathématiques sur la transformée de Fourier sont fournis dans l'annexe 5 de ce document.

⁵¹ En dehors de l'effet de champ étendu, on sait qu'il existe d'autres effets optiques internes à l'instrument (chromatisme) qui créent une dépendance en ν de la fonction d'auto apodisation

Les figures 3.22a et 3.22b illustrent l'application de cette formule. On a considéré pour les tracer un spectre (non réaliste) contenant 2 raies situées à 645 cm⁻¹ et 655 cm⁻¹. C'est principalement la largeur de la raie qui distingue les spectres $S(v,645)$ et $S(v,660)$. On voit que le spectre S_{1C} calculé par la formule (17) est confondu sur la figure 3.22a avec $S(v,645)$ alors qu'il est intermédiaire entre les 2 spectres $S(v,645)$ et $S(v,660)$ autour de 655 cm⁻¹. Bien sûr l'effet de l'interpolation est très largement exagéré sur ces figures.

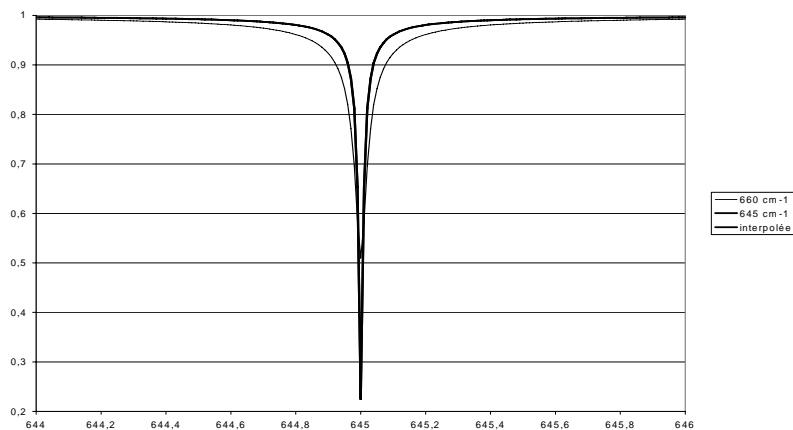


Figure 3.22a – Calcul du spectre 1C par interpolation

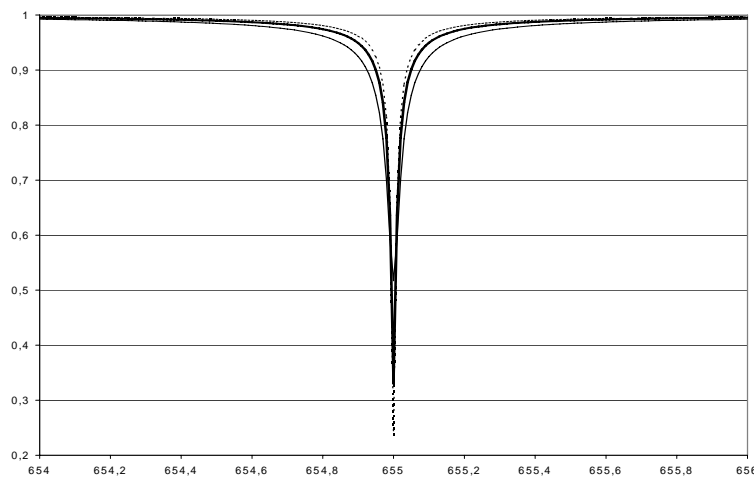


Figure 3.22b – Calcul du spectre 1C par interpolation

On se reportera au § 5.1.5 pour les aspects plus pratiques liés à l'application de cette méthode.

3.7 CALCUL DES FONCTIONS D'INSTRUMENT (ISRF)

La spécification de l'instrument IASI [DR30] définit l'ISRF comme la fonction de poids $I_i(v, v_0)$ ⁵² qui permet de passer d'un spectre infini $S(v)$ au spectre mesuré par IASI $S'(v_0)$. Plus précisément, $I_i(v, v_0)$ est une fonction complexe définie par les relations (18)

⁵² Définie pour les 4 pixels $i = 1, 2, 3, 4$.

$$S'(\nu_0) = Re \left[\int_{-\infty}^{\infty} I_i(\nu, \nu_0) S(\nu) d\nu \right], \text{ avec } \int_{-\infty}^{\infty} I_i(\nu, \nu_0) d\nu = 1 \quad (18)$$

Selon le point de vue, on peut considérer $I_i(\nu, \nu_0)$

- comme une fonction de ν (à ν_0 fixé) qui permet de synthétiser la mesure de l'instrument dans n'importe quel canal ν_0 (point de vue utilisateur). Les fiches d'algorithmes calculent les fonctions ISRF $_{\nu_0}(\nu) = I_i(\nu, \nu_0)$ pour différentes valeurs de ν_0 (tous les 15 cm⁻¹).
- comme la fonction de ν_0 (à ν fixé) qui correspond à la mesure qui serait faite par l'instrument IASI d'une raie laser parfaite à la fréquence ν (point de vue concepteur instrument). Cette fonction est appelée ILS (pour Instrument Line Shape). On a $ILS_{\nu}(\nu_0) = I_i(\nu, \nu_0)$

La figure 3.23 ci-dessous montre l'évolution des fonctions d'instrument de IASI⁵³ pour les 3 nombres d'ondes $\nu = 645 \text{ cm}^{-1}$, $\nu = 2000 \text{ cm}^{-1}$, $\nu = 2700 \text{ cm}^{-1}$. Deux effets principaux sont à noter sur ces figures :

- l'effet de l'autoapodisation qui croît avec ν : augmentation de la largeur de la raie et en conséquence diminution de la hauteur du pic⁵⁴
- la dissymétrie de la fonction d'instrument par rapport au pic, dissymétrie que l'on observe notamment sur la courbe correspondant au nombre d'ondes $\nu = 2700 \text{ cm}^{-1}$. Cet effet est dû à la forme circulaire du pixel et est expliquée en détail dans l'annexe 6.

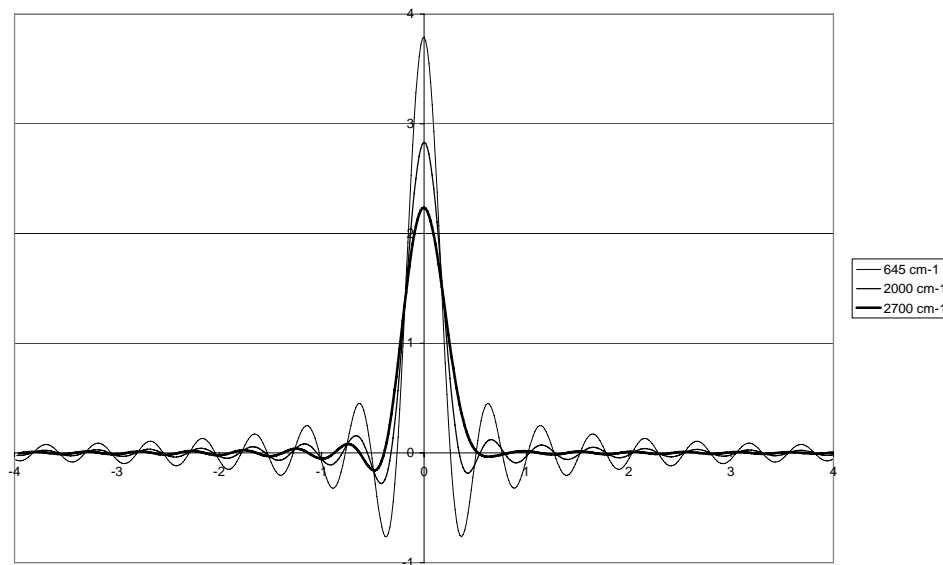


Figure 3.23 – Fonction d'instrument 1B de IASI (modèle simplifié)

Dans le système algorithmique de IASI les fonctions d'instrument sont calculées comme les transformées de Fourier inverses des fonctions d'auto-apodisation⁵⁵. La relation se démontre aisément.

⁵³ recalées sur leur centre de gravité afin de pouvoir les représenter sur un même graphique.

⁵⁴ à cause de la normalisation imposée par l'équation (18)

⁵⁵ plus l'application de la normalisation imposée par l'équation (18) qui est nécessaire puisque $A(0, \nu)$ n'est égale à 1 que dans le cas d'un interféromètre parfait.

Comme pour le développement du calcul des fonctions d'apodisation on commencera par négliger la dépendance des fonctions d'auto-apodisation avec la fréquence de la radiation incidente. On montrera ensuite comment cette dépendance est prise en compte dans le calcul des fonctions d'instrument.

3.7.1 INTRODUCTION : ON IGNORE LA DEPENDANCE DE A AVEC ν

Notation : Dans cette démonstration, on utilise la notation suivante. Soit f une fonction de ν , F sa transformée de Fourier est une fonction de x . On note :

$$F = TF(f), f = TF^{-1}(F)$$

Ainsi que⁵⁶

$$F(x) = TF(f)(x), f(\nu) = TF^{-1}(F)(\nu)$$

Soit donc $A(x)$ la fonction d'auto-apodisation

$$TF^{-1}(A)(\nu_0) = \int_{-\infty}^{\infty} A(x) e^{i2\pi x \nu_0} dx = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x, \mu)}{I_0(x, \mu)} e^{i2\pi x \nu_0} dx$$

avec $I_0(x, \mu)$ l'interférogramme théorique d'une raie à la fréquence μ . D'après la définition on a

$$I_0(x, \mu) = TF(\delta_\mu)(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta_\mu e^{-i2\pi \nu x} d\nu = e^{-i2\pi \mu x}$$

d'où, en réinjectant cette valeur dans la formule précédente et en appliquant la définition de la Transformée de Fourier inverse

$$TF^{-1}(A)(\nu_0) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, \mu) e^{i2\pi x (\nu_0 + \mu)} dx = TF^{-1}(I_\mu)(\nu_0 + \mu), \quad \text{avec } I_\mu(x) = I(x, \mu)$$

En changeant de variable, on obtient finalement la relation cherchée.

$$TF^{-1}(I_\mu)(\nu') = TF^{-1}(A)(\nu' - \mu)$$

Il reste maintenant à relier cette fonction $TF^{-1}(I_\mu)$ à l'ISRF qui est la fonction cherchée

En appliquant la formule de définition (18) au cas $S = \delta_\mu$ (Dirac au nombre d'ondes μ), on obtient le spectre complexe S_μ qui correspondrait à la mesure par l'instrument de la raie monochromatique δ_μ avec

$$S_\mu(\nu_0) = I_i(\mu, \nu_0)$$

Or, par ailleurs

$$S_\mu = TF^{-1}(I_\mu)$$

⁵⁶ cette notation, qui n'est pas forcément très courante, a le mérite d'être logique et de bien faire apparaître les variables dépendantes. Elle est à ma connaissance employée dans certains ouvrages de calcul de structures.

En combinant ces trois dernières équations on obtient le fait que si la dépendance en ν des fonctions d'auto apodisation est négligée alors

$$ISRF(\mu, \nu') = TF^{-1}(A)(\nu' - \mu) \quad (19)$$

Dans cette condition, la simulation du spectre mesuré s'obtient par une convolution. Si on réinjecte la valeur de l'ISRF trouvée précédemment dans la formule (18) on obtient en effet

$$S'(\nu_0) = Re \left[\int_{-\infty}^{\infty} TF^{-1}(A)(\nu_0 - \nu) S(\nu) d\nu \right] \quad (20)$$

ν = nombre d'onde du spectre d'entrée

ν_0 = nombre d'onde du spectre mesuré

3.7.2 PRISE EN COMPTE DE LA DEPENDANCE EN ν DE A

Lorsque le contenu spectral $S(\nu)$ de la radiation incidente n'est pas très étendu on peut utiliser directement la formule (20) pour obtenir une estimation du spectre mesuré par l'instrument.

Dans le cas contraire, cela n'est plus possible. On sait en effet que les fonctions d'auto-apodisation dépendent de la fréquence de la radiation incidente. On note A_μ la fonction d'auto-apodisation calculée pour la fréquence μ (définie par l'équation (13)).

Avec la même discrétisation de la bande utile de IASI que celle qui a été introduite dans la section 3.6.2 pour le calcul des fonctions d'apodisation ($\mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_k$, pas de 15 cm^{-1}), on calcule alors des fonctions d'instrument discrétisées.

$$ISRF(\mu_i, \nu') = TF^{-1}(A_{\mu_i})(\nu' - \mu)$$

Les utilisateurs pourront alors calculer des spectres synthétiques $S'(\nu_0, \mu_i)$ correspondant à un spectre théorique $S(\nu)$ donné en appliquant la formule (20)

Le spectre synthétique S_i sera alors obtenu pour chaque ν_0 dans l'intervalle $[\mu_i, \mu_{i+1}]$ par interpolation linéaire entre $S'(\nu_0, \mu_i)$ et $S'(\nu_0, \mu_{i+1})$. Cela revient approximativement à définir

$$S_i(\nu_0) = S'(\nu_0, \nu_0)$$

3.8 PLACE DE L'ALGORITHME DANS LE SYSTEME

Les algorithmes de traitement des données IASI qui sont décrits dans ce document vont être implantés dans plusieurs éléments du système METOP (voir la figure 3.24).

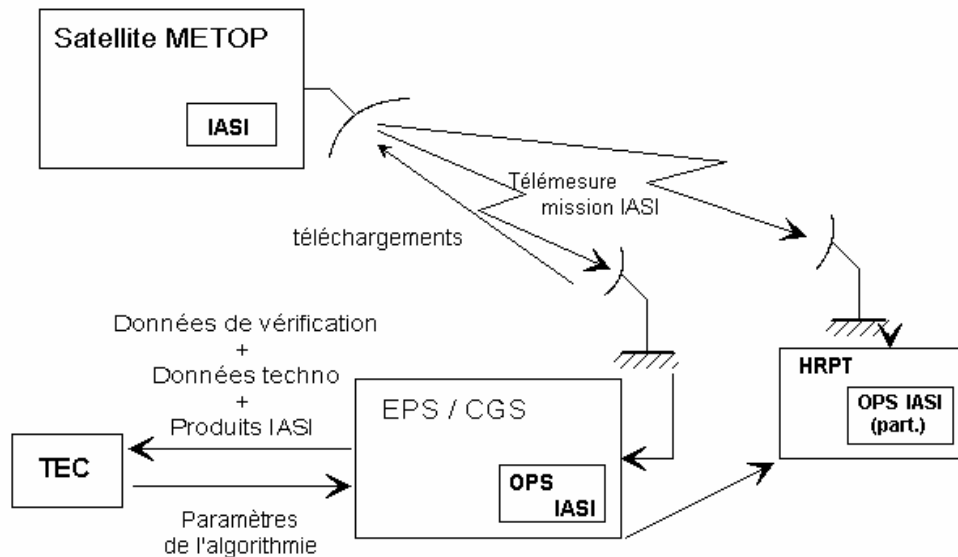


Figure 3.24 – Place de l'algorithmie dans le système IASI

Une partie des algorithmes est implantée à bord dans l'instrument IASI qui transmet au sol des spectres atmosphériques calibrés radiométriquement. Ces spectres sont traités au sol pour fournir des produits (de niveau 1A, 1B ou 1C)⁵⁷. Ce traitement opérationnel a lieu en temps très peu différé ⁵⁸

- soit au centre de traitement du segment sol EPS/CGS (European Polar System / Core Ground Segment),
- soit dans les centres de traitement des stations HRPT⁵⁹ (qui sont des stations de réception directes de la télémessure scientifique de METOP).

Le Centre d'Expertise Technique (TEC) de IASI traite une fraction de la télémessure mission ainsi que des résultats synthétiques élaborés par le logiciel opérationnel de IASI. Ce traitement a pour but de surveiller le comportement en vol de l'instrument et la qualité des produits distribués aux utilisateurs. En cas de dérive identifiée du comportement de l'instrument conduisant à une dégradation de performance non acceptable, la TEC recalcule les paramètres de l'algorithmie⁶⁰ permettant de restaurer la qualité des produits. Ces mêmes moyens sont utilisés lors de la recette en vol. On mettra à jour les paramètres qui ont été initialisés une première fois lors de la recette sol de l'instrument afin d'optimiser la performance du système IASI.

Il est nécessaire de s'assurer de la cohérence des paramètres utilisés par les différentes entités du système. Par exemple, les stations de réception sol doivent utiliser lors du décodage les mêmes tables que celles qui ont été employées à bord pour le codage des spectres. Le mécanisme mis en place pour assurer cette cohérence est le suivant :

⁵⁷ Voir § 5.1 pour les niveaux de produit.

⁵⁸ Le CGS traite les données missions enregistrées à bord lorsque le satellite n'est pas en visibilité d'une station de réception. Les données acquises en direct lors des passages sur l'Europe sont retransmises après stockage temporaire dans la mémoire qui fonctionne alors comme un tampon.

⁵⁹ la mise en place des algorithmes de traitement des données IASI dans les HRPT est du ressort d'Eumetsat

⁶⁰ On trouvera en annexe 1 la liste des données manipulées par les algorithmes du système IASI.

			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 61 of : 502
---	---	--	---

- la TEC est le seul responsable de la définition et du maintien de la configuration des paramètres de l'algorithmie IASI,
- Un identificateur de configuration est associé à chaque mise à jour des paramètres. L'identificateur de la configuration courante est diffusé dans la télémesure IASI.

Cet identificateur est téléchargé dans le logiciel de vol de IASI qui le recopie dans la télémesure mission. Lorsque les paramètres modifiés sont des tables de données utilisées à bord, la mise à jour de l'identificateur de configuration est synchrone de la modification des données.

Les valeurs des paramètres de l'algorithmie correspondant à une configuration donnée sont calculées à la TEC et transmis par celle-ci au CGS. Celui-ci a la charge de les diffuser tous les utilisateurs du système EPS avant la mise à jour effective de la configuration qui sera indiquée par le changement de l'identificateur de configuration.

Partage bord/sol : Comme on peut le voir à la lecture du § 4 une part importante du traitement des données sondeur est effectuée à bord de l'instrument. L'objectif de ce traitement est de réduire d'un facteur 30 environ le volume des données à transmettre. L'analyse ayant conduit à ce partage est présentée dans [DR24].

Deux grandes solutions subsistaient après une première analyse :

1. transmission des interférogrammes bruts compressés,
2. transmission des spectres calibrés radiométriquement.

C'est la deuxième qui a été choisie devant l'impossibilité de trouver des algorithmes inversibles permettant d'obtenir le taux de compression requis.

Afin d'assurer la cohérence des données échangées dans le système IASI et de minimiser les risques d'erreur la spécification système demande que tous les sous-systèmes travaillent en unité S.I. Les produits destinés aux utilisateurs pourront néanmoins être fournis dans les unités usuelles (en fonction de la décision d'Eumetsat qui est responsable du formatage des produits).

4. TRAITEMENTS BORD

4.1 ARCHITECTURE GENERALE

La figure 4.1 décrit sous forme de schéma bloc l'architecture générale de l'algorithmie bord. Ce schéma représente le traitement réalisé sur les données d'un seul pixel. Le traitement des 3 autres pixels se fait simultanément en parallèle et de manière complètement indépendante.

Chaque bloc de schéma représente un traitement. Les données principales échangées entre ces traitements sont indiquées sur la partie droite de la figure.

Certains blocs de ce diagramme correspondent à un regroupement logique de plusieurs algorithmes. La décomposition en algorithmes élémentaires de ces blocs est présentée dans les sections suivantes.

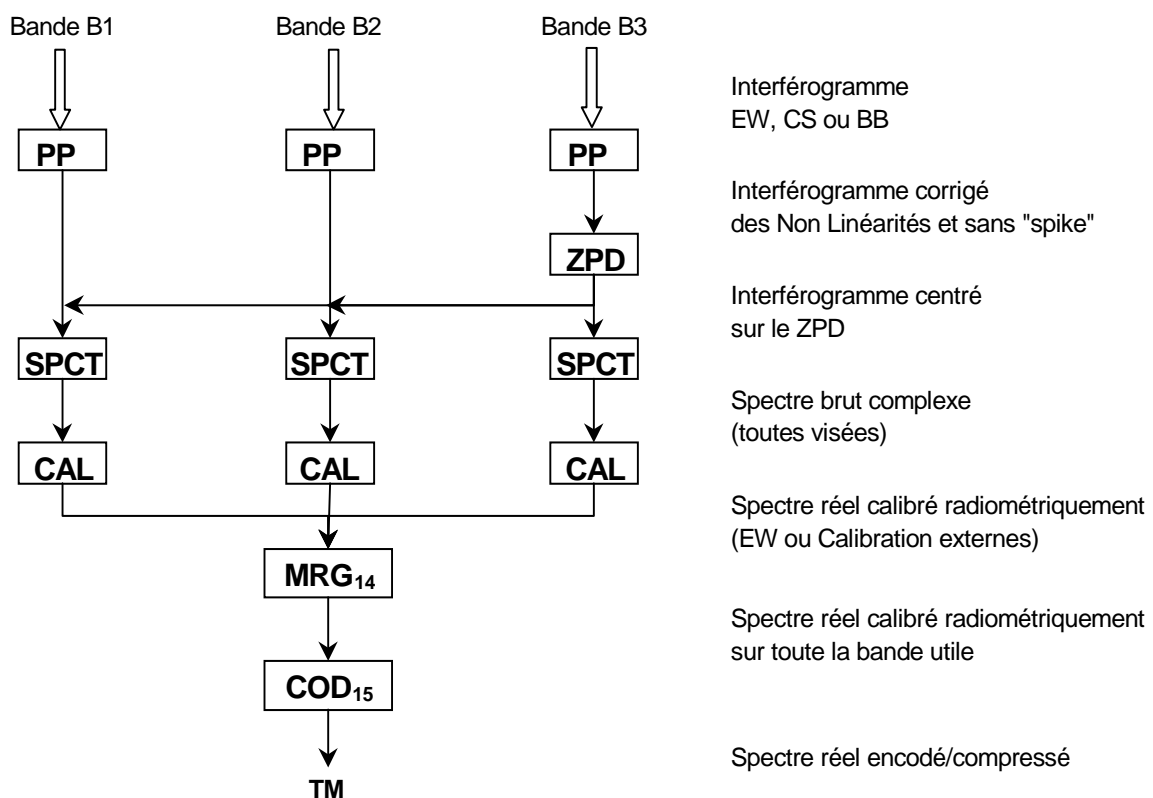


Figure 4.1 – Architecture générale de l'algorithmie bord

Le schéma général est un traitement parallèle et identique des trois bandes B1, B2 et B3 jusqu'à la calibration radiométrique. Le découpage en blocs jusqu'à ce niveau suit la description logique des principes de

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 63 of : 502
---	---	---	---

fonctionnement de l'instrument IASI décrit dans les sections 3.2 et 3.3. La seule nouveauté est l'introduction d'un bloc prétraitement⁶¹ PP (pour « Pré Processing »). Le rôle des différents blocs est le suivant :

- **PP** : fournit des interférogrammes « propres » c'est à dire corrigés des non linéarités connues de l'instrument et identifie les interférogrammes perturbés par des mesures aberrantes (*spikes*).
- **ZPD** : détermine le numéro de l'échantillon central des interférogrammes
- **SPCT** : détermine le spectre brut complexe par un calcul de FFT (Fast Fourier Transform)
- **CAL** : met à jour les coefficients de calibration radiométrique et les applique au spectre brut pour fournir un spectre réel calibré.

Les trois spectres réels obtenus après la calibration radiométrique couvrent dans leur ensemble la bande utile (645 à 2760 cm⁻¹). Ces trois spectres sont ensuite combinés par l'algorithme MRG puis encodés pour être transmis au sol sous forme compressée par l'algorithme COD.

La seule différence de traitement entre les trois bandes provient de la détermination du NZPD qui est effectuée sur les données d'une seule bande. On utilise nominaleme nt B3. En effet la sensibilité obtenue sur cette détermination est meilleure pour les nombres d'ondes élevés comme le montre la formule (10).

En mode calibration externe, les traitements bord sont identiques au mode normal. Les traitements décrits pour les visées terre (EW dans les fiches de description d'algorithme) s'appliquent donc aussi à toutes les données qui peuvent être sélectionnées dans ce mode⁶².

4.2 RELATION AVEC LES ALGORITHMES SOL

La plupart des algorithmes bord utilisent des tables de données qui sont initialisées avant le vol et éventuellement réactualisées ensuite. Les algorithmes décrivant l'initialisation de ces tables sont représentés en pointillés sur la figure 4.2 ci-dessous.

⁶¹ Dans la documentation IASI, la détermination du NZPD est généralement incluse dans les prétraitements. On l'a ici extrait pour mettre en valeur son importance dans l'algorithmie d'une part et d'autre part pour faire apparaître explicitement que ce traitement est appliqué sur les données d'une bande spectrale uniquement.

⁶² visées terre, mais aussi espace froid 1 et 2, corps noir chaud et face arrière du miroir de scan

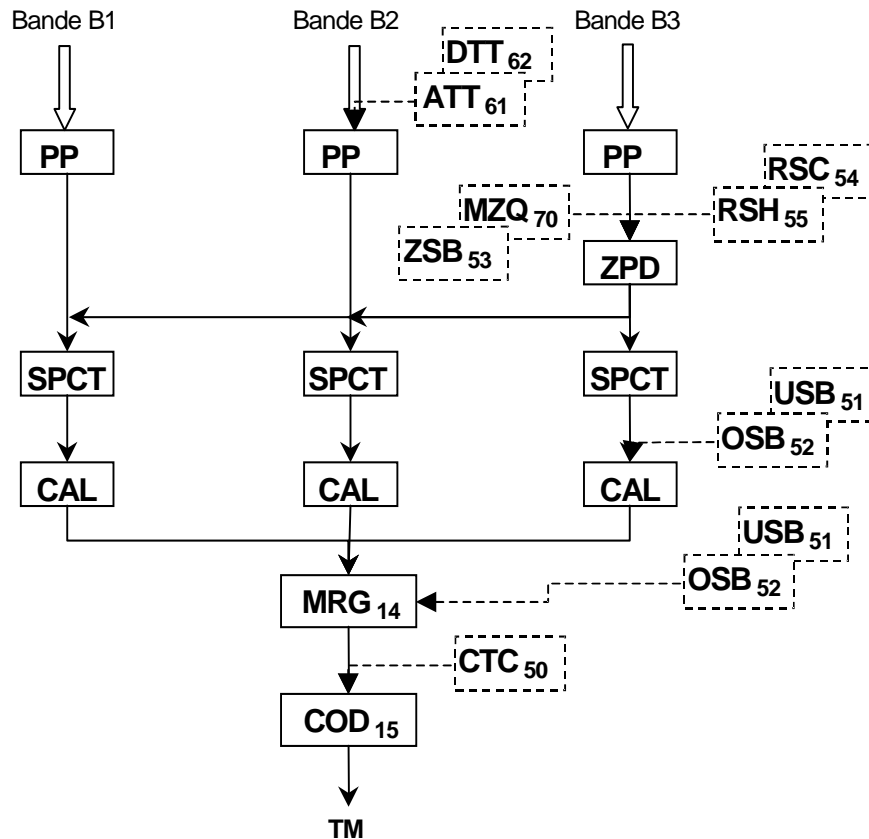


Figure 4.2 – Relations algorithmie bord / algorithmie sol

La suite de ce chapitre est maintenant consacrée à la description détaillée du principe de fonctionnement des différents blocs.

4.3 PRETRAITEMENTS

Le bloc prétraitement est constitué simplement de l'enchaînement de deux algorithmes

NLC₂ : corrige les interférogrammes des non linéarités connues de la chaîne de détection et ramène les valeurs échantillonnées dans une dynamique 16 bits.

SPK₃ : identifie les interférogrammes qui sont affectés par des mesures aberrantes. Celles-ci peuvent être dues par exemple à l'interaction d'un ion lourd avec les équipements de la chaîne de détection.

4.3.1 ALGORITHME NLC₂ « CORRECTION DES NON LINEARITES »

L'algorithme NLC ayant été particulièrement optimisé par l'industriel, la fiche correspondante est assez difficile à lire. On trouvera dans les sections 4.3.1.2 et 4.3.1.3 les clés permettant d'appréhender un peu plus facilement le fonctionnement de cet algorithme. La section 4.3.1.1 ci-dessous décrit le modèle de la chaîne de détection sur lequel repose le fonctionnement de l'algorithme.

4.3.1.1 MODELE DE LA CHAÎNE DE DETECTION

Le fonctionnement de l'algorithme NLC repose sur le modèle fonctionnel de la chaîne de détection qui est décrit par la figure 4.3.

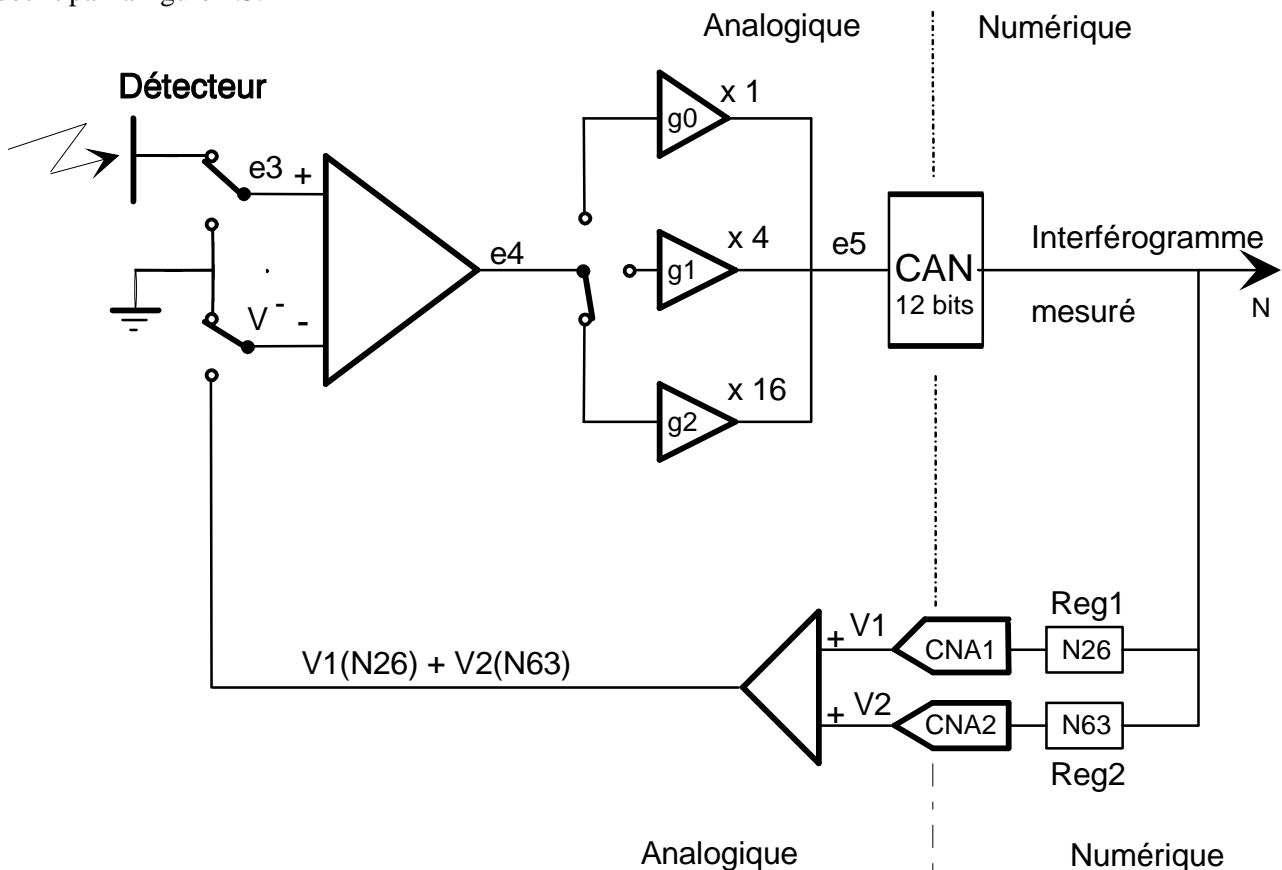


Figure 4.3 – Modèle fonctionnel de la chaîne de détection pour NLC₂

Le signal analogique en sortie du détecteur est ramené à une valeur moyenne proche de zéro par soustraction d'une valeur correspondant à la ligne de base. Une estimation grossière de cette ligne de base est déterminée comme la valeur d'un des premiers points de l'interférogramme (échantillon 26), ensuite une correction fine de cette ligne de base est effectuée sur l'échantillon 63. Sans rentrer ici dans le détail du mécanisme déterminant cette valeur, il faut savoir qu'il faut un certain temps (correspondant à environ 100 échantillons) pour que cette valeur soit stabilisée et que l'interférogramme numérisé soit utilisable.

Le signal est ensuite envoyé sur une des trois voies d'amplification selon son amplitude (ce qui correspond à une multiplication par 1, 4 ou 16). Puis il est numérisé sur 12 bits. La résolution avec laquelle le signal est numérisé dépend donc de la voie d'amplification utilisée.

- voie 0 (gain 1) : résolution équivalente 12 bits
- voie 1 (gain 4) : résolution équivalente 14 bits
- voie 2 (gain 16) : résolution équivalente 16 bits.

La très grande majorité des valeurs de l'interférogramme étant de faible niveau (donc passant par la voie 2) on obtient finalement une performance proche de celle qui serait obtenue avec un numériseur 16 bits.

L'interférogramme brut transmis par la chaîne d'acquisition au traitement bord est constitué de la succession des couples « voie d'amplification / donnée sur 12 bits » correspondant à chaque valeur échantillonnée. La valeur sur 12 bits de la ligne de base est aussi transmise, cette valeur correspond toujours à la voie d'amplification 0 (gain 1).

4.3.1.2 CORRECTIONS DE NON LINEARITE

La non linéarité de la chaîne de détection est décomposée en 3 parties :

- Non linéarité basse fréquence en amont du numériseur
- Non linéarité haute fréquence du numériseur
- Non linéarité basse fréquence du numériseur

On se reporte à la figure 4.3 pour les notations.

On appelle correction de non linéarité du numériseur la fonction qui permet de passer des comptes numériques mesurés par le MAS à la tension en entrée du numériseur (notée e_3 sur la figure). Pour simplifier, on « oublie » dans cette description les offsets.

$$e_3 = nl_{num}(p, MV, N)$$

où

- p est le numéro de la voie d'amplification,
- MV la valeur de la ligne de base,
- N le compte numérique (12 bits) mesuré par la chaîne d'acquisition.

Cette correction est décomposée en 2 parties (haute fréquence et basse fréquence). La partie HF ne dépend que du CAN. On obtient donc

$$e_3 = f_{BF}(p, MV, N + f_{HF}(N))$$

On appelle correction de non linéarité analogique amont la fonction qui permet de passer de la tension e_3 au flux Φ sur le détecteur.

$$\Phi = f_{amont}(e_3)$$

Les non linéarité basse fréquence (fonctions f_{BF} et f_{amont}) sont modélisées par des fonctions linéaires par morceau définies par 128 segments de droites. Il faut noter qu'il y a 3 tables de non linéarité amont (une par voie d'amplification) qui combinent les effets de l'électronique en amont l'amplificateur différentiel et du détecteur.

L'algorithme de correction de non linéarité consiste à soustraire les effets de non linéarité connus dans l'ordre inverse de leur introduction par les équipements de la chaîne de détection.

L'algorithme NLC contribue pour une part importante au budget CPU du DPS. Des optimisations ont donc été nécessaires.

4.3.1.3 OPTIMISATIONS

Optimisation 1

Le nombre de point d'un interférogramme (51200 + les marges) étant largement plus important que le nombre possible de codes (3*4096 valeurs), il devient intéressant de précalculer $\Phi(p, N)$ pour toutes les possibilités de codes qui sont possibles en sortie du numériseur. C'est ce qui est fait dans la deuxième page de pseudo-code. Ensuite l'évaluation de la fonction se fait par une simple consultation de table (table R3).

Optimisation 2

Les fonctions de correction f_{BF} , et f_{amont} sont implémentées dans l'algorithme NLC_2 comme des fonctions linéaires par morceau (128 segments de droite). Pour calculer la valeur de ces fonctions en un point, il est nécessaire d'abord de déterminer le segment dans lequel ce point tombe. Cette détermination nécessite une division⁶³ même dans le cas simple d'une subdivision régulière de l'intervalle de définition.

Pour éviter cette division la fonction nl_{num} est mise à l'échelle pour prendre ses valeurs entre 0 et 128. De cette façon, on connaît par une simple troncature le numéro de segment dans la table qui définit f_{amont} (c'est le calcul $m=Partie\ Entière(R2)$).

Optimisation 3

Pour minimiser les transferts entre le bord et le sol, la table définissant $f_{HF}(N)$ est codée en entier sur un faible nombre de bits (avec une résolution de 1/16 de comptes compatible avec le résidu de correction à apporter en sus de la correction BF).

4.3.2 ALGORITHME SPK_3 « DETERMINATION DES SPIKES »

Le fonctionnement de l'algorithme de détection des spikes [DR17] repose sur le fait que

- le signal de IASI est fortement suréchantillonné (voir la section 3.3) par rapport au critère de Nyquist,
- un spike crée une perturbation à haute fréquence puisqu'il ne perturbe qu'un seul échantillon de l'interférogramme.⁶⁴

Le point 1 précédent entraîne qu'il existe une bande entre la plus haute fréquence du signal utile et la fréquence de coupure du filtre anti-repliement, bande dans laquelle on ne devrait trouver aucune énergie.

L'algorithme de détection des spikes applique un filtre passe-haut sur l'interférogramme qui élimine le signal utile et teste l'amplitude (l'énergie) du signal résiduel. Si cette énergie dépasse un certain seuil défini par le sol, celle-ci est attribuée à un « spike ». Un drapeau est alors levé et transmis aux algorithmes qui travaillent en aval (bord ou sol) afin de prévenir l'utilisation de données aberrantes.

L'analyse présentée dans [DR17] indique qu'un filtre linéaire de poids 5 est suffisant pour détecter les spikes affectant la plus grande partie des échantillons de l'interférogramme, sans introduire de fausses détections. Pour les échantillons les plus proches de la frange centrale, en revanche, le filtre de poids 5 générera des détections erronées. Il est nécessaire d'utiliser un filtre plus raide comportant 13 poids pour améliorer la discrimination.

4.4 DETERMINATION DU NZPD

Les algorithmes ZPD_4 , IRS_5 et FRS_6 permettent de sélectionner un échantillon central de numéro NZPD dont la position relative par rapport au point de différence de marche nulle (ZPD réel) soit la même pour tous les interférogrammes d'un même pixel (pour toutes les visées). Cette condition est nécessaire pour que la calibration radiométrique des spectres fonctionne (cf. §3.3.2).

⁶³ ou une multiplication

⁶⁴ Cependant il faut être conscient que le filtre anti-repliement a pour effet d'étaler un spike éventuel sur quelques échantillons consécutifs

Le principe de la détermination du NZPD a été exposé dans la section 3.3.3, il ne sera pas rappelé ici. On discute en revanche de façon plus détaillée les aspect initialisation et surveillance du fonctionnement de ce groupe d'algorithmes.

Ces algorithmes travaillent sur les spectres d'une seule bande qui est nominale la bande B3. La figure 4.4 montre l'enchaînement de ces algorithmes. Pour la clarté on a séparé le traitement des trois types d'interférogrammes :

- référence espace froid
- référence corps noir chaud
- visée d'observation (nominale une visée terre mais on rappelle qu'en mode calibration externe cet interférogramme peut être celui d'une visée espace froid, d'une visée corps noir ou d'une visée sur la face arrière du miroir)

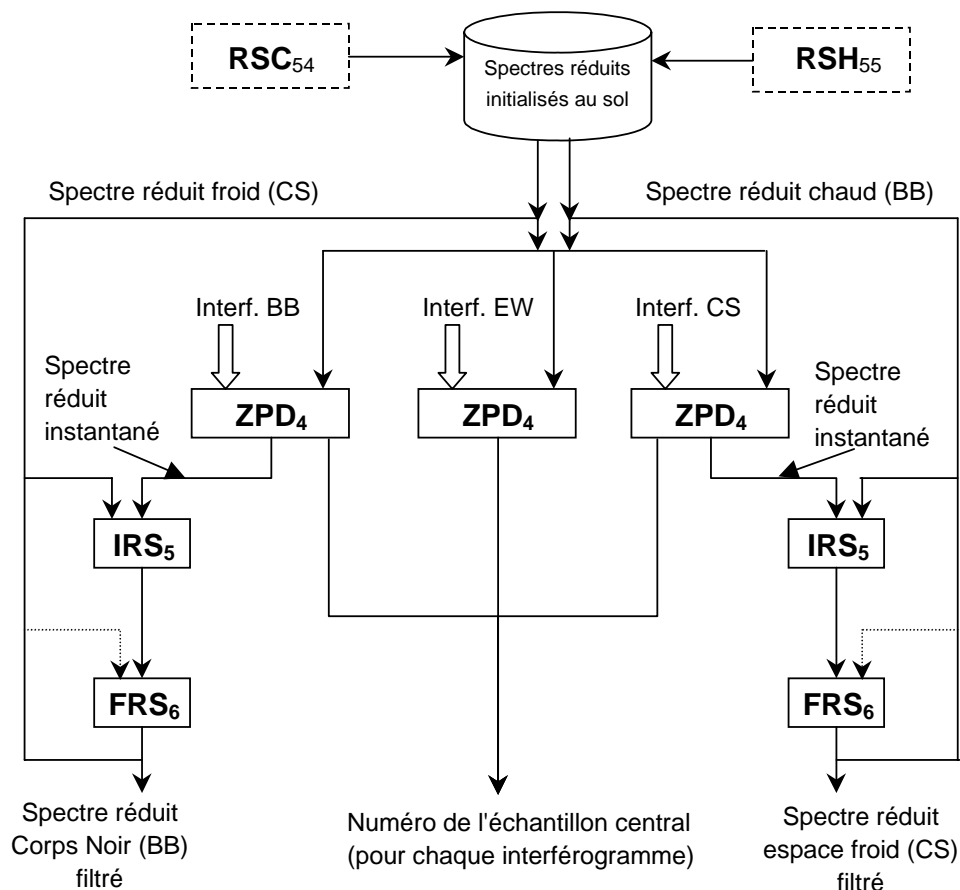


Figure 4.4 – Détermination du NZPD

Pour tous les types de visées, l'algorithme ZPD₄ commence par déterminer le spectre réduit de l'interférogramme en cours de traitement. Ceci est réalisé pour différentes valeurs possibles du NZPD. La valeur du NZPD transmise aux algorithmes en aval est celle qui minimise la distance à la droite de calibration⁶⁵ définie selon la méthode décrite à la fin du § 3.3.1.⁶⁶

⁶⁵ qui est définie implicitement par la donnée des spectres réduits froids et chauds

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 69 of : 502
---	---	--	---

Les spectres réduits calculés pour cette valeur du NZPD et correspondant aux visées de calibration Espace Froid ou Corps Noir Chaud sont appelés spectres réduits instantanés.

Ces spectres réduits instantanés des visées de calibration sont affectés par le bruit des mesures élémentaires. Un filtre linéaire du premier ordre⁶⁷ qui est décrit par l'algorithme FRS₆ est appliqué sur chaque valeur échantillonnée pour obtenir les spectres réduits filtrés.

Ce sont ces spectres réduits filtrés qui sont utilisés par l'algorithme ZPD₄ pour définir la droite de calibration.

Le lecteur attentif aura noté de lui-même qu'on semble se trouver en présence d'un « cercle vicieux » : pour pouvoir obtenir des spectres réduits, il faut être capable de déterminer les NZPD qui eux-même ne peuvent être calculés que si on dispose déjà des spectres réduits. Pour démarrer le processus, les spectres réduits initiaux ont été calculés au sol au moyen des algorithmes RSC₅₄ et RSH₅₅.

Afin de prévenir une corruption de la droite de calibration qui est définie implicitement par ces deux spectres réduits un test de vraisemblance est réalisé par l'algorithme IRS₅. Ce test vérifie tout simplement que la valeur instantanée n'est pas trop éloignée de la valeur filtrée. En cas d'échec, la mise à jour des spectres réduits n'est pas effectuée⁶⁸. Lorsqu'un des 2 spectres réduits ne peut pas être mis à jour, le deuxième n'est pas, lui non plus remis à jour.

Dans le cas où le test échoue sur plusieurs lignes successives (nombre d'échecs modifiable), les spectres réduits filtrés sont réinitialisés avec leur valeur initiale qui a été déterminée par le sol.

4.5 CALCUL DES SPECTRES BRUTS

Le calcul des spectres bruts est simplement constitué de l'enchaînement de 2 algorithmes. Le premier ISI₇ extrait simplement le nombre d'échantillons nécessaires de l'interférogramme qui sont centrés autour du NZPD. Le numéro d'échantillon NZPD a été déterminé par les algorithmes décrits en 4.3.

L'algorithme FFT₈ qui réalise le calcul des quantités définies par la formule (9c) selon une méthode classique (algorithme de Cooley-Tuckey à radix multiples) qui n'est pas spécifiée ici dans le détail. L'ordre des données d'entrée et de sortie de l'algorithme est en revanche spécifié : c'est l'ordre naturel. *Il est en effet nécessaire de garantir la cohérence des tables téléchargées (par exemple les tables utilisées pour la combinaison des bandes) avec l'ordre du spectre*

4.6 CALIBRATION RADIOMETRIQUE DES SPECTRES

La calibration radiométrique des spectres bruts est réalisée par les cinq algorithmes CRC₁₀, RCI₁₁, FRC₁₂, PLK₉ et ARC₁₃ dont l'enchaînement est décrit par la figure 4.5 ci-dessous.

⁶⁶ Pour chaque interférogramme, l'algorithme ZPD₄ détermine le NZPD qui est le numéro de l'échantillon le plus proche du ZPD optique. L'algorithme commence à rechercher le maximum de l'interférogramme entre les échantillons IMzqNsfirstCF et IMzqNslastCF. Ensuite le NZPD est recherché autour de ce maximum dans une zone de largeur 2*IDefZpdNstepSrdFT.

⁶⁷ dont la constante de temps vaut typiquement 80 secondes

⁶⁸ Note : on décrit ici ce mécanisme pour la compréhension globale. Cependant il ne faut pas le rechercher dans les fiches descriptives de ce document mais dans la spécification des algorithmes bord [DR2]. Le nombre d'occurrences de ces échecs de mise à jour est transmis au sol

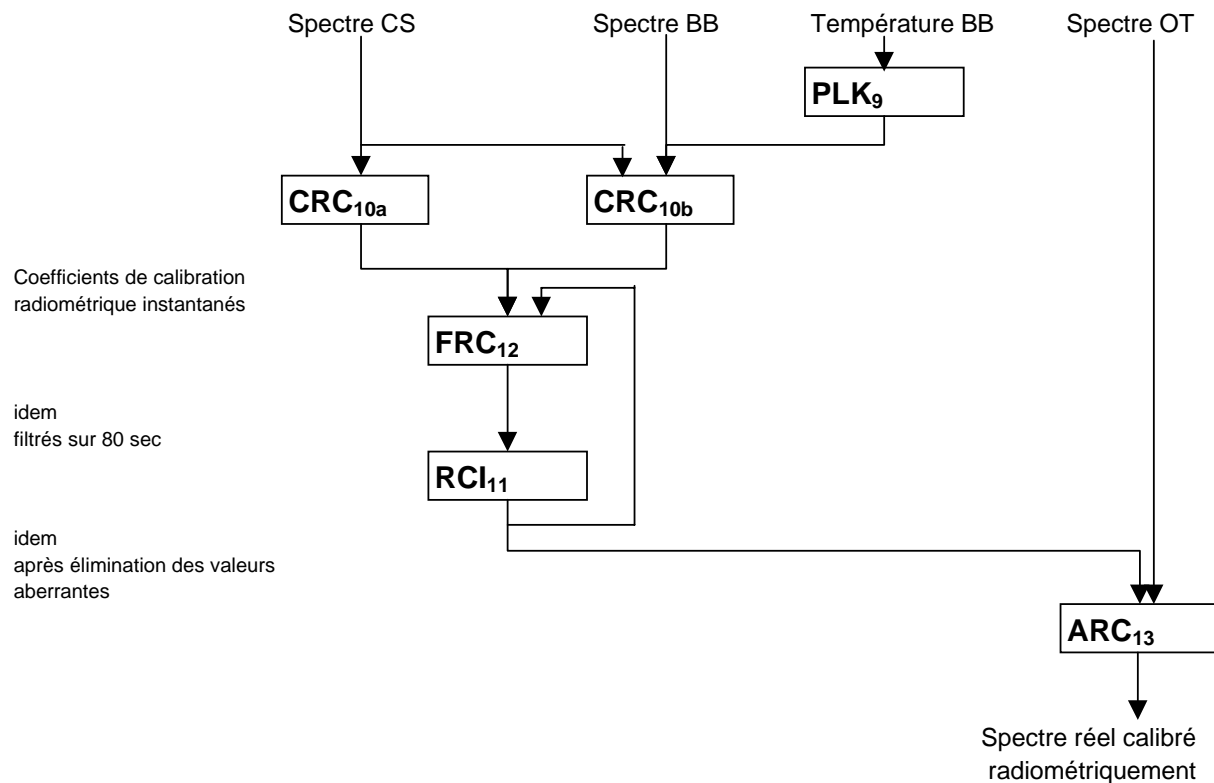


Figure 4.5 – Bloc calibration radiométrique des spectres

Le principe de la calibration radiométrique a été déjà largement présenté dans la section 3.3.2 on ne le rappelle pas ici. Cette section aborde en revanche les aspects initialisation et surveillance associés à ce groupe d’algorithmes. Une description plus complète concernant ces aspects se trouve dans le document [DR2].

Les coefficients de la droite de calibration⁶⁹ sont calculés par l’algorithme CRC₁₀ au moyen de la formule (11) de la section 3.3.2 à partir des spectres bruts produits par l’algorithme FFT₈ et de la valeur du spectre du corps noir chaud calculé par PLK₉⁷⁰. Ce sont les *coefficients de calibration instantanés*.

Bien entendu, ces coefficients ne sont pas calculés pour tous les nombres d’ondes des spectres brut, mais seulement pour les échantillons qui tombent dans la bande utile⁷¹. Cette sélection est faite, non seulement pour réduire le temps nécessaire pour tous les calculs qui sont effectués en aval, mais aussi et surtout pour éviter tout risque de division par 0 dans la formule (11). On pourrait avoir ce problème si par le plus grand des hasards on avait $S_{BB}(\nu) = S_{CS}(\nu)$. Cette situation pourrait éventuellement se produire (avec une probabilité sans doute

⁶⁹ coefficients $A(\nu)$ et $B(\nu)$ dans la formule (11)

⁷⁰ la température du corps noir T_{BB} utilisée dans cette formule est envoyée au sol dans la télémessure scientifique (measurement data).

⁷¹ Rappel : pour chaque pixel, il y a 3 spectres bruts calculés à bord (1 pour B1, 1 pour B2, 1 pour B3). Chacun de ces spectres est calculé en $N=51200$ points ν_n .

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 71 of : 502
---	---	--	---

très faible il faut le reconnaître) pour des nombres d'ondes en dehors de la bande en cours de traitement. Dans ce cas en effet, les deux spectres ne sont différents qu'à cause ou grâce au bruit radiométrique.

Les variables décrivant les bandes utilisées par tous les algorithmes de cette section ainsi que par l'algorithme MRG₁₄ décrit dans la section suivante sont détaillées dans la section 4.9. Elles sont initialisées par l'algorithme OSB₅₂ afin d'éviter de rencontrer en vol le problème évoqué ci-dessus.

Ces coefficients de calibration instantanés sont affectés par le bruit des mesures élémentaires. Afin d'en réduire l'influence, un filtre linéaire du premier ordre⁷² qui est décrit par l'algorithme FRC₁₂ est appliqué sur les coefficients instantanés pour obtenir les *coefficients de calibration filtrés*.

Ce sont ces coefficients filtrés qui sont utilisés par l'algorithme ARC₁₃ pour calculer la valeur du spectre réel calibré au moyen de la formule (11). Cet algorithme détermine de plus le résidu imaginaire qui permet de juger de la qualité de la calibration. Une valeur moyenne synthétique sur toute la bande utile de IASI ainsi que des valeurs plus détaillées par plage spectrale de 100 cm⁻¹ environ sont transmises au sol.

Afin de prévenir une corruption de la droite de calibration un test de vraisemblance des coefficients de calibration instantanés est réalisé par l'algorithme RCI₁₁. Ce test vérifie tout simplement que le coefficient de calibration instantané ne s'éloigne pas trop de la valeur filtrée. Dans le cas où le test échoue, un indicateur d'erreur est levé et la mise à jour des coefficients filtrés n'est pas effectuée⁷³.

Dans le cas où le test échoue sur plusieurs lignes successives (nombre d'échecs modifiable), les coefficients de calibration filtrés sont réinitialisés avec la valeur instantanée. On considère en effet dans ce cas que l'échec de la mise à jour est due à un seuil de détection trop serré par rapport à la vitesse de dérive des coefficients de calibration.

De façon à réduire la durée de convergence du filtre, les coefficients filtrés sont initialisés à la valeur instantanée lors du démarrage du DPS⁷⁴.

4.7 ALGORITHME MRG₁₄ « COMBINAISON DES BANDES »

La calibration radiométrique fournit trois spectres réels correspondant à chacune des bandes B1, B2 et B3 de l'instrument. L'objectif de MRG est de rassembler ces trois spectres élémentaires en un seul qui couvre toute la bande utile de IASI.

La qualité de mesure diminue en bordure de bande car le bruit de mesure augmente à cause de la diminution de transmission des optiques et de sensibilité des détecteurs ainsi qu'on l'a vu dans la section 3.4. La figure 4.6 ci-dessous montre l'évolution du bruit de mesure de l'instrument IASI en fonction du nombre d'ondes (valeurs typiques).

⁷² dont la constante de temps vaut typiquement 80 secondes, comme celle utilisée dans l'algorithme FRS.

⁷³ Note : on décrit ici ce mécanisme pour la compréhension globale. Cependant il ne faut pas le rechercher dans les fiches descriptives de ce document mais dans la spécification des algorithmes bord [DR2]. Le nombre d'occurrences de ces échecs de mise à jour est transmis au sol

⁷⁴ Une lecture rapide de [DR2] pourrait laisser penser que ces coefficients prennent initialement une valeur nulle. Ce n'est pas le cas car on rentre dans la logique de « non update » des coefficient à la première ligne qui suit l'initialisation du DPS (voir [DR2] pour plus de détails).

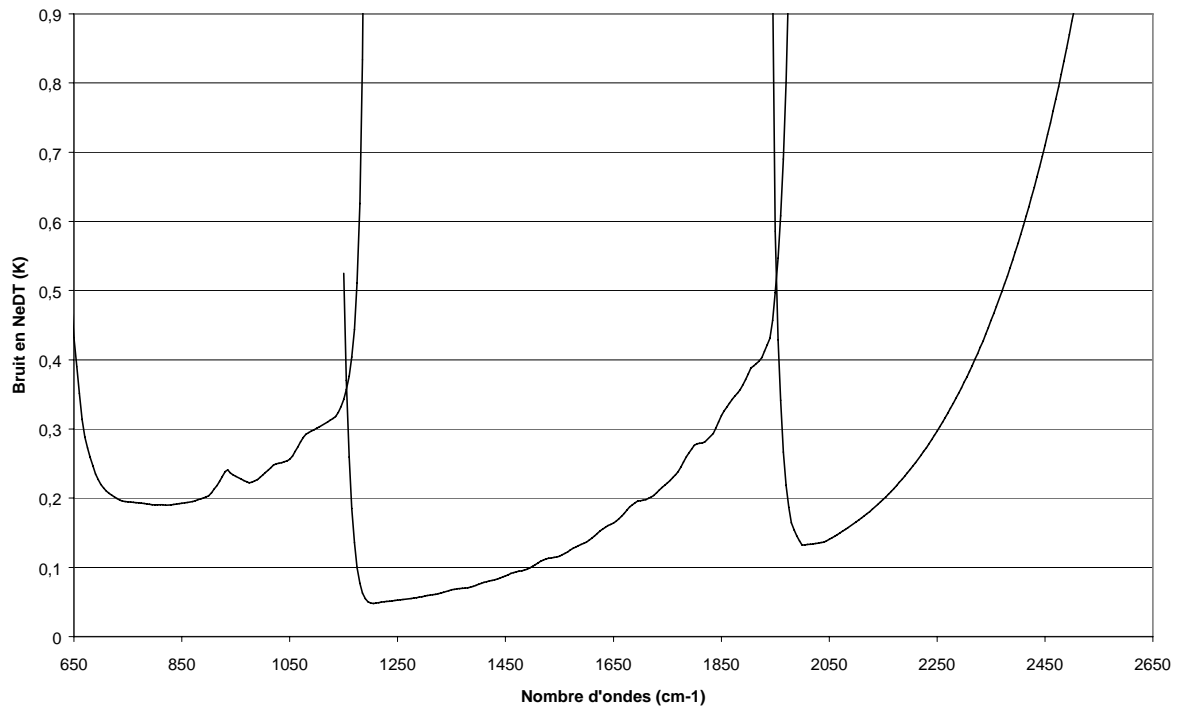


Figure 4.6 – Bruit de mesure typique de l'instrument IASI

Cette détérioration est minimisée en profitant du fait qu'il existe un certain recouvrement naturel entre les bandes B1/B2 et B2/B3. Dans les zones où on dispose de deux mesures de spectre S_i et S_j on les combine selon la formule

$$\bar{S}(\nu) = w_{ij}(\nu)S_i(\nu) + (1 - w_{ij}(\nu))S_j(\nu)$$

Une fonction de poids optimale $w_{ij}(\nu)$ est déterminée par l'algorithme d'initialisation OSB₅₂. Cette fonction affecte un poids variant entre 0 et 1 à chacune des 2 mesures disponibles en fonction du bruit radiométrique de celles-ci. Le poids le plus important est bien sûr accordé à la mesure la moins bruitée

La figure 4.7 ci-dessous illustre cette réduction de bruit à partir d'un exemple artificiel

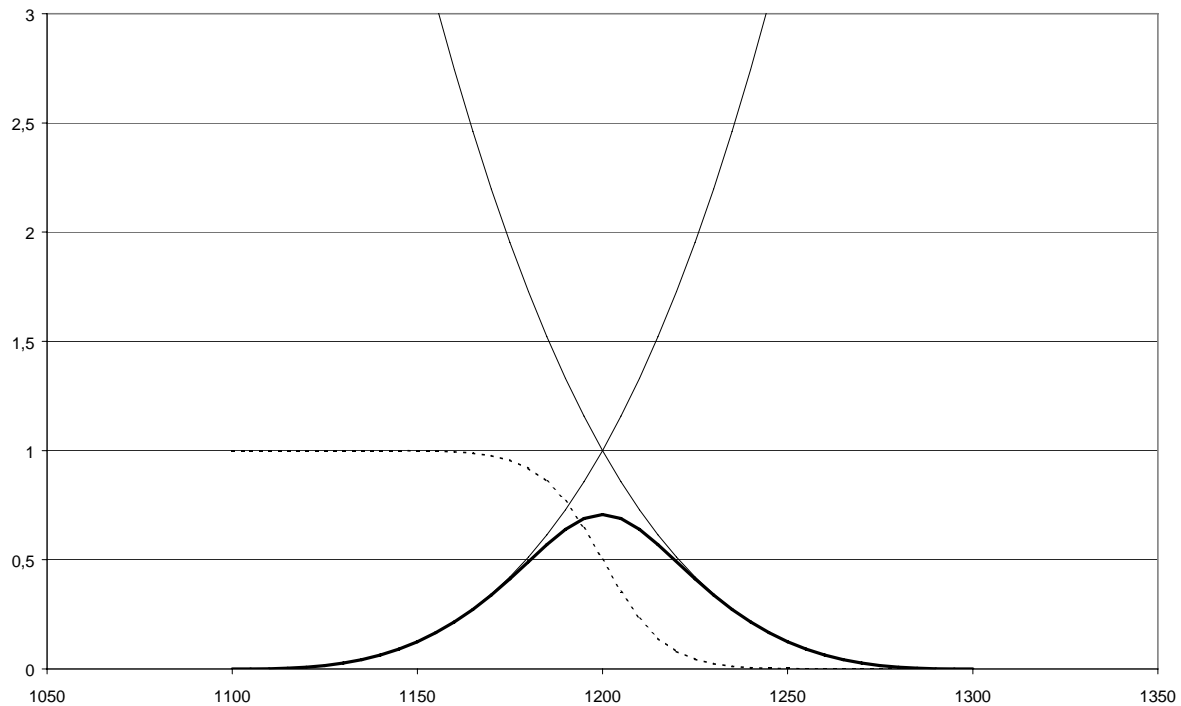


Figure 4.7 – Réduction du bruit grâce à la combinaison des bandes

En trait fin le bruit de chaque mesure élémentaire est représenté. En trait gras on a le bruit sur la mesure synthétique recombinaison. La fonction de pondération est indiquée en traits pointillés. Cette figure montre aussi l'amélioration du bruit radiométrique du spectre apportée par cette combinaison de bandes (gain maximum d'un facteur $\sqrt{2}$).

Les limites des zones de recouvrement B1/B2 et B2/B3 sont calculées par l'algorithme OSB₅₂ qui cherche à obtenir les bandes de recouvrement les plus larges possible pour être sûr de profiter au mieux de la réduction de bruit tout en s'assurant que l'algorithme de calibration radiométrique continue à être applicable sur l'ensemble des bandes B1, B2 et B3 ainsi définies.

Note : Dans les zones de recouvrement B1/B2 et B2/B3 les spectres originaux issus de la calibration radiométrique⁷⁵ sont retransmis au sol dans les données de vérification uniquement (donc pour un spectre sur les 120 qui sont acquis dans chaque période de 8 secondes).

4.8 ALGORITHME COD₁₅ « CODAGE DES SPECTRES »

Les valeurs échantillonnées du spectre $S(\nu_n)$ sont disponibles sous forme de nombres réels de 32 bits. Le codage réalisé par l'algorithme COD₁₅ consiste à transformer chacun de ces nombres réels en un entier codé sur un nombre de bits beaucoup plus faible afin de réduire le volume de données à transmettre.

⁷⁵ c'est-à-dire avant la combinaison des bandes

La transformation réel vers entier est réalisée par une loi linéaire. Cette loi est définie à partir des valeurs minimum $S_{\min}(\nu_n)$ attendues et un pas de codage $S_q(\nu_n)$ qui est une fraction (typiquement 0.5) du bruit radiométrique estimé pour ce nombre d'onde. Le nombre de bits nécessaires pour le codage de $S(\nu_n)$ dépend alors des valeurs maximum $S_{\max}(\nu_n)$ attendues.

L'algorithme CTC₅₀ construit les tables de codage nécessaire à COD₁₅ à partir de ces valeurs. Afin de réduire la taille des tables de codage tout en préservant le taux de compression permis par cette technique les lois de codage sont constantes sur des plages spectrales de 4 cm⁻¹ environ (16 échantillons).

Il est nécessaire de maintenir à bord 4 types de tables de codage qui dépendent de la cible visée :

- Visées atmosphériques (EW)
- Visées espace froid (CS)
- Visées du corps noir chaud (BB)
- Visée de l'arrière du miroir de scan

En effet, des spectres correspondant aux trois derniers types de visées peuvent être transmis au sol en mode calibration externe : la table de codage utilisée dépend du type de visée sélectionnée.

4.9 LIMITES DE BANDES SPECTRALES UTILISEES A BORD

Les algorithmes bord reposent sur la définition de différentes plages spectrales qui sont représentées sur la figure 4.8 ci-dessous.

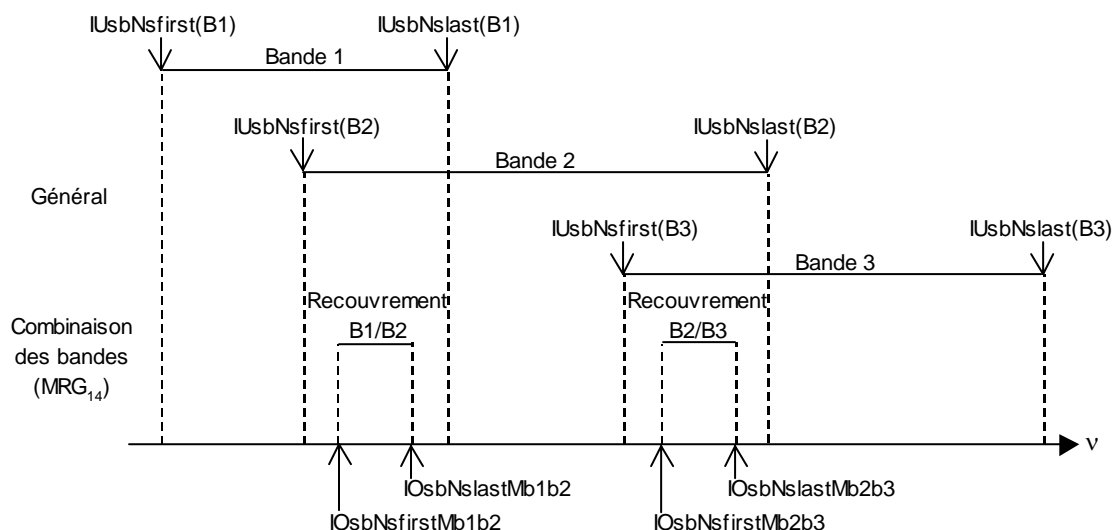


Figure 4.8 – Définition des limites de bandes spectrales utilisées à bord

Les variables de la configuration algorithmique qui contrôlent la définition de ces plages spectrales sont indiquées sur la figure.

Les valeurs affectées à ces variables sont des entiers qui sont reliés aux nombres d'ondes par la relation

$$\nu = n\Delta\nu$$

			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 75 of : 502
---	---	--	---

où $\Delta\nu = 0,254 \text{ cm}^{-1}$ est l'échantillonnage⁷⁶ nominal des spectres IASI de niveau 1A.

Le logiciel bord impose des contraintes sur la définition de ces paramètres. Celles-ci sont détaillées dans la section 6.3 qui détaille l'initialisation de ces variables.

⁷⁶ Cette valeur est imposée par la longueur d'onde du laser de référence et le nombre de points de la FFT (51200)

5 ALGORITHMES IASI DU SEGMENT SOL EPS

5.1 ARCHITECTURE GENERALE DU TRAITEMENT SOL

La figure 5.1 ci-dessous décrit l'architecture générale de l'algorithmie implémentée dans le Logiciel Opérationnel IASI.

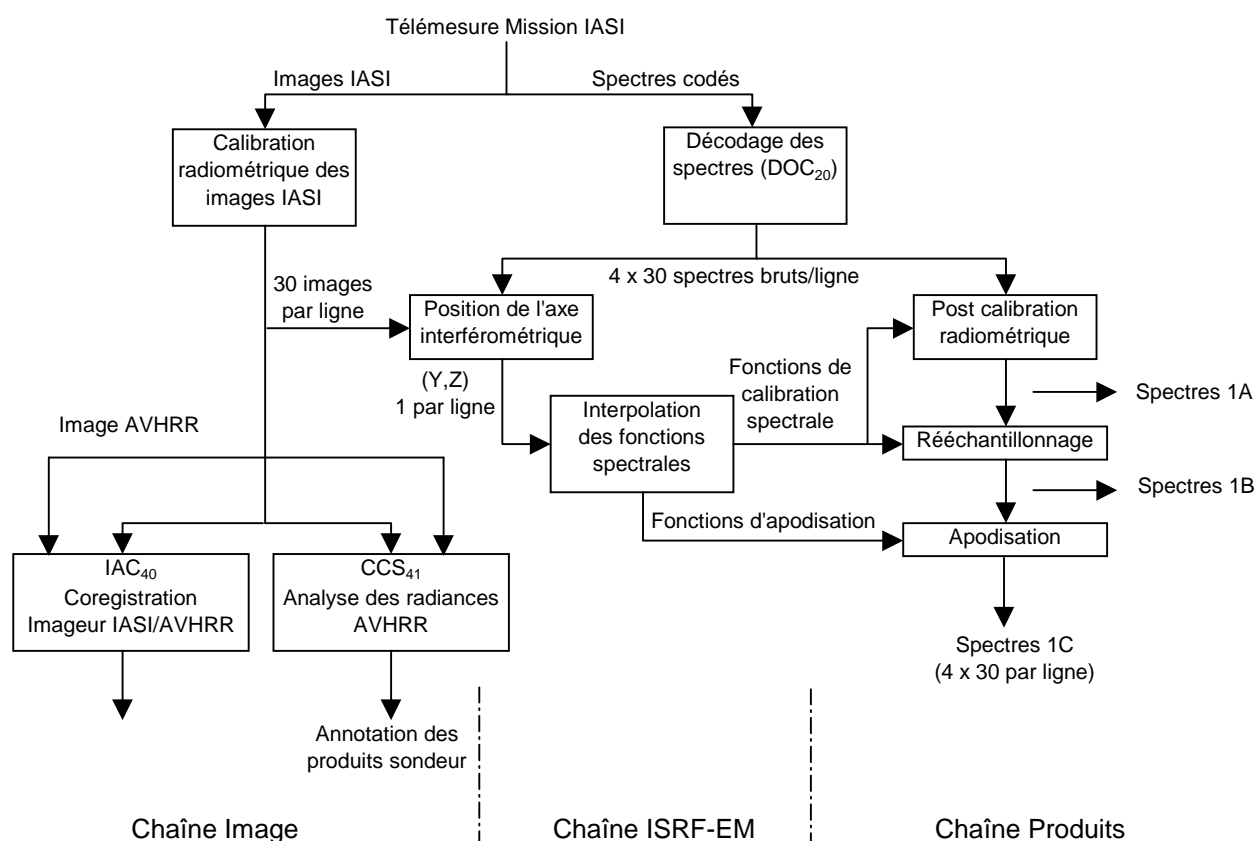


Figure 5.1 - Architecture générale du traitement sol (EPS)

Le fonctionnement de cette algorithmie peut être décrit de manière synthétique. On commence par le traitement des données sondeur par la chaîne "Produits".

Les spectres (120 par ligne de 8 secondes) sont tout d'abord décodés, c'est-à-dire ramenés en valeurs physiques. L'algorithme DOC_{20} réalise la fonction inverse de l'algorithme COD_{15} implanté à bord (aux effets de troncature près).

Les spectres pré-calibrés font alors l'objet d'un traitement de post calibration qui a pour objet de compenser quelques erreurs commises par la calibration radiométrique effectuée par les algorithmes bord. La première étape de cette post calibration consiste en particulier à tenir compte du décalage spectral introduit par le fait que les pixels IASI ne sont pas centrés (voir § 3.5). Ce décalage spectral qui n'est pas connu à bord est fourni par les fonctions de calibration spectrale. Ces fonctions sont réactualisées une fois par ligne par les

algorithmes de la chaîne ISRF-EM (détermination de l'axe interférométrique et interpolation des fonctions spectrales).

Les fonctions de calibration spectrale sont aussi utilisées pour calculer les spectres 1B qui sont rééchantillonnés avec une résolution fixe de 0.25 cm^{-1} . Les fonctions d'apodisation (voir § 3.6) sont finalement appliquées aux spectres 1B rééchantillonnés pour fournir les spectres 1C.

Les fonctions de calibration spectrale, comme les fonctions d'apodisation, dépendent essentiellement de la position de l'axe interférométrique⁷⁷. A chaque visée une position de l'axe instantané peut être déterminée à partir des quatre ⁷⁸ spectres disponibles. Cette valeur n'est pas suffisamment précise lorsque le spectre atmosphérique varie fortement dans le champ de vue de l'instrument. Le calcul de la position filtrée sur le long terme (1 toutes les 8 secondes) ignore donc ces déterminations imprécises. Celles-ci sont détectées à partir de la variabilité de l'image acquise au même instant que les spectres.

La calibration radiométrique des images est réalisée classiquement à partir d'une image espace froid et d'une image corps noir chaud selon les mêmes principes que la calibration radiométrique du sondeur (voir § 3.3.2).

Le positionnement au sol des mesures de IASI est réalisé par rapport aux images AVHRR, instrument qui possède une excellente qualité image géométrique.

La classification des pixels AVHRR est réalisée selon un algorithme classique de nuées dynamiques. Le but de cette classification est d'annoter les produits du sondeur IASI avec des informations permettant de connaître les conditions nuageuses au moment du sondage (voir [DA2]).

5.2 RELATION AVEC LES ALGORITHMES D'INITIALISATION

La figure 5.2 ci-dessous illustre les relations existant entre les algorithmes de la chaîne de traitement sol et les algorithmes d'initialisation qui seront décrits dans le chapitre 6 (représentés en pointillés).

⁷⁷ Les autres paramètres dont dépendent ces fonctions sont supposés varier beaucoup plus lentement que la position de l'axe interférométrique.

⁷⁸ Soit seulement 3 en cas de panne d'un des 4 pixels.

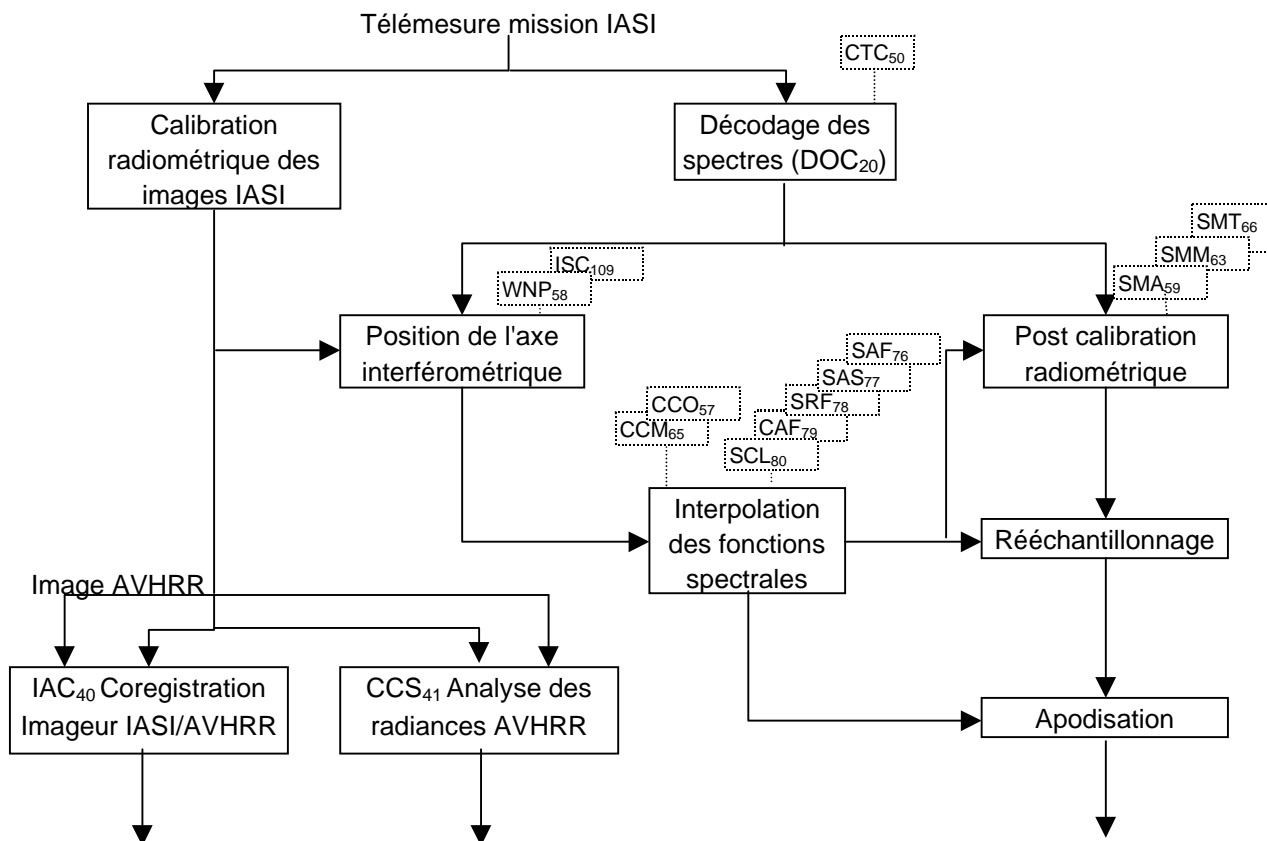


Figure 5.2 - Relation algorithmes traitement sol/initialisation

La suite de ce chapitre est maintenant consacrée à la description détaillée des différents blocs de la figure 5.1. Bien que cela ne respecte pas la séquence de traitement, on commencera par la description de la calibration des images et du rééchantillonnage des spectres 1B parce que cela facilite la logique de présentation.

5.3 CALIBRATION RADIOMETRIQUE DES IMAGES

L'objectif de la calibration radiométrique est d'obtenir pour chaque pixel la valeur de la luminance mesurée. Le principe de cette calibration est similaire à celle qui est effectuée sur les données du sondeur. A chaque ligne image on dispose d'une image espace froid (SN=36) et d'une image du corps noir chaud (SN=33). On suppose que la réponse de l'imageur est linéaire en énergie et on en déduit pour tout pixel (i, j) une relation

$$L_{ij} = A_{ij}(L_{ij}^m - B_{ij}) \quad (5-1)$$

similaire à l'équation (11) de la section 3.3.2.

Les coefficients de calibration A_{ij} et B_{ij} sont filtrés par un filtre linéaire du premier ordre dont la constante de temps est de 80 secondes (valeur typique). Ils sont calculés par l'algorithme ICC₃₈.

Les différences par rapport au sondeur sont

- que les coefficients de calibration sont évidemment réels.

- qu'il est nécessaire de prendre en compte la fonction de réponse spectrale $R(\nu)$ de l'imageur. Celle-ci n'est pas constante dans la bande de mesure (voir la figure 5.3 ci-dessous).

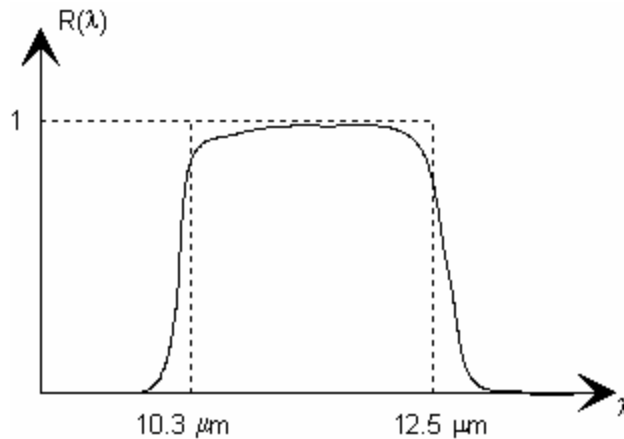


Figure 5.3 - Réponse spectrale de l'imageur (typique)

Le calcul du coefficient de calibration A_{ij} devient donc :

$$A_{ij} = \frac{\int_{\nu_m}^{\nu_n} R(\nu) \text{Planck}(T_{BB}, \nu) d\nu}{L_{ij}^{BB} - L_{ij}^{CS}} \quad (5-2)$$

(L'intégrale étant approximée par une somme dans l'algorithme ICC₃₈).

Note : (1) Les micro bolomètres qui constituent les capteurs de l'imageur IASI présentent par conception un signal d'obscurité très important par rapport au signal utile mesuré. D'autre part, les valeurs de ce signal d'obscurité sont très dispersées d'un pixel à l'autre. Afin d'éviter de consommer une part importante de la dynamique, ce signal d'obscurité (image d'égalisation) est soustrait de chaque image avant qu'elle soit transmise au sol.

Il est donc nécessaire de réinitialiser les coefficients de calibration image chaque fois que l'offset est modifié à bord. Cette opération est peu fréquente. Elle est indiquée par un changement d'état dans la télémessure mission.

(2) Les algorithmes imageur sont encore en cours d'évolution même si les principes présentés ici sont valables (Ex : introduction (AC) de la variation de réflectivité du miroir de balayage avec l'incidence).

5.4 REECHANTILLONNAGE DES SPECTRES

Les spectres 1A obtenus après application des corrections de post calibration radiométrique ont le défaut de ne pas être échantillonnés de façon régulière (en nombre d'ondes). Plus précisément, la valeur S_k^{1A} du tableau résultant de la post calibration radiométrique correspond à la valeur mesurée $S(\nu_k^{1A})$ du spectre en entrée instrument⁷⁹. Ce que l'on cherche en rééchantillonnant le spectre c'est à obtenir les valeurs de S aux points ν_k^{1B} , ces nombres d'ondes étant eux, régulièrement espacés.

⁷⁹ En ignorant volontairement la convolution par les fonctions d'instrument pour ne pas alourdir la rédaction.

$$\nu_k^{1B} = (k-1)\Delta\nu^{1B} \text{ avec } \Delta\nu^{1B} = 0.25 \text{ cm}^{-1}$$

Cette opération ne présente pas de difficulté majeure dès que l'on connaît la relation entre les bases spectrales ν^{1B} et ν^{1A} , relation qui est fournie par les fonctions de calibration spectrale $fcs_i(\nu)^{80}$.

$$\nu_k^{1A} = fcs_i(\nu_k^{1B})\nu_k^{1B} \quad (5-3)$$

L'algorithme S1B₃₅ de rééchantillonnage du spectre consiste donc à calculer les valeurs $S(\nu_k^{1B})$ d'une fonction dont on connaît les valeurs tabulées aux points $\nu_k^{1B} fcs(\nu_k^{1B})$. Il s'agit d'un simple problème d'interpolation.

Il est cependant nécessaire de prendre certaines précautions pour faire cette interpolation à cause de la variation rapide des spectres dans certaines régions (présences de raies espacées de 1 ou 2 cm^{-1}). On ne peut donc pas employer directement une méthode d'interpolation polynomiale.

Le rééchantillonnage du spectre est réalisé par deux algorithmes

- SOS₂₂ est utilisé en premier lieu pour sur échantillonner fortement (typiquement 5 fois) le spectre. Cet algorithme préserve le contenu fréquentiel du spectre (voir la section 5.1.4.1) mais ne peut réaliser qu'un suréchantillonnage à pas constant.
- S1B₃₅ réalise ensuite une interpolation par spline cubique entre les points du spectre suréchantillonné précédent.

Ces deux algorithmes vont être détaillés dans les sections suivantes.

5.4.1 SURECHANTILLONNAGE PAR TRANSFORMEE DE FOURIER (SOS₂₂)

Si S est un spectre échantillonné avec un pas $\Delta\nu$ et que l'on veuille suréchantillonner ce spectre d'un facteur F, l'algorithme commence par calculer $I = \text{TF}(S)$, puis il calcule F fois la TF inverse d'un interférogramme I' obtenu par déphasage de I ⁸¹

$$I'(x) = I(x)e^{i2\pi\frac{ns-1}{F}x\Delta\nu} \text{ pour } ns = 1, 2, \dots, F$$

En effet

$$\begin{aligned} \text{TF}^{-1}(I')(v) &= \int_{-\infty}^{\infty} I(x)e^{i2\pi\frac{ns-1}{F}x\Delta\nu} e^{i2\pi vx} dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} I(x)e^{i2\pi x(v + \frac{ns-1}{F}\Delta\nu)} dx \\ &= \text{TF}^{-1}(I')(v + \frac{ns-1}{F}\Delta\nu) \end{aligned}$$

$$\boxed{\text{TF}^{-1}(I')(v) = S(v + \frac{ns-1}{F}\Delta\nu)}$$

⁸⁰ C'est la définition des fonctions de calibration spectrale. Celles-ci dépendent évidemment du pixel i.

⁸¹ En fait, $F-1 \text{ TF}^{-1}$ suffisent puisque $I' = I$ pour $ns = 1$.

On a donc bien réalisé un suréchantillonnage d'un facteur F.

5.4.2 REECHANTILLONNAGE DU SPECTRE (S1B₃₅)

Soient les bases d'abscisses spectrales suivantes

$$(\nu^{1B}) \quad \nu_k^{1B} = (k-1)\Delta\nu^{1B} \quad \text{positions des échantillons spectraux 1B}$$

$$(\nu^{CS}) \quad \nu_k^{CS} = (k-1)\Delta\nu^{CS} \quad \text{positions de calcul des fonctions de calibration spectrales } fcs(\nu)$$

$$(\nu^S) \quad \nu_k^S = (k-1)\frac{\Delta\nu^{1B}}{F} \quad \text{abscisses du spectre suréchantillonné}$$

L'algorithme commence par calculer les valeurs $fcs(\nu_k^S)$ et en déduit les abscisses $\mu_k = \nu_k^S fcs(\nu_k^S)$ pour lesquelles le spectre sur échantillonné est connu.

Il obtient finalement le spectre aux points ν_k^{1B} par interpolation spline cubique entre les points (μ_k) .

5.5 APODISATION DES SPECTRES (S1C₃₇)

On ne reprend pas ici la théorie qui a été traitée au § 3.6.3.

La bande utile de IASI est discrétisée avec un pas de 15 cm^{-1} .

$$\nu_1 = 645 \text{ cm}^{-1} ; \nu_2 = 660 \text{ cm}^{-1}, \dots, \dots, \nu_{141} = 2760 \text{ cm}^{-1}$$

On a défini la fonction

$$S(\nu, \mu) = TF^{-1} \left[TF(S1B) \frac{TF(G)}{A_\mu} \right] (\nu) \quad (5-4)$$

et le spectre S1C(ν) par interpolation linéaire entre les 2 fonctions $S(\nu, \mu_k)$ et $S(\nu, \mu_{k+1})$ pour

$$\mu_k \leq \nu < \mu_{k+1}$$

On voit donc que les valeurs $S(\nu, \mu_k)$ ne sont utilisées que dans une bande

$$[\mu_k - 15 \text{ cm}^{-1}, \mu_k + 15 \text{ cm}^{-1}] \text{ (voir la figure 5-4)}$$

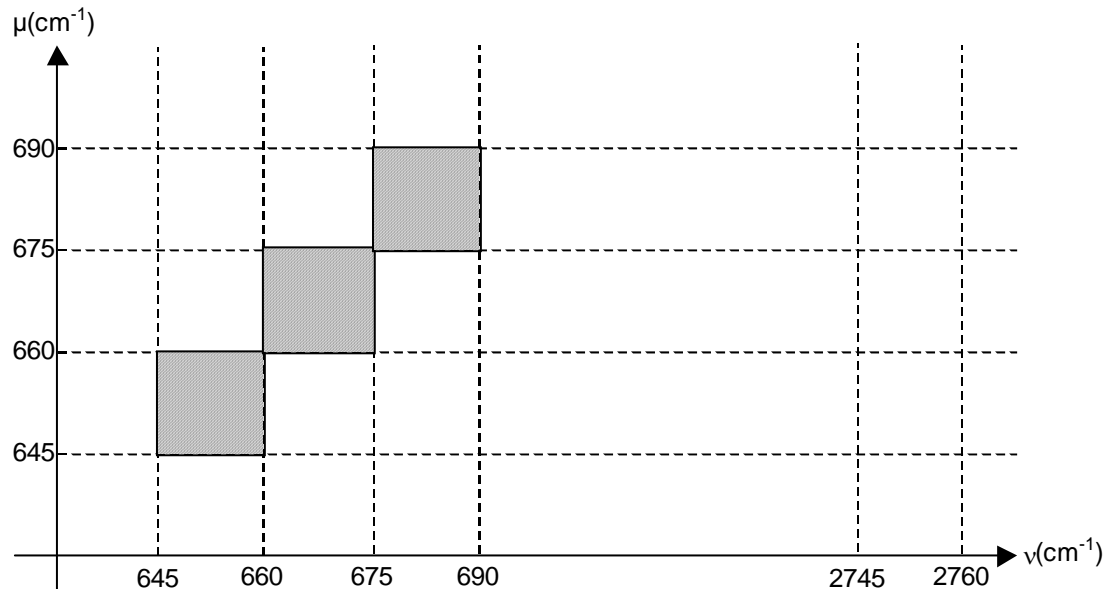


Figure 5-4 - Zones d'utilisation des fonctions $S(\nu, \mu_k)$

Afin de diminuer fortement la puissance de calcul consommée par l'algorithme $S1C_{37}$ la transformation (5-4) n'est appliquée que sur une fenêtre de largeur 128 cm^{-1} (soit 1024 points).

La FFT de S_{1B} est donc un interférogramme de 1024 points $I(x)$ pour $-2 \text{ cm} \leq x \leq 2 \text{ cm}$.

Cet interférogramme $I(x)$ est multiplié par la fonction d'apodisation

$$Af(x) = \frac{TF(G)(x)}{A_\mu(x)}$$

qui doit donc elle aussi avoir été calculée sur 1024 points (interpolation dans la table de 300 points qui définit $Af(x)$).

La FFT inverse fournit alors le spectre S_{1C} dans la fenêtre initiale.

Afin d'éviter les rebonds de Gibbs le spectre 1B a été prémultiplié avant d'en prendre la TF par une fonction d'amortissement. Cette fonction est définie en annexe 7. Son allure est donnée par la figure 5-5 ci-dessous.

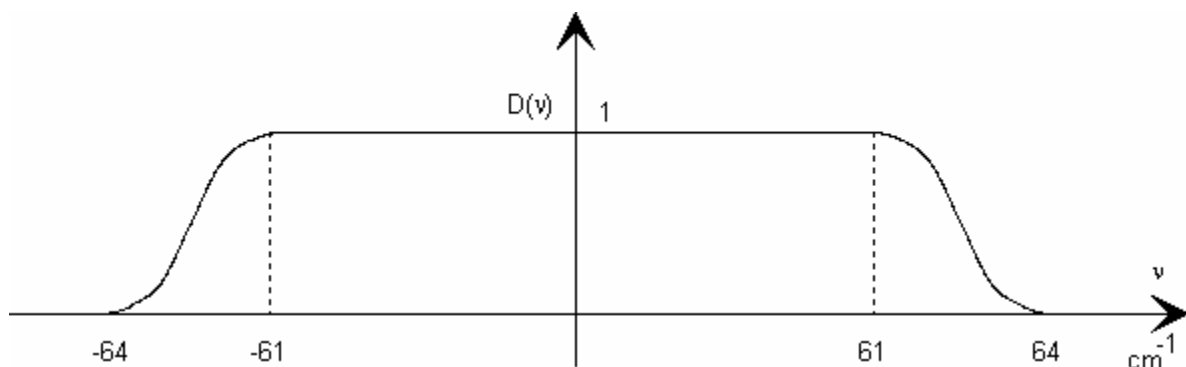


Figure 5-5 - Fonction d'amortissement

Note : Le traitement des fenêtres situées sur le bord de la bande utile de IASI est différent de celui des fenêtres internes. Il sera précisé plus tard dans les fiches d'algorithmes.

5.6 INTERPOLATION DES FONCTIONS SPECTRALES

On a utilisé dans les sections précédentes les fonctions de calibration spectrales fcs et les fonctions d'apodisation Af sans se préoccuper de la façon dont elles étaient calculées. Or ces fonctions ainsi qu'on l'a dit en introduction (§ 5.1.1) sont très dépendantes de la position (Y, Z) de l'axe interférométrique.

Le temps de calcul de ces fonctions à partir d'une position (Y, Z) étant très important il a été décidé de réaliser ce calcul par interpolation. Pour ce faire, les fonctions $fcs_i(v, Y, Z)$ et $Af(x, Y, Z)$ sont pré calculées pour certaines positions (Y_c, Z_i) situées sur une grille 11 x 11 (voir la figure 5-6 ci-dessous). Cette grille n'est pas nécessairement à pas constant.

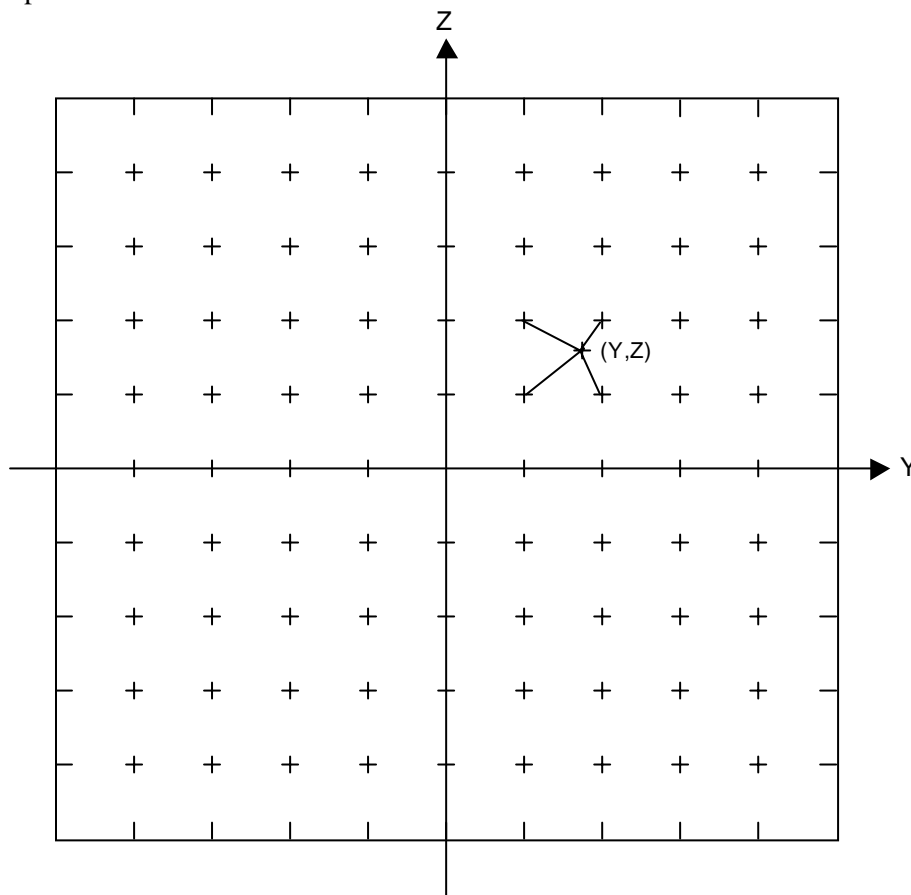


Figure 5-6 - Interpolation des fonctions dépendant de la position de l'axe interférométrique

La méthode d'interpolation est définie par l' algorithme ISF₄₃. Cet algorithme correspond à une interpolation (2D) bilinéaire qui est décrite dans l'annexe 7, section 4.

Voyons maintenant comment la position de l'axe interférométrique est déterminé.

5.7 POSITION DE L'AXE INTERFEROMETRIQUE

La détermination de la position de l'axe interférométrique repose sur l'enchaînement de 5 algorithmes (voir la figure 5-7 ci-dessous).

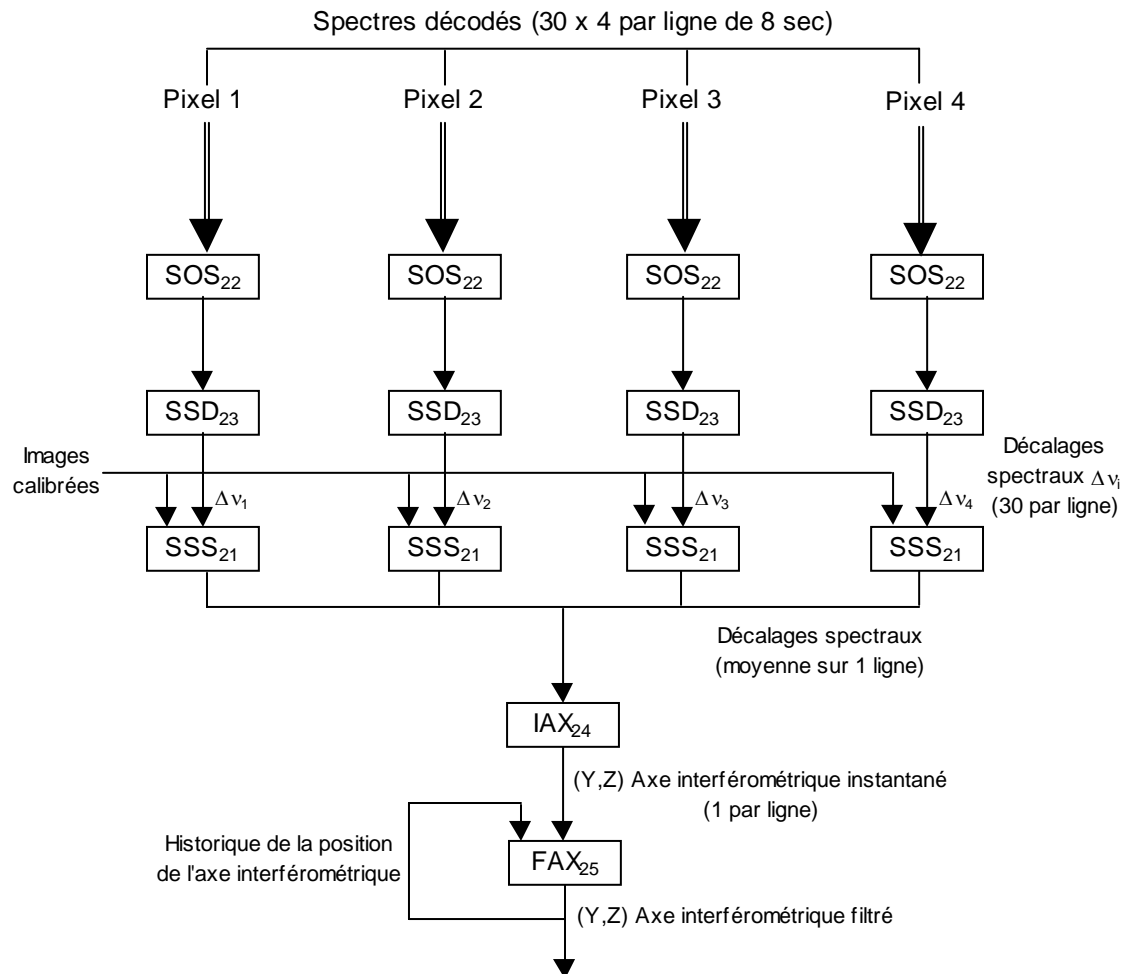


Figure 5-7 - Algorithmes de détermination de la position de l'axe interférométrique⁸²

Le principe de la méthode est le suivant.

On a vu précédemment (§ 5.4 et § 5.6) que si l'on se donne un nombre d'ondes particulier ν_{ref} , les fonctions de calibration spectrale permettent de prédire le nombre d'ondes ν_i correspondant dans le spectre brut (i.e. non calibré spectralement) mesuré par le pixel i

$$\nu_i = \nu_{\text{ref}} f_{\text{CS}_i}(\nu_{\text{ref}})$$

ou ce qui est équivalent le décalage spectral

⁸² La méthode qui est décrite à 4 pixels fonctionne aussi lorsque seules les données de 3 pixels sont disponibles.

$$\Delta v_i = v_i - v_{\text{ref}} = v_{\text{ref}}(fcs_i(v_{\text{ref}})-1)$$

En fait, ce décalage spectral dépend (par l'intermédiaire des fonctions fcs) de la position (Y, Z) de l'axe interférométrique. On voit donc que si l'on peut disposer d'une mesure Δv_i^m du décalage spectral pour un nombre d'ondes v_{ref} , on sera capable de déterminer la position de l'axe interférométrique : on minimise pour cela l'écart entre les $\Delta v_i(Y, Z)$ prédits et les Δv_i^m mesurés.

Plus précisément, la position (calculée par IAX₂₄) de l'axe interférométrique instantané (Y, Z) est celle qui minimise la valeur

$$D2(Y, Z) = \sum_{\text{pixels } i} [\Delta v_i(Y, Z) - \Delta v_i^m]^2 \quad (5-5)$$

Cette position calculée une fois par ligne (i.e. toutes les 8 sec) est ensuite filtrée par l'algorithme FAX₂₅.

Les valeurs Δv_i^m des décalages spectraux correspondant au pixel i sont calculées par l'algorithme SSD₂₃ pour chaque visée atmosphérique. SSS₂₁ moyenne alors ces valeurs en éliminant les déterminations pour lesquelles l'uniformité spatiale du spectre atmosphérique n'est pas suffisante (détectées à partir de l'analyse de la variance des images fournies par l'IIS IASI).

On va décrire maintenant l'algorithme de détermination des décalages spectraux proprement dit.

5.7.1 DETERMINATION DES DECALAGES SPECTRAUX (SSD₂₃)

5.7.1.1 PRINCIPE

Il y a tout d'abord quelques points fondamentaux à avoir en tête avant de comprendre la « mécanique » de l'algorithme :

1. Les erreurs de calibration spectrales sont essentiellement des erreurs d'échelle (en gros, le nombre d'ondes où l'instrument positionne une raie du spectre est proportionnel au nombre d'ondes réel de cette raie).
2. Compte-tenu de la résolution spectrale limitée de l'instrument, il n'est pas possible de mesurer l'erreur de calibration spectrale en utilisant une raie fine particulière d'un spectre atmosphérique (0,25 cm⁻¹ autour de 2500 cm⁻¹ correspond à une erreur relative de 10⁻⁴ alors qu'on cherche à retrouver avec la calibration spectrale une erreur de l'ordre de 10⁻⁶). Il faut donc utiliser des structures particulières qui comportent plusieurs raies pour faire la corrélation entre les mesures et la réalité.
3. On dispose d'un algorithme (FFT) qui permet de déterminer l'écart (supposé constant) entre 2 peignes de raies qui ont la même période.

A partir de ces éléments, le principe de l'algorithme SSD₂₃ est le suivant :

A) On calcule le décalage Δv entre le peigne de raie théorique (spectre synthétique) et la mesure qu'en fait l'instrument IASI

Comme les erreurs de calibration spectrales ne sont pas des Δv constants mais sont proportionnelles au nombre d'ondes v , l'erreur n'est pas totalement compensée pour toutes les raies du peigne.

B) On calcule donc le coefficient de proportionnalité C pour un nombre d'ondes v_{ref} particulier (sensiblement au milieu de la fenêtre spectrale qui contient le peigne) tel que

$$C = \frac{\Delta v}{v_{\text{ref}}}$$

C) Le peigne de raies synthétique est alors recalculé sur une nouvelle échelle $v_{i+1} = (1+C_i)v_i$

Le processus est ensuite itéré jusqu'à la convergence.

Il y a convergence puisque à partir du moment où l'erreur Δv devient suffisamment faible pour pouvoir être considérée comme nulle, il n'y a plus de différence entre les 2 transformations d'échelle (qui se ramènent alors à l'identité)

$$T1: v \mapsto v + \Delta v$$

$$T2: v \mapsto (1+C)v$$

Le processus converge toujours en moins de 5 itérations. Si ce n'est pas le cas, c'est le signe d'un problème lié à l'initialisation des données par l'algorithme WNP₅₈. Dans ce cas, l'analyse du problème passe par la comparaison du spectre mesuré ayant posé problème avec le spectre synthétique ayant servi dans l'algorithme WNP₅₈ (voir § 6.8).

5.7.1.2 DETERMINATION DU Δv ENTRE 2 PEIGNES DE RAIES

La méthode suivante permet de déterminer le décalage spectral Δv supposé indépendant du nombre d'ondes v entre :

- un peigne de raies atmosphériques $S_t(v)$ (extrait d'une base de données spectroscopiques),
- la mesure $S_m(v)$ de ce peigne par l'instrument IASI.

D'après les hypothèses, on a :

$$S_m(v) = S_t(v + \Delta v)$$

d'où l'on déduit après quelques calculs simples :

$$TF(S_m)(x) = e^{i2\pi x \Delta v} TF(S_t)(x)$$

Si on écrit

$$TF(S_t)(x) = \rho_0(x) e^{i\Phi_0(x)} \quad TF(S_m)(x) = \rho(x) e^{i\Phi(x)}$$

On obtient

$$\Delta v = \frac{\Phi(x) - \Phi_0(x)}{2\pi x} \quad (5-6)$$

La formule (5-6) fournit pour chaque valeur de x une estimation de la valeur de Δv . On voit cependant (voir la figure 5-8 ci-dessous) que la précision donnée par cette formule sera d'autant meilleure que le module $\rho(x)$ est plus élevé.

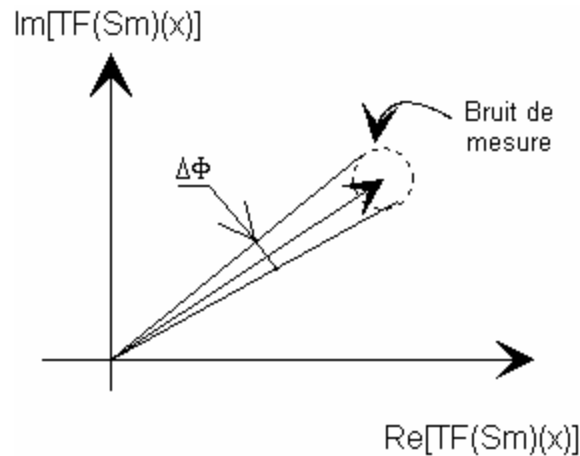


Figure 5-8 - Influence du bruit de mesure sur la détermination de $\Phi(x)$

Comme la fonction $S_t(\nu)$ est périodique, disons de période Δ , on sait que sa TF présente des pics marqués autour de $x_0 = \frac{1}{\Delta}$ (fondamentale), $x_1 = \frac{2}{\Delta}$ (premier harmonique), et $x_2 = \frac{3}{\Delta}$ (deuxième harmonique). C'est donc pour une de ces valeurs de x que la formule (5-6) va être appliquée. Le choix d'utiliser x_0 , x_1 ou x_2 dépend de la fenêtre spectrale contenant le peigne.

En général c'est la position de la fondamentale qui est utilisée. Par exemple, c'est le cas pour la fenêtre spectrale $[2340, 2380 \text{ cm}^{-1}]$, qu'il est prévu⁸³ d'utiliser nominalemt (peigne de raies du CO_2). Cette fenêtre contient environ 30 raies espacées de 1.3 cm^{-1} .

Pour d'autres fenêtres en revanche, des résonnances provenant d'autres structures périodiques du spectre perturbent la fondamentale et il est nécessaire d'utiliser un des harmoniques.

5.7.1.3 ADAPTATION NECESSAIRE

La technique précédente demande à être adaptée car le peigne de raies synthétique $S_t(\nu)$ n'est pas strictement périodique. Pour résoudre cette difficulté, on définit une nouvelle échelle de nombres d'ondes ν' dans lequel le peigne de raies synthétiques est périodique.

⁸³ voir [DR21]

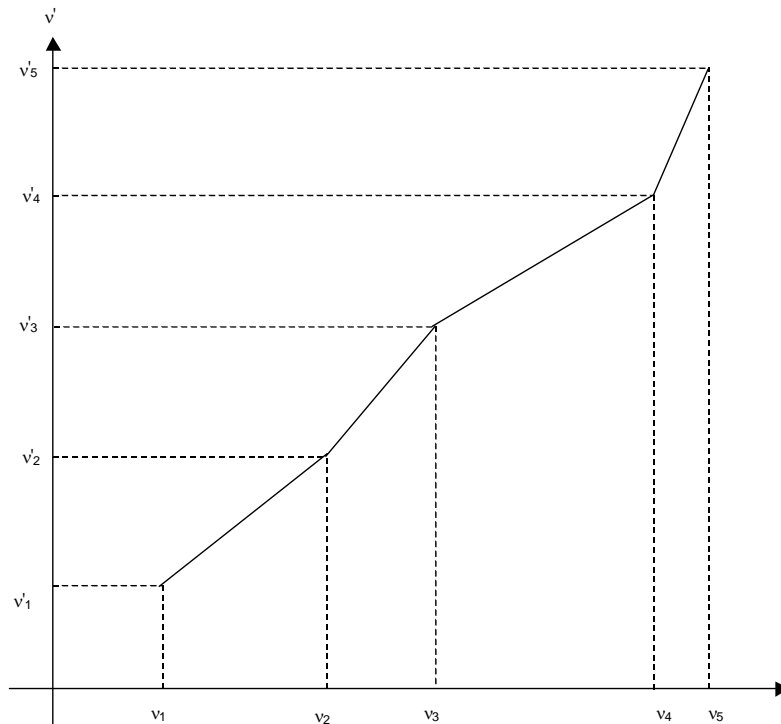


Figure 5-9 -

Le spectre mesuré $S_m(v)$ est alors interpolé sur une base spectrale suréchantillonnée à pas constant en v' avant d'effectuer le calcul de TF.

Les valeurs $\Phi_0(x)$, v_{ref} , $v'(v)$ sont calculées par l'algorithme d'initialisation WNP₅₈ qui

- simule le spectre synthétique sur la plage spectrale sélectionnée,
- calcule les positions des raies synthétiques et en déduit la base $v'(v)$
- calcule la phase de la TF du spectre synthétique $\Phi_0(x)$.

On trouvera dans la section 6.8 quelques indications sur le choix de la fenêtre spectrale utilisée. Pour plus de détails, le lecteur se reportera à [DR18].

5.7.2 POSITION DE L'AXE INTERFEROMETRIQUE INSTANTANE (IA_{X25})

Les valeurs Δv_i^m de l'équation (5-5) ayant été déterminées comme cela est décrit dans la section précédente, il reste à trouver le minimum de la fonction $D2(Y, Z)$.

Pour cela l'algorithme calcule cette fonction aux points (Y_c, Z_l) de la grille 11x11 définie dans la section 5.6 et détermine le point de la grille (Y_{cm}, Z_{lm}) pour lequel $D2$ est minimum. Le véritable minimum de la fonction (Y_m, Z_m) se situe donc au voisinage de ce point (voir figure 5-10 ci-dessous).

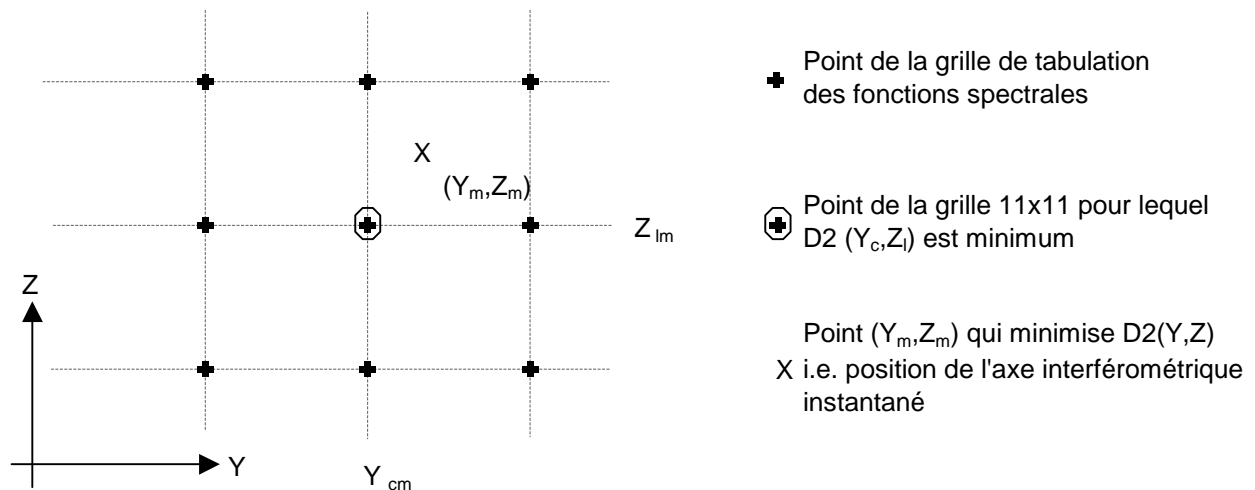


Figure 5-10 - Position de l'axe interférométrique instantané

La position de ce minimum est alors calculée en approximant la fonction $D2(Y, Z)$ par un paraboloïde

$$D2(Y, Z) = a_1 + a_2Y + a_3Z + a_4Y^2 + a_5Z^2 + a_6YZ$$

obtenu en ajustant au sens des moindres carrés la valeur des six coefficients a_1, \dots, a_6 sur le point (Y_{cm}, Z_{lm}) et ses 8 voisins. (Voir annexe 7, § 2.3).

L'incertitude sur la position de ce minimum est aussi calculée, ce qui fournit un indice de la qualité de la position de l'axe interférométrique.

5.7.3 FILTRAGE DE L'AXE INTERFEROMETRIQUE (FAX₂₅)

La calibration spectrale est extrêmement sensible à la position de l'axe interférométrique. Il est donc essentiel que les traitements qui produisent cette valeur ne risquent pas d'introduire des discontinuités à cause de mesures aberrantes isolées.

Pour cette raison, l'axe interférométrique est filtré par un algorithme robuste (ajustement polynomial par moindres carrés pondérés) qui travaille sur un horizon d'une orbite environ. Le poids affecté à chaque valeur décroît avec son ancienneté. Un paramètre (durée d'oubli) permet de régler l'importance que l'on donne aux mesures récentes par rapport aux mesures anciennes. Ce paramètre sera réajusté en vol afin d'obtenir le meilleur compromis en fonction du bruit sur l'axe instantané et les variations observées de la position moyenne.

5.8 POST CALIBRATION RADIOMETRIQUE

Elle tient compte des phénomènes suivants qui sont, pour des raisons de simplicité, ignorés par la calibration radiométrique effectuée à bord.

- L'échantillonnage des spectres bruts n'est pas réalisé aux nombres d'ondes nominaux : il faut donc corriger l'erreur commise sur le calcul des coefficients de calibration en utilisant la valeur de la fonction de Planck en un point légèrement erroné (algorithme SCR₃₁).
- On tient compte au sol des défauts d'émissivité du corps noir et de la température des parois de la cavité instrument qui vont s'y réfléchir (algorithme HEC₃₂). On tient compte aussi d'une valeur filtrée au sol de la température du corps noir interne fournie par l'algorithme FTB₃₀.
- Le réflectivité du miroir de balayage dépend de l'angle d'incidence. La correction prend aussi en compte sa température (algorithmes SME₃₃ et SMC₃₄).

Cette post calibration radiométrique repose sur l'enchaînement des 6 algorithmes suivants (voir figure 5-11 ci-dessous).

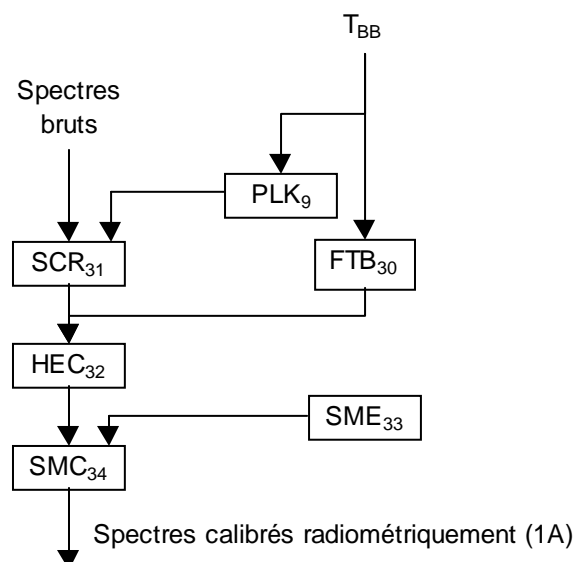


Figure 5-11 - Algorithmes de post calibration radiométrique

Note : Ces algorithmes sont de la responsabilité du maître d'œuvre satellite. La définition qui en est donnée ici correspond à une version préliminaire issue de la phase B CNES. Cette définition est donc AC.

5.8.1 PRINCIPE DE L'ALGORITHME SCR₃₁

Les spectres sont calculés à bord par la formule (11).

$$L(\nu) = \text{Planck}(T_{BB}, \nu) \operatorname{Re} \left[\frac{S_{EW}(\nu) - S_{CS}(\nu)}{S_{BB}(\nu) - S_{CS}(\nu)} \right]$$

En fait, cette luminance ne correspond pas au nombre d'ondes nominal ν mais à $\nu.fcs(\nu)$.

Il faut donc la corriger par :

$$L'(\nu) = \frac{\text{Planck}(T_{BB}, \nu.fcs(\nu))}{\text{Planck}(T_{BB}, \nu)} L(\nu) \quad (5-7)$$

Remarque : ① Dans l'application de la formule (5-7) c'est la fonction de Planck telle qu'elle a été implémentée à bord (algorithme PLK₉) qui doit être utilisée au dénominateur.

② Dans l'application de la formule (5-7) c'est la température T_{BB} mesurée à la ligne LN-1 qu'il faut utiliser pour traiter les spectres de la ligne LN.

5.8.2 PRINCIPES DES ALGORITHMES SMC_{34} ET SME_{33}

La réflectivité du miroir de balayage en fonction de l'incidence θ est modélisée par l'équation suivante

$$R(\theta) = R(0) - \beta(1 - \cos \theta)^\alpha$$

où α et β sont deux coefficients caractérisés avant le vol.

β est remis à jour en vol grâce à l'utilisation de la seconde direction de visée espace froid.

Si on note

- θ_1 l'angle d'incidence pour la visée espace froid,
- θ_2 l'angle d'incidence pour la visée corps noir chaud,
- θ l'angle d'incidence pour le spectre mesuré,
- T_{sm} la température du miroir de scan.

Le spectre corrigé s'écrit

$$S_c(\nu) = S(\nu) - \frac{(R(\theta_2, \nu) - R(\theta_1, \nu))S(\nu)(B(\nu, T_{sm}) - B(\nu, T_{BB}))}{B(\nu, T_{BB})} - (R(\theta_1, \nu) - R(\theta, \nu))(B(\nu, T_{sm}) - S(\nu))$$

Les valeurs de θ étant connues à l'avance, les réflectances sont tabulées.

La température T_{sm} du miroir de balayage n'est pas directement mesurée à bord. Elle est déterminée par l'algorithme SME_{33} à partir d'un modèle reposant sur les prédictions théoriques de température et qui est recalé par la TEC (algorithme SMT_{66} : voir § 6.10).

L'évolution de la température du miroir de scan est alors donnée par une fonction $T_{sm}(t, t_N)$

où t est la date courante

t_N est la date de passage au nœud ascendant précédent du satellite Metop.

La fonction T_{sm} est définie par une table (< 200 réels). Le modèle définitif est encore AC.

5.8.3 PRINCIPE DE L'ALGORITHME HEC_{32}

Dans l'équation de calibration (11) de la section 3.3.2. le terme $Planck(T_{BB}, \nu)$ représente la luminance émise par le corps noir chaud de calibration (Black Body ou BB) uniquement dans le cas d'une émissivité égale à 1.

Plus généralement, si l'émissivité du corps noir vaut ε , la luminance en provenance de la source de calibration chaude sera donnée par (où la fonction de Planck est maintenant noté B pour plus de lisibilité).

$$L_{BB}(\nu) = \varepsilon B(\nu, T_{BB}) + \sum_i r_i B(\nu, T_i)$$

où

- la somme est calculée pour toutes les températures (T_i) mesurées dans la cavité de l'instrument.
- r_i caractérise la fraction de la luminance émise par la i -ième composante de l'instrument reflétée par le corps noir dans les pixels du sondeur. Ces valeurs r_i sont calculées à partir des résultats de mesure de réflectivité bidirectionnelle du corps noir.

- T_i sont des températures de l'instrument dont l'évolution en fonction du temps est fournie par une tabulation en fonction de (t et t_N) comme pour la température du miroir de balayage.

La correction d'émissivité du corps noir se déduit de la formule précédente. Le spectre corrigé S_c s'écrit

$$S_c(\nu) = S(\nu) \frac{L_{BB}(\nu)}{B(\nu, T)}$$

5.9 GEOLOCALISATION DES PRODUITS IASI

5.9.1 INTRODUCTION ET PRINCIPE

La spécification du système IASI [DA2] demande que les produits IASI contiennent la localisation du point au sol correspondant, au moment de la mesure

- au centre des 4 pixels du sondeur
- aux points d'une sous grille des pixels de l'imageur

De plus, la connaissance de divers angles de mesure⁸⁴ est requise. Le calcul de ces angles à partir des données suivantes

- date
- latitude du point
- longitude du point

n'est pas spécifique à l'instrument IASI. Il a donc été demandé à Eumetsat de fournir un outil permettant d'effectuer cette conversion afin de garantir la cohérence⁸⁵ entre les différents instruments embarqués sur METOP. La disponibilité de ce traitement est AC. Plus généralement, les interfaces entre l'algorithme présenté dans ce document et le système EPS-CGS sont mises en évidence dans le § 5.9.2.6.

Le positionnement au sol des mesures de IASI est réalisé par rapport aux images AVHRR, instrument qui possède une excellente qualité image géométrique. L'entrée de ce traitement est un ensemble de lignes image AVHRR déjà géoréférencées. Cela signifie que l'on connaît la position (latitude et longitude par exemple) des points d'une sous-grille de cette image (1 point tous les 64 AC).

On commence par positionner approximativement l'image IASI dans cette image AVHRR (voir la figure 5.12 ci-dessous). Puis on ajuste finement cette position en cherchant la position de corrélation maximum (algorithme IAC₄₀).

⁸⁴ permettant de connaître la direction du satellite et la direction du soleil. Ces angles sont définis plus précisément au §5.9.4

⁸⁵ La précision requise sur les données n'est pas très contraignante. On juge cependant que la définition des différents intermédiaires de calcul à utiliser (repère inertiel, géodésique, etc). est suffisamment complexe pour être « cachée » au niveau des instruments.

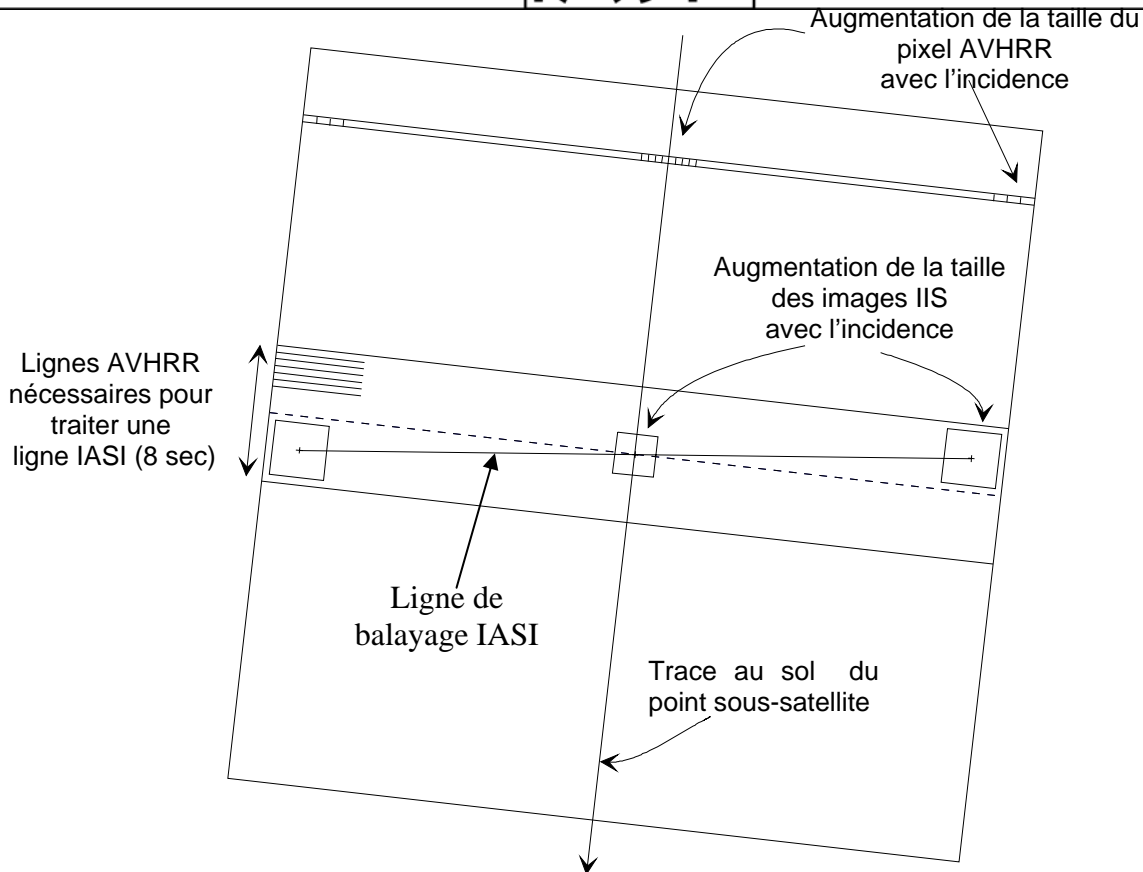


Figure 5.12 – Géométrie relative des images IASI et AVHRR

Dans ce calcul il est nécessaire de tenir compte des points suivants

- La période de balayage de la ligne IASI est de 8 secondes contre 0.167 seconde environ pour AVHRR. La ligne qui joint le centre des images IASI n'est donc pas parallèle aux lignes AVHRR.
- La taille du pixel augmente pour les angles de visée extrêmes à cause de l'augmentation de distance entre le satellite et le point visé au sol. Ce grandissement a lieu dans les 2 dimensions de l'image IASI mais seulement le long des lignes pour AVHRR.

Ces deux points conditionnent la nécessité de rééchantillonner les images IASI avant de réaliser la corrélation des images qui se fait dans le raster AVHRR.

Remarque : le nombre de lignes AVHRR nécessaires pour traiter l'ensemble des images d'une ligne IASI est supérieur au nombre de lignes qui sont acquises en 8 secondes.

Le chapitre 5.9.7 décrit la séquence d'opérations qui est nécessaire pour calculer la position au sol du centre des pixels sondeur ou des pixels imageur. Cette séquence est décrite en terme d'algorithmes élémentaires définis dans le § 5.9.6.

5.9.2 REFERENTIELS UTILISES

On identifie dans cette section les référentiels qui sont strictement nécessaires pour une définition non ambiguë de la géolocalisation des produits IASI. L'implémentation de ces repères par rapport aux repères déjà définis au niveau Metop et IASI est AD.

5.9.2.1 REFERENTIEL TERRESTRE

Ce référentiel est défini au niveau système afin d'assurer la cohérence de la localisation des produits provenant des différents instruments du système EPS [DR38]. Il est déterminé par

- la donnée d'un repère de référence $R_T = (O_T, \vec{x}_T, \vec{y}_T, \vec{z}_T)$
- la donnée d'un modèle de surface terrestre (ellipsoïde de référence complété éventuellement par un modèle d'élévation).

5.9.2.2 REPERE SATELLITE METOP $R_M = (O_M, \vec{x}_M, \vec{y}_M, \vec{z}_M)$

Le changement de repère entre R_M et R_T dépend évidemment du temps au travers des informations d'orbite et d'attitude du satellite Metop.

5.9.2.3 REPERE INSTRUMENT IASI NOMINAL $R_I(O_I, \vec{x}_I, \vec{y}_I, \vec{z}_I)$

Le changement de repère entre R_I et R_M est supposé fixe dans le temps. Il a été déterminé lors de l'alignement de IASI sur Metop. C'est le repère de référence auquel sont rapportées toutes les mesures qui sont effectuées au niveau instrument IASI. (voir la figure 3.10 du § 3.4.1 pour la position nominale de ce repère). L'axe \vec{y}_I est confondu avec l'axe de rotation du miroir de balayage par définition.

5.9.2.4 REPERE PLAN FOCAL SONDEUR $R_S(O_S, \vec{x}_S, \vec{y}_S, \vec{z}_S)$

Il est obtenu à partir du repère instrument IASI par une rotation autour de l'axe \vec{y}_I

5.9.2.4 REPERE IIS $R_{IIS}(O_{IIS}, \vec{x}_{IIS}, \vec{y}_{IIS}, \vec{z}_{IIS})$

Les positions des pixels de l'imageur intégré IIS sont données dans le repère R_{IIS} qui est défini à partir du repère plan focal du sondeur R_S par une rotation autour de l'axe \vec{z}_S .

5.9.2.5 LIGNE DE VISEE

Une direction particulière du champ de vue de l'instrument IASI (point de l'IPSF sondeur ou pixel IIS) est définie pour une position donnée du miroir de balayage SP par rotation d'une direction fixe définie dans le repère instrument R_I . Cette rotation est définie par un axe \vec{A}_S ($\vec{A}_S = \vec{y}_I$) et un angle dépendant de SP = $\alpha(\text{SP})$.

5.9.3 COREGISTRATION IMAGEUR IASI / AVHRR (IAC₄₀)

Il s'agit de déterminer la loi qui fournit la position de chacun des pixels $(i, j)_{IASI}$ de l'imageur en coordonnées $(l, c)_{AVHRR}$. La description de l'algorithme faite dans cette section restant générale il ne sera pas nécessaire de préciser comment la loi de transformation est définie.

La première étape de l'algorithme consiste à reconstruire une image IASI (de 64 x 64 pixels) à sa position nominale dans le raster image AVHRR⁸⁶. Cette étape nécessite un rééchantillonnage de l'image IASI.

On dispose alors de 2 images, disons x_{ij} (IASI) et y_{ij} (AVHRR) et on calcule le coefficient de corrélation R entre ces deux images.

Par définition :

$$R = \frac{\sum_{ij} (x_{ij} - \tilde{x})(y_{ij} - \tilde{y})}{\sqrt{\sum_{ij} (x_{ij} - \tilde{x})^2 \sum_{ij} (y_{ij} - \tilde{y})^2}} \quad (5-8)$$

où

N = Nombre de points de l'image

$$\tilde{x} = \frac{1}{N} \sum_{ij} x_{ij}$$

$$\tilde{y} = \frac{1}{N} \sum_{ij} y_{ij}$$

Plus les images sont semblables et plus la valeur absolue du coefficient R est proche de 1 (valeur maximum).

La détermination de la coregistration imageur IASI / AVHRR se fait en déplaçant légèrement l'image IASI en lignes (de l pixels) et en colonnes (de c pixels) par rapport à sa position nominale et en calculant le coefficient de corrélation $R(l, c)$ entre cette image et la sous image AVHRR sous jacente.

Avec le dimensionnement actuel $-10 \leq l \leq 10$ $-10 \leq c \leq 10$

La coregistration consiste à déterminer les valeurs l_0 et c_0 qui maximisent $R(l, c)$. Une coregistration à la précision du pixel est d'abord obtenue en déterminant les valeurs l_0 et c_0 entières sur la grille $-10 \leq l \leq 10$, $-10 \leq c \leq 10$. Puis une coregistration plus précise est obtenue en prolongeant la fonction R précédemment définie à des coordonnées non entières. Pour cela, la fonction $R(l, c)$ est assimilée à un paraboloïde⁸⁷ autour du point (l_0, c_0) et la position (l_M, c_M) du maximum de ce paraboloïde fournit la coregistration souhaitée avec une précision sub pixel.

Optimisation : L'algorithme tel qu'il est écrit n'est pas compatible avec la puissance de calcul allouée aux algorithmes IASI par le segment sol EPS. Une optimisation de cette méthode est décrite dans [DR4].

Cette coregistration est répétée à haute fréquence (à chaque SP) car il n'y a pas de garanties suffisantes sur la stabilité de la position relative des référentiels IASI et AVHRR⁸⁸.

⁸⁶ Cette position nominale tient compte à la fois du numéro de ligne (coordonnées le long de la trace) et du numéro de sous cycle SN (coordonnée perpendiculaire à la trace).

⁸⁷ Obtenu par ajustement au sens des moindres carrés sur les 9 points de grille les plus proches.

⁸⁸ Notamment à cause de l'incertitude concernant le comportement des amortisseurs de vibration qui isolent l'instrument IASI de la plate-forme Metop.

5.9.4 ANALYSE DES RADIANCES AVHRR (CCS₄₁)

Le but de cette analyse est de fournir un produit destiné à faciliter l'initialisation de l'inversion par les utilisateurs qui souhaitent traiter des données de sondage perturbées par des couvertures nuageuses partielles. Le produit proposé est défini dans [DA2].

On définit pour chaque visée atmosphérique la sous image AVHRR (120 x 60 pixels maxi AC) qui recouvre largement le champ des 4 pixels IASI.

Les pixels de cette imagerie sont, chacun, caractérisés par n ($n = 5$ AC) valeurs de radiance dans les différents canaux AVHRR. Chaque pixel de l'image peut donc être représenté comme un point dans un espace à n dimensions. L'imagerie, elle, est représentée par un ensemble de nuages de points (voir la figure 5-13 pour une représentation dans le cas $n = 3$).

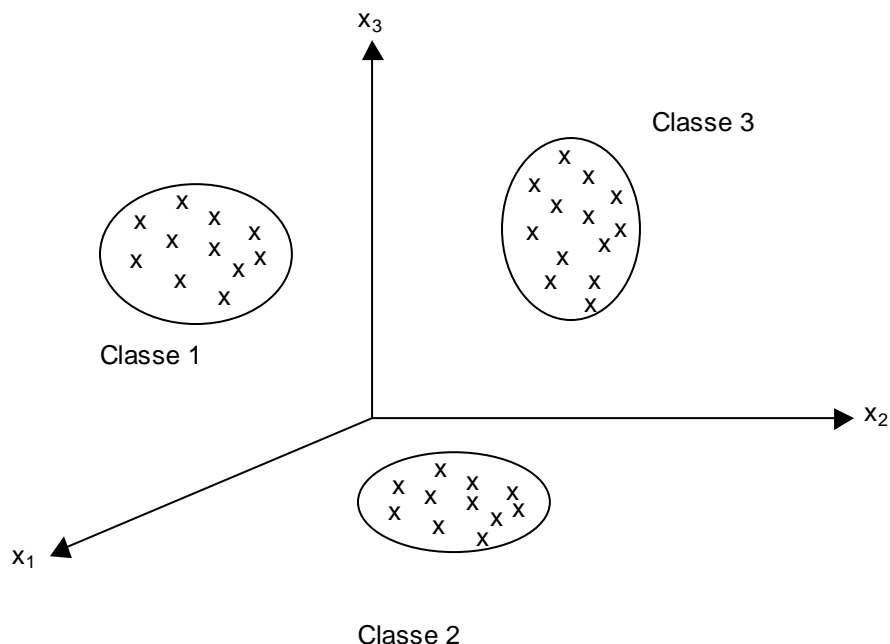


Figure 5-13 - "Classification" d'une image AVHRR

La classification de l'imagerie consiste à caractériser les nuages de points (centre de gravité, dimensions) et à affecter à chaque pixel de l'image la classe (i.e. le nuage de points) à laquelle il appartient.

Cette classification est réalisée par l'algorithme des nuées dynamiques (décrit dans la fiche descriptive CCS₄₁) ou par tout autre algorithme qui pourrait être conseillé par l'ISSWG.

Pour les produits IASI, le nombre de classes sera au maximum de 6. Les classes sont déterminées localement (i.e. il n'y a pas de continuité d'une imagerie à l'autre dans la définition des classes par exemple le long de l'orbite). A chaque produit sondeur sera associé la définition du barycentre des classes ainsi que la répartition dans les différentes classes des pixels AVHRR compris dans le pixel sondeur.

5.9.5 CALCUL DES ANGLES DE MESURE

Il s'agit de définir pour une date t donnée en UTC, les directions dans lesquelles sont vues le satellite et le soleil depuis un point M situé au sol (donné par ses coordonnées géographiques). Ces coordonnées doivent être dans le référentiel qui sert à définir la localisation des pixels AVHRR.

Les angles retenus sont (AC) :

- l'azimut : Az^{89}
- l'angle zénithal : z

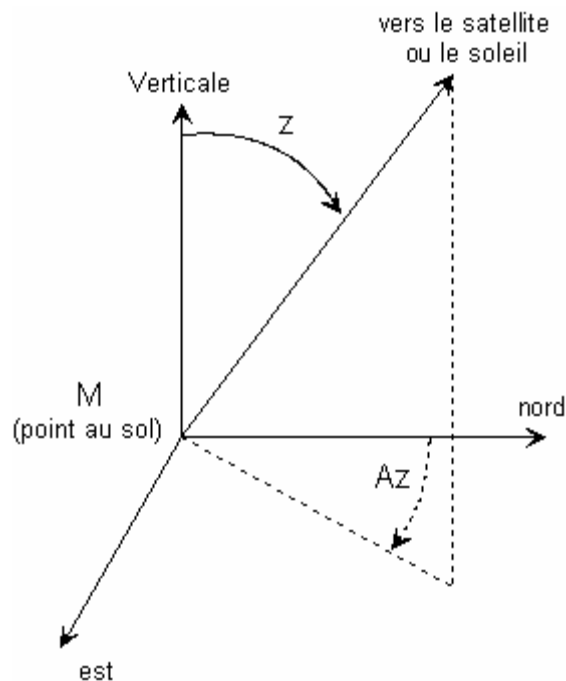


Figure 5.14 – Définition des angles de mesures

5.9.6 INTERFACES AVEC LE SYSTEME EPS-CGS

Les calculs de base suivants sont nécessaires pour l'algorithmie fournissant les produits de niveau 1. Ces calculs sont identifiés dans les fiches descriptives des algorithmes par des appels à des fonctions. Le corps de ces fonctions n'est pas décrit pour le moment car on suppose qu'il s'agit de fonctions de base qui devraient être fournies par le système EPS afin de faciliter la vérification de la cohérence système. La disponibilité des logiciels correspondant par EPS est encore AC.

5.9.6.1 POSITION D'UN POINT VISE AU SOL

Donnée :

- une direction \vec{u} donnée par ses coordonnées dans le repère R_M
- une date t (UTC)

Résultat :

⁸⁹ avec la définition : nord : 0 degré, est : 90 degrés, sud : 180 degrés, ouest : 270 degrés.

			<p>Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE</p> <p>Issue : 6 Date:</p> <p>Rev : 5 Date: 04/06/ 2009</p> <p>Page : 98 of : 502</p>
---	---	--	--

- coordonnées géodésiques du point d'intersection entre la surface terrestre et la droite tracée depuis le satellite Metop (O_M) dans la direction \vec{u} .

Note : Les coordonnées géodésiques (latitude, longitude, altitude) doivent être calculée dans un repère de référence commun à tous les instruments et défini par EPS (en tout cas pour ce qui concerne IASI il est nécessaire d'avoir un référentiel cohérent avec AVHRR).

5.9.6.2 EXTRACTION DE N LIGNES AVHRR ENTRE 2 INSTANTS

Données :

- la date de référence d'une ligne IASI (synchro satellite AC)

Résultat :

- l'image AVHRR couvrant les 30 images IIS de cette ligne ou une référence pointant sur ces lignes dans un produit AVHRR donné (cette image contient N lignes AVHRR, N est défini dans [DR4])
- la configuration des canaux AVHRR correspondants (Jour ou Nuit)

5.9.6.3 CONVERSION ENTRE LE REPERE METOP ET LE RASTER IMAGE AVHRR

Données :

- l'image AVHRR obtenue en 5.9.6.2
- une direction \vec{u} donnée par ses composants dans le repère R_M
- une date t (UTC)

Résultat :

- les coordonnées⁹⁰ (u,v) dans le raster image AVHRR du point d'intersection entre la surface terrestre et la droite tracée depuis le satellite Metop (O_M) dans la direction \vec{u}

5.9.6.4 CONVERSION ENTRE LE RASTER IMAGE AVHRR ET LE REPERE METOP

Données :

- l'image AVHRR obtenue en 5.9.6.2
- un point P au sol donné par ses coordonnées (u, v)⁹¹ dans le raster image AVHRR
- une date t (UTC)

Résultat :

- les composantes dans le repère Metop R_M du vecteur $\overrightarrow{O_M P}$

⁹⁰ Partie entière et fractionnaire.

⁹¹ Partie entière et fractionnaire.

5.9.6.5 CALCUL DE LA DIRECTION DU SOLEIL ET DE METOP VUE DEPUIS UN POINT DONNE AU SOL

Données :

- un point P au sol donné par ses coordonnées géodésiques
- une date t (UTC)

Résultat :

- les angles (Azimut, angle zénithal⁹²) des 2 directions
 - $\overrightarrow{PO_M}$
 - \overrightarrow{PS} où S est le soleil

5.9.7 CALCULS DE GEOLOCALISATION (GEO₄₄)

Etant donnée une direction nominale et une date de prise de vue

- centre d'un pixel sondeur (corrigé de l'offset IIS – sondeur)
- pixel de l'IIS

le but est de déterminer le point visé au sol (latitude et longitude).

Ce calcul est réalisé par l'enchaînement suivant :

- calcul des composantes de la direction visée dans le repère IASI en prenant en compte la rotation définie par § 5.9.2.4
- calcul des composantes dans le repère Metop (§ 5.9.2.2)
- décalage de la direction de la valeur de l'offset IIS-AVHRR exprimé en écart de la ligne de visée (IAC₄₀)
- calcul du point visé au sol dans cette direction § 5.9.6.1).

Cet algorithme se termine par le calcul des angles de vue du satellite Metop et du soleil.

5.10 ALGORITHMES DE « SURVEILLANCE »

Les algorithmes de surveillance implantés dans le logiciel IASI intégré au segment sol EPS sont au nombre de 3. Ces 3 algorithmes sont indépendants. Plus que des algorithmes de surveillance ce sont en fait des algorithmes calculant systématiquement des paramètres synthétiques qui sont ensuite surveillés et analysés sur le long terme par une autre entité (TEC).

1. L'algorithme EXS100 détermine les spectres d'énergie maximale et minimale vus dans chaque canal à partir des spectres de niveau 0.

⁹² Définis par la figure 5.14.

			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 100 of : 502
---	---	--	--

2. L'algorithme DPT₁₁₀ détermine la table des pixels douteux de l'imageur.
3. L'algorithme MXC₁₁₁ analyse la qualité de la calibration radiométrique effectuée à bord par l'algorithme ARC₁₃. Il est décrit dans la section 5.10.3.

5.10.1 MISE A JOUR DES SPECTRES D'ENERGIE MINIMALE ET MAXIMALE (EXS₁₀₀)

Cet algorithme est suffisamment trivial pour qu'il n'y ait pas besoin de le détailler ici.

Le seul point à noter est que l'on est intéressé uniquement par l'évolution des spectres extrêmes atmosphériques. Il faudra donc prendre garde à ne pas les polluer par des spectres des visées de calibration acquis en mode calibration externe.

D'autre part, comme on souhaite pouvoir analyser l'évolution des spectres min et max au cours d'une orbite, ces spectres extrêmes sont calculés sur des séquences de 10 lignes consécutives et transmis à la TEC toutes les dix lignes. Pour réduire le débit ils sont transmis sous forme de température de brillance T_e arrondie à l'entier le plus proche. Plus précisément l'entier $T_e - 100$ codé sur 8 bits est transmis. Une seule valeur par segment de 16 échantillons (définition des plages compatible des tables de codage) est transmise.

5.10.2 DETERMINATION DE LA TABLE DES PIXELS MORTS (DPT₁₁₀)

La détermination de la table des pixels morts de l'IIS est du ressort de la TEC. Cependant, afin que les utilisateurs soient informés rapidement en cas de problème sur l'imageur IASI, un algorithme de surveillance est implanté dans le logiciel OPS. Cet algorithme peut déclarer certains pixels "douteux". Les résultats de ce traitement sont inclus dans les annotations des produits IASI et transmis en parallèle à la TEC à des fins d'analyse.

Un pixel est déclaré douteux si :

- son gain est nettement plus faible que le gain moyen des autres pixels ou que son bruit est trop élevé
- et que cette situation a été détectée plusieurs fois consécutivement.

5.10.3 SURVEILLANCE DE LA CALIBRATION RADIOMETRIQUE COMPLEXE (MCX₁₁₁)

Comme on l'a vu dans la section 3.3.2 la calibration radiométrique complexe effectuée à bord devrait, si elle était parfaite, fournir un spectre de partie imaginaire nulle pour tous les nombres d'ondes. Cette hypothèse est optimiste. En effet, un certain nombre de défauts de l'instrument (par exemple des dérives de température de l'interféromètre) sont susceptibles d'introduire des erreurs de calibration radiométrique qui se traduiront par une partie imaginaire non nulle des spectres calibrés par ARC₁₃. C'est pourquoi cet algorithme transmet au sol une synthèse du résidu imaginaire (voir §4.6) qui permet de détecter des dysfonctionnements éventuels de la calibration radiométrique.

L'algorithme MCX₁₁₁ ne réalise que quelques traitements simples destinés à convertir en erreur de température les résultats produits par ARC₁₃. Cette conversion est faite pour chacune des bandes spectrales de 400 échantillons.

La figure 5.16 ci-dessous en illustre le principe. On voit facilement que l'erreur en luminance s'écrit (avec les notations de la figure)

$$\|S\|(1 - \cos \Phi)$$

Cette erreur en luminance est ensuite convertie en erreur sur la température mesurée.

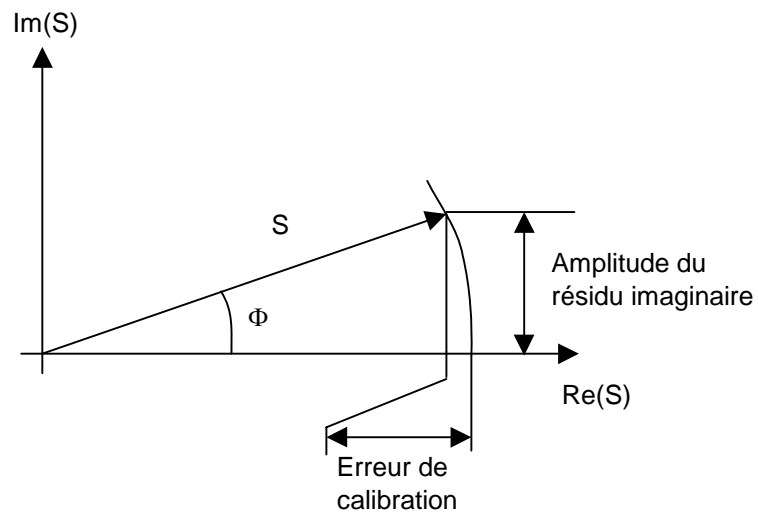


Figure 5.16 – Estimation des erreurs de calibration radiométrique

6. ALGORITHMES D'INITIALISATION (TEC)

Les algorithmes décrits dans cette section préparent les données (tables, etc) qui sont nécessaires pour le fonctionnement des algorithmes bord décrits dans le chapitre 4 ou des algorithmes du segment sol opérationnel décrits dans le chapitre 5.

Certaines parties des traitements décrits ici sont aussi utilisées pour la surveillance de la performance du système IASI. On y fera référence dans la section 8.2

6.1 ARCHITECTURE GENERALE

La figure 6.1 ci-dessous fait apparaître la majorité⁹³ des algorithmes d'initialisation qui sont implantés dans le centre d'expertise technique. Elle fournit, d'autre part, les liens logiques existant entre ces différents algorithmes, liens qui conditionnent l'ordre chronologique d'activation.

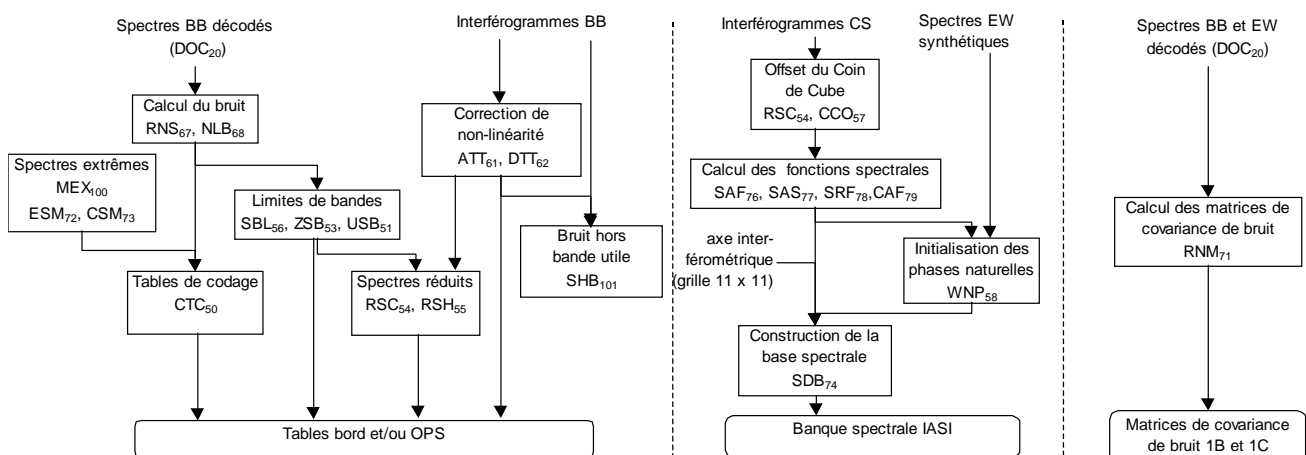


Figure 6.1 – Architecture générale des algorithmes d'initialisation (TEC)

On voit apparaître clairement 3 groupes d'algorithmes.

- ceux qui sont chargés de calculer les tables nécessaires pour le fonctionnement du logiciel de vol et de l'OPS⁹⁴,
- ceux qui sont chargés de calculer la base spectrale qui est transmise à l'OPS et aux utilisateurs,
- ceux qui sont chargés de calculer les matrices de covariance de bruit qui sont transmises aux utilisateurs des produits IASI de niveau 1.

⁹³ quelques algorithmes très simples (PSP₇₅, PDT₈₁) et n'ayant que des liens très faibles avec le reste de l'algorithmie n'ont pas été représentés ici pour éviter de surcharger plus la figure.

⁹⁴ d'autres valeurs nécessaires au fonctionnement des logiciels bord et OPS (seuils de surveillance) sont déterminés à l'aide des fonctions de surveillance implémentées dans la TEC.

6.2 INITIALISATION DES TABLES DE CODAGE (CTC₅₀)

Cet algorithme calcule les tables qui sont utilisées à bord pour le codage des spectres (COD₁₅) et pour leur décodage au sol (DOC₂₀).

L'objectif du codage est de réduire d'un facteur 4 environ le nombre de bits nécessaires pour la transmission d'un spectre. La taille d'un spectre dans la télémessure IASI est en effet de 69104 bits (soit 8.3 bits par échantillon en moyenne) alors que les spectres sont calculés à bord sous forme de flottants sur 32 bits.

Le codage réalisé par l'algorithme COD₁₅ consiste à transformer chacun de ces flottants en un entier codé sur un nombre de bits beaucoup plus faible. La transformation réel vers entier est réalisée par une loi linéaire.

$$N = \text{ROUND}(Scale * S - Off + 1)$$

où ROUND(x) est l'entier le plus proche de x.

Une valeur initiale du pas de codage $S_q = 1/Scale$ est déterminé par le niveau de bruit radiométrique de l'instrument. Plus précisément, S_q est une fraction du bruit radiométrique ΔS (typiquement la moitié) ce qui rend le bruit de codage négligeable.

$$S_q = F \cdot \Delta S \quad (6-1)$$

Le nombre de bits k nécessaires pour obtenir ce pas de codage est déterminé par les valeurs minimales (S_{\min}) et maximales (S_{\max}) de la luminance S qui sont attendues de telle sorte que

$$2^k > \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_q}$$

Ensuite le choix de paramètres

$$Scale = \frac{2^k - 3}{S_{\max} - S_{\min}} \quad (6-2a)$$

et
$$Off = Scale * S_{\min} \quad (6-2b)$$

assure que toutes les valeurs de luminance S comprise entre S_{\min} et S_{\max} pourront être encodées par l'algorithme COD₁₅ sans déclencher de débordements.

Note : Les valeurs $N=0$ et $N=2^k-1$ sont utilisées comme des indicateurs de débordement de table

$$S < S_{\min} \Rightarrow N=0 \quad (\text{UNDERFLOW})$$

$$S > S_{\max} \Rightarrow N=2^k-1 \quad (\text{OVERFLOW})$$

On a détaillé dans ce qui précède les paramètres qui permettent de calculer la loi de codage pour une échantillon spectral

- Niveau de bruit radiométrique de l'instrument ΔS
- Spectres extrêmes susceptibles d'être rencontrés S_{\min} et S_{\max}

Or, comme on l'a vu auparavant (voir figure 6.2 ci-dessous), ces quantités dépendent de la position de l'échantillon spectral n dans la bande utile de l'instrument. Les lois de codage de IASI dépendent donc de n afin de réaliser une compression maximum des spectres. Toutefois, afin de ne pas augmenter exagérément la

taille des tables de codage, celles-ci sont définies par plages de 16 échantillons spectraux (soit nominale⁹⁵ment 4 cm^{-1}).

De plus, les tables $S_q(\text{nseg})$, $\text{Off}(\text{nseg})$ et $k(\text{nseg})$ sont encodées sous forme de petits entiers toujours pour réduire la taille des tables (TabScale, TabOffset et TabNbBits).

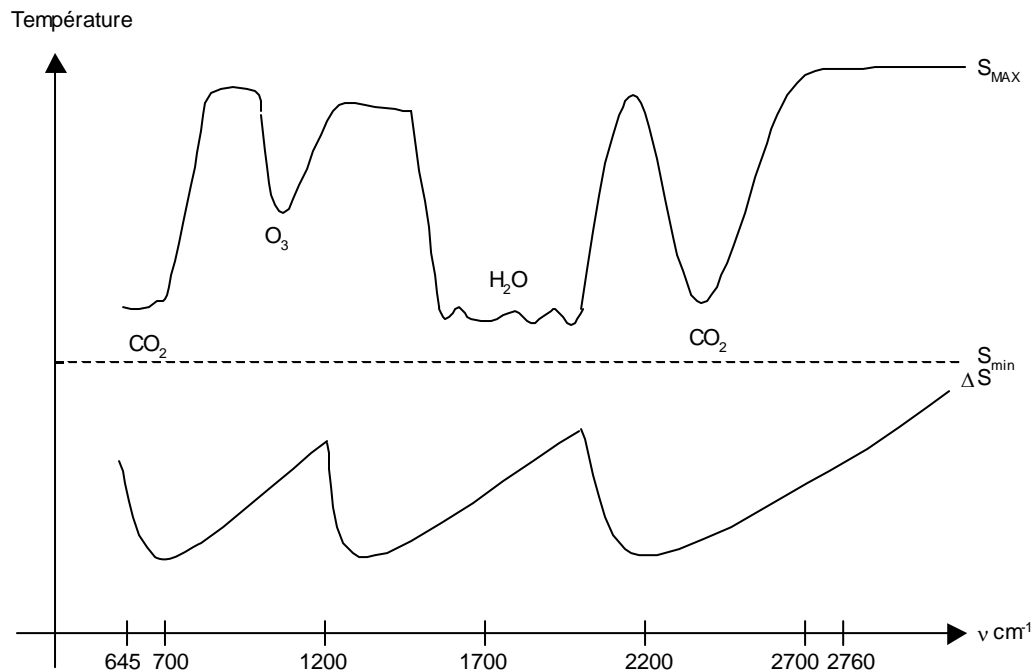


Figure 6.2 – Evolution approximative des spectres extrêmes et du bruit radiométrique dans la bande utile de IASI

Comme on l’a vu dans le § 3.4.5, quatre types de spectres peuvent être transmis par l’instrument :

- visées atmosphériques
- visées espace froid
- visées corps noir chaud
- visées de l’arrière du miroir de scan.

Le niveau de bruit de l’instrument ne dépend que très peu du type de cible visée⁹⁵. En revanche, les valeurs des spectres extrêmes S_{\min} et S_{\max} sont très différents pour ces différents types de cibles. Il y aura donc quatre tables de codage chargées à bord.

Note 1 : Les spectres obtenus sur des visées de calibration ont évidemment une variabilité beaucoup plus faible que les spectres atmosphériques. On en profite pour coder les spectres corps noir avec un pas de codage notablement plus faible que le bruit radiométrique de l’instrument⁹⁶. Cela permettra de

⁹⁵ Cela n’est pas tout à fait vrai pour les visées espace froid dont le bruit en bande B3 est plus faible que celui des autres visées.

⁹⁶ On prendra toutefois des marges suffisantes de façon à s’assurer que les imprécisions liées à la représentation des tables de codage sous forme de petits entiers ne conduisent pas à des saturations (OVERFLOW ou UNDERFLOW).

négliger le bruit de codage lorsqu'on estimera en vol le bruit radiométrique de l'instrument à partir de visées corps noir obtenues en mode calibration externe (algorithme RNS_{67} décrit au § 6.3.3).

Note 2 : Le nombre de bits nécessaires pour coder un spectre augmente lorsqu'on diminue le facteur F de la formule (6-1). On utilise donc ce facteur comme moyen de réglage pour atteindre la limite autorisée sans la dépasser.

Note 3 : La technique de codage utilisée permet de privilégier certaines bandes spectrales (au détriment d'autres qui présenteraient un intérêt moindre pour la mission). On rend donc le facteur F dépendant de ν par une formule du type $F=F' \cdot f(\nu)$ où :

- . F' est un coefficient qui sert comme précédemment à régler le nombre de bits générés,
- . $f(\nu)$ est une fonction permettant de privilégier certaines bandes mission.

Logique de remise à jour

En début de vie, les tables de codage seront initialisées avec des valeurs issues de la recette sol de l'instrument (bruit) et des valeurs prédites par un modèle de transfert radiatif pour les spectres extrêmes atmosphériques. Des marges généreuses auront été prises afin d'éviter des saturations. Ces tables ne seront donc pas forcément optimales. Elles seront remises à jour par la TEC à partir

- des observations des spectres extrêmes accumulées par le logiciel opérationnel (algorithme EXS_{100}),
- des mesures de bruit de l'instrument qui sont réalisées par acquisition en mode calibration externe d'un grand nombre de spectres corps noir chaud (algorithme RNS_{67}). Ces mesures de bruit seront discutées dans la section 6.3.

6.3 INITIALISATION DES LIMITES DE BANDES

Les limites de bandes spectrales discutées ici sont utilisées dans pratiquement tous les algorithmes implémentés à bord de l'instrument IASI et dans le segment sol. La figure 6.3 ci-dessous rappelle les définitions employées.

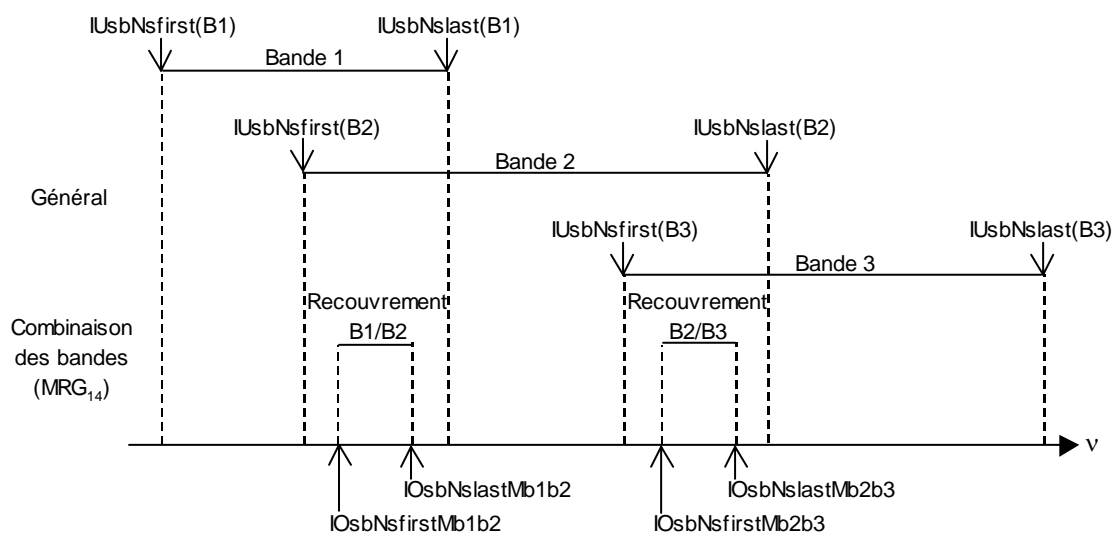


Figure 6.3 – Définition des limites de bandes spectrales utilisées à bord

La définition de ces bandes spectrales est déterminée par :

- l'évolution du bruit radiométrique de l'instrument qui, comme on l'a vu dans le § 4.7, varie fortement en fonction de v et en particulier augmente fortement en limite de bande,
- les contraintes imposées par le logiciel bord.

On commence dans la section 6.3.1 par rappeler les contraintes. La section 6.3.2 présente l'interaction entre les différents algorithmes impliqués. La section 6.3.3 détaille les algorithmes d'estimation de bruit de l'instrument. La section 6.3.4 décrit les algorithmes d'initialisation des limites de bande proprement dits.

6.3.1 CONTRAINTES BORD

La spécification du DPS [DR23] fait apparaître les contraintes suivantes qui doivent être prises en compte pour définir les limites de bandes.

	Nombre d'échantillons maxi	Définition
Bande utile IASI	8500	$IUsbNs_{last}(B3) - IUsbNs_{first}(B1) + 1$
Bande B1	2500	$IUsbNs_{last}(B1) - IUsbNs_{first}(B1) + 1$
Bande B2	3500	$IUsbNs_{last}(B2) - IUsbNs_{first}(B2) + 1$
Bande B3	3600	$IUsbNs_{last}(B3) - IUsbNs_{first}(B3) + 1$
Zone de recouvrement B1/B2	240	$IOsbNs_{lastMb1b2} - IOsbNs_{firstMb1b2} + 1$
Zone de recouvrement B2/B3	400	$IOsbNs_{lastMb2b3} - IOsbNs_{firstMb2b3} + 1$

Table 6.1 – Largeur maximum des différentes bandes spectrales

6.3.2 ARCHITECTURE DES ALGORITHMES

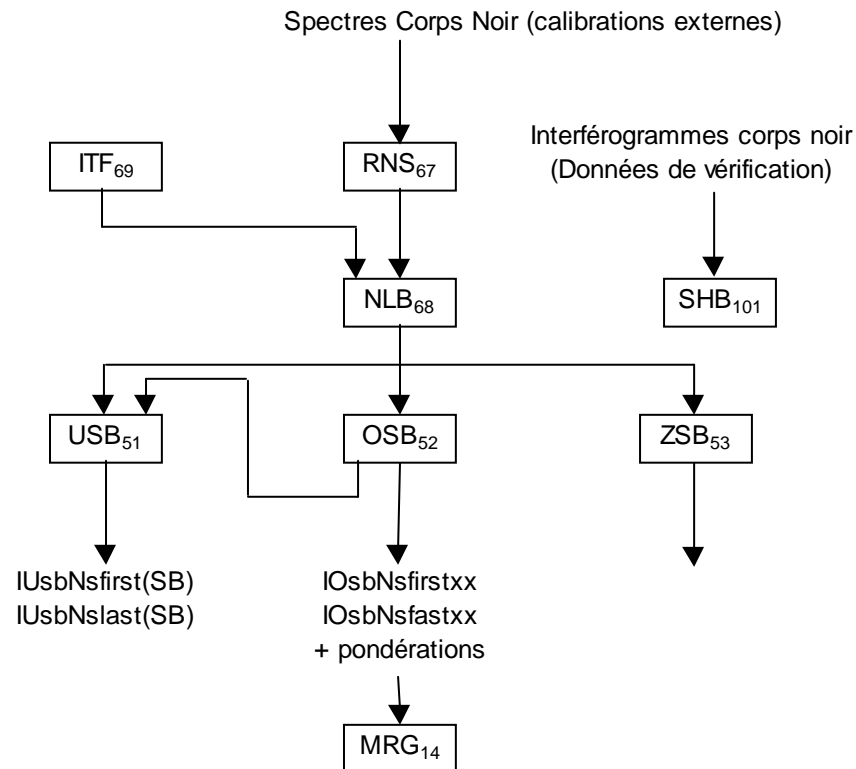


Figure 6.4 – Algorithmes d’initialisation des limites de bandes

L’algorithme RNS_{67} calcule le spectre de bruit de l’instrument IASI sur toute la bande utile. Cette détermination peut être rapide car elle repose sur l’évaluation de la dispersion de spectres corps noir (visée BB acquis en mode calibration externe. On dispose dans ce mode de 27 spectres toutes les 8 secondes pour chaque pixel (voir §3.4.6).

Cette méthode présente toutefois l’inconvénient de ne pas fournir le spectre de bruit brut sur la totalité de la bande acquise par une chaîne de mesure (voir la figure 6.5 ci-dessous). Or cette information est nécessaire pour le calcul des poids à utiliser dans l’algorithme MRG_{14} (voir § 4.7).

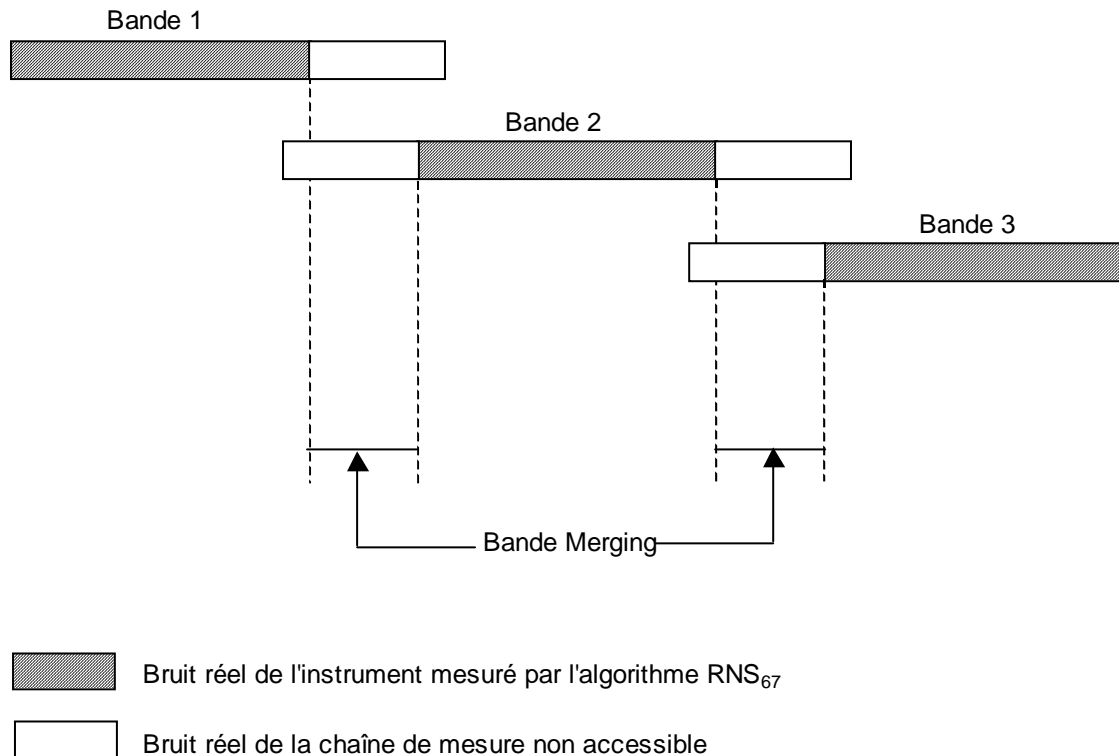


Figure 6.5 – Mesure du bruit de l'instrument fourni par l'algorithme RNS₆₇

Plusieurs solutions sont toutefois possibles pour accéder au bruit réel de la chaîne dans les zones de "band merging".

1. Extrapoler le bruit à partir des mesures fournies par RNS₆₇, de la connaissance de la fonction de transmission de l'interféromètre et de l'évolution connue du signal (spectre du corps noir) : algorithme NLB₆₈
2. Une autre solution plus drastique consisterait à réduire au minimum les plages de bande merging avant de faire les acquisitions en calibration externe pour l'estimation du bruit par RNS₆₇.

Une fois caractérisé le bruit de l'instrument pour chaque pixel et pour les 3 bandes spectrales, on commence par déterminer les zones de recouvrement entre bandes (SBL₅₆). En fait, cet algorithme calcule l'ensemble des données qui sont nécessaires à l'algorithme bord (MRG₁₄) (limites de bandes et poids).

A partir de ces zones de recouvrement, l'algorithme SBL_{56} détermine les limites de chacune des 3 bandes. Après validation de ces chiffres par l'opérateur de la TEC, l'algorithme USB_{51} calcule les valeurs de limites bandes qui sont effectivement utilisées par les algorithmes bord et sol.⁹⁷

Les limites de bandes calculées par ZSB_{53} sont utilisées pour le calcul des spectres réduits.

6.3.3 ESTIMATION DU BRUIT

A partir de spectres du corps noir de calibration obtenus dans le mode calibration externe (nombre de lignes AD), l'algorithme RNS_{67} détermine le bruit de l'instrument de la manière suivante.

1. Calcul de la moyenne du spectre sur chaque ligne (typiquement)
2. Calcul des écarts à cette moyenne pour chaque spectre de la ligne
3. Calcul des écarts quadratiques moyens (pour chaque échantillon spectral) sur l'ensemble des données disponibles.

Les spectres de bruit issus de RNS_{67} sont exprimés en luminance et en $Ne\Delta T$ pour une scène à 280 K afin de pouvoir les comparer facilement avec les spécifications instrument. En phase de routine, les spectres de bruit seront évalués à partir des spectres 1B calculés par l'OPS (accès aux données archivées dans le segment sol EPS).

L'algorithme SHB_{101} réalise les mêmes opérations mais sur un nombre de spectres nécessairement plus limité. En effet, ces spectres sont obtenus directement comme les transformées de Fourier inverses d'interférogrammes (visées BB) transmises dans les données de vérification. On obtient donc un seul interférogramme toutes les 8 secondes donnant l'information pour 1 pixel et 1 bande au lieu de 120 spectres couvrant les 3 bandes B1, B2 et B3 à disposition de l'algorithme RNS_{67} .

L'avantage des spectres de bruit obtenus par l'algorithme SHB_{101} est qu'ils fournissent beaucoup d'informations. En effet l'interférogramme étant fortement suréchantillonné, le spectre brut est obtenu jusqu'à un nombre ν_{max} approximativement égal à 6500 cm^{-1} . La présence d'une énergie importante (bruit ou moyenne) en dehors des bandes utiles définies est certainement le signe d'un problème (voir la section 8.2.1). Mais d'autre part, l'analyse de ce signal est la clé pour corriger certains défauts de l'instrument (voir § 6.6 et en particulier 6.6.3).

6.3.4 INITIALISATION DES LIMITES DE BANDES

6.3.4.1 ZONES DE RECOUVREMENT INTERBANDES (SBL_{56})

La détermination des zones de recouvrement interbandes (par exemple B1/B2) utilisées par l'algorithme MRG_{14} repose sur l'analyse de l'évolution du rapport entre les niveaux de bruit observé dans les deux bandes. La figure 6.6 ci-dessous montre une évolution théorique de ce rapport et illustre la méthode employée dans l'algorithme.

⁹⁷ Pour des raisons historiques, les conventions sur les numéros d'échantillons spectraux qui sont utilisés à bord et au sol sont différentes. $\nu_i = i \Delta\nu$ à bord, $\nu_k = (k-1)\Delta\nu$ au sol. Afin de minimiser le risque d'erreur, la conversion entre ces deux conventions est localisée dans l'algorithme USB_{51}

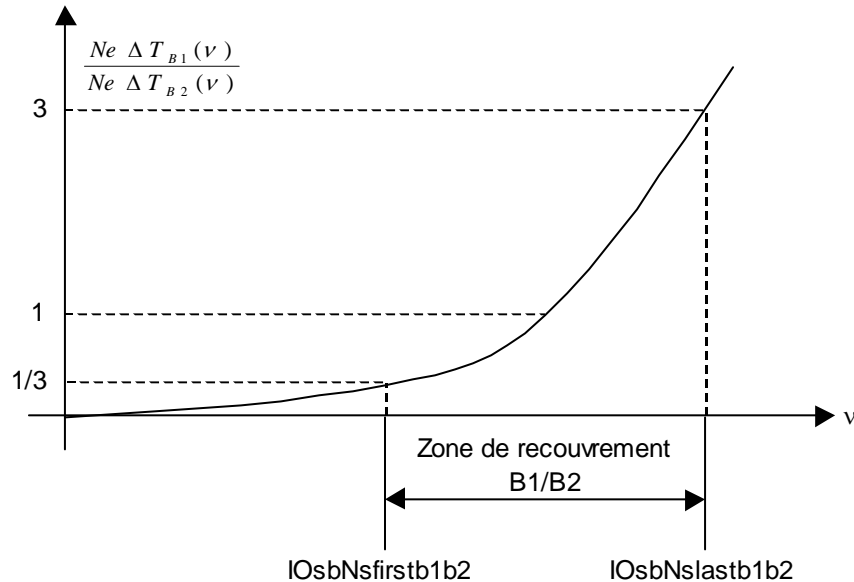


Figure 6.6 – Illustration de la méthode de détermination des limites de recouvrement (OSB₅₂)
Note : Le chiffre 3 est une valeur typique.

Le spectre combiné s'écrivant $S(v) = w(v)S_1(v) + (1 - w(v))S_2(v)$ (voir § 4.7).

La valeur de $w(v)$ qui minimise la variance du spectre $S(v)$

$$\sigma^2(v) = w^2(v)\sigma_1^2(v) + [1 - w(v)]^2\sigma_2^2(v)$$

vaut

$$w(v) = \frac{1}{\frac{\sigma_1^2(v)}{\sigma_2^2(v)} + 1} \quad (6-4)$$

La valeur 3 choisie ci-dessus pour illustrer la méthode correspond au choix d'arrêter les combinaisons de spectres dès que $w(v) \notin [0.1, 0.9]$.

Si les contraintes imposées par le logiciel bord (§ 6.3.1) le permettent, on peut prendre une valeur plus élevée pour cette valeur.

6.3.4.2 DETERMINATION DES LIMITES DES BANDES SPECTRALES UTILES (SBL₅₆)

L'algorithme part des limites de zones de recouvrement déterminées précédemment et des limites théoriques de la bande utile de IASI. Les 3 bandes qui sont définies par ces 6 valeurs sont arbitrairement étendues dans chaque direction d'une valeur constante. Ensuite, l'algorithme détermine s'il est encore possible d'étendre la bande sans dépasser un seuil fixé sur le bruit.

Encore une fois l'algorithme fait l'hypothèse d'un spectre de bruit "lisse". La sélection des limites de bandes pourrait ici aussi se faire manuellement au vu de tracés du spectre de bruit. Il serait sage toutefois d'implémenter une vérification automatique du respect des contraintes imposées par le logiciel bord.

6.3.4.3 DETERMINATION DES LIMITES DE BANDES DES SPECTRES REDUITS DE CALIBRATION (ZSB₅₃)

Cet algorithme fournit pour la bande de détermination du ZPD (nominalement B3) les limites de la zone à l'intérieur de laquelle le rapport signal à bruit est supérieur à une borne donnée. Il s'agit donc d'un algorithme très similaire à celui qui détermine les bandes utiles. Toutes les remarques faites dans la section précédente s'appliquent et ne seront pas reprises ici.

Les bornes déterminées ici sont celles qui définissent la plage spectrale utilisée pour le calcul de la moyenne à la droite de calibration dans l'algorithme ZPD₄ (voir § 3.3.3 pour un rappel de ces notions).

6.4 INITIALISATION DES FONCTIONS SPECTRALES

L'objectif de cette section est de définir comment sont calculées les tables décrivant les fonctions spectrales utilisées notamment par les algorithmes du segment sol opérationnel (voir section 5). Il s'agit :

- des fonctions de calibration spectrale
- des fonctions d'apodisation.

De plus on verra aussi comment sont calculées les fonctions d'instrument qui sont transmises à Eumetsat pour les utilisateurs qui souhaiteraient utiliser les produits 1B.

Enfin on trouvera dans la section 6.4.2 la véritable définition précise de l'axe interférométrique.

Note importante : tous les algorithmes décrits dans cette section correspondent à une définition préliminaire issue de la phase B. Ils sont de la responsabilité du maître d'œuvre instrument et sont susceptibles d'être modifiés à la suite des caractérisations de l'instrument effectuées au cours de la recette sol.

6.4.1 ARCHITECTURE GENERALE

Ainsi que le montre la théorie décrite dans les sections 3.5 à 3.7, toutes les caractéristiques spectrales de l'instrument se déduisent de la fonction d'autoapodisation. Le modèle optique et géométrique de l'instrument sur lequel repose le calcul de cette fonction est décrit en détail dans la section 6.4.2.

L'algorithme correspondant est SAF₇₆ (complété par SAS₇₇).

Les entrées du modèle nécessaires à cet algorithme sont préparées par CCO₅₇ (calcul de l'offset long terme du coin de cube) et CCM₆₅ (initialisation du mouvement du coin de cube).

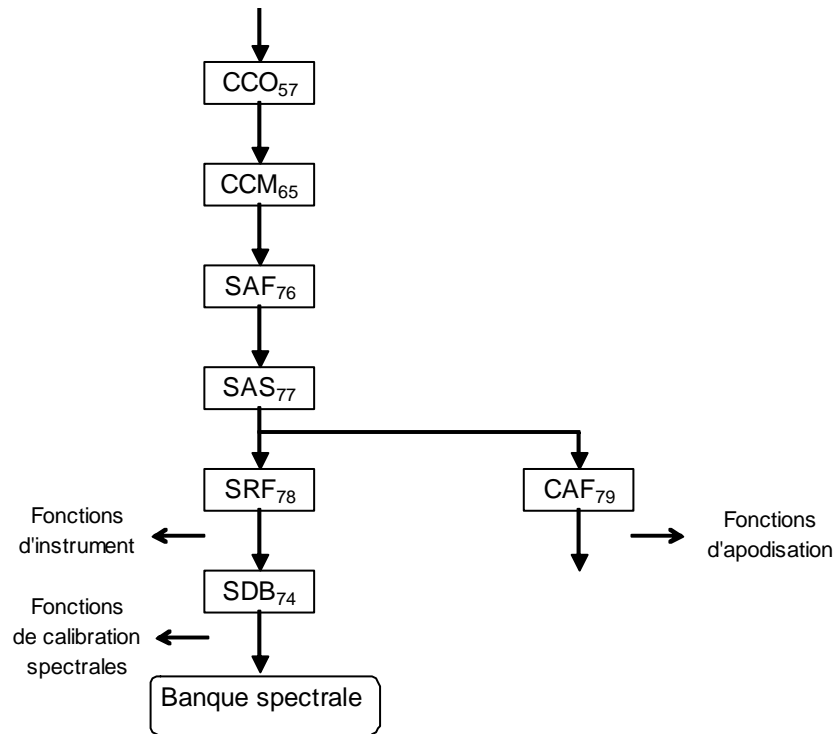


Figure 6.7 – Initialisation des fonctions spectrales

Enfin, les trois derniers algorithmes SRF₇₈, CAF₇₉ et SDB₇₄ calculent ce qui est réellement la sortie de ce groupe d'algorithmes, c'est-à-dire :

- les fonctions d'instrument (SRF₇₈)
- les fonctions d'apodisation (CAF₇₉)
- les fonctions de calibration spectrales (SDB₇₄)

Toutes ces fonctions doivent être tabulées pour les 121 positions de l'axe interférométrique de la grille définie au § 5.1.6. Collectivement ces tables constituent la banque spectrale IASI qui est calculée par l'algorithme SDB₇₄.

6.4.2 MODELE OPTIQUE ET GEOMETRIQUE DU SONDEUR IASI

6.4.2.1 INTEGRATION DANS LE CHAMP

On conserve pour le moment le modèle extrêmement simple de l'interféromètre qui a été introduit dans la section 3.5 et qui fait l'hypothèse que tous les éléments (coins de cube, lame séparatrice et mécanisme de mouvement du coin de cube) sont parfaits sans être forcément parfaitement alignés.

La fonction d'autoapodisation a été introduite en §3.6.1. On a vu qu'elle était définie par la formule (13)

$$A(x, \nu) = I(x, \nu) e^{i2\pi x \nu} \quad (6-5)$$

$I(x, \nu)$ représente l'interférogramme correspondant à une onde plane monochromatique ν pour une position du coin de cube mobile conduisant à une différence de marche x sur l'axe. Tout le problème revient donc à calculer l'interférogramme théorique $I(x, \nu)$.

Comme l'état d'interférence varie dans le champ (voir par exemple les figures 3.20) on doit se donner une forme de pixel pour pouvoir calculer cet interférogramme théorique. Cette forme de pixel est donnée par une fonction $IPSF(\vec{u})$ dépendant de la direction de visée \vec{u} . Cette fonction décrit la non uniformité de réponse du pixel dans le champ. Elle est normalisée ($\int_{pixel} IPSF(\vec{u}) dS = 1$).

On obtiendra donc l'interférogramme théorique en intégrant sur toute la surface du pixel

$$I(x, \nu) = \int_{pixel} I(x, \nu, \vec{u}) IPSF(\vec{u}) dS \quad (6-6)$$

$I(x, \nu, \vec{u})$ est l'interférogramme qui serait observé par un pixel infiniment petit situé dans la direction \vec{u} . On s'intéresse ici aux deux composantes de l'interférogramme complexe. On a donc :

$$I(x, \nu, \vec{u}) = e^{i2\pi\nu 2\overrightarrow{C1C2} \cdot \vec{u}} \quad (6-7)$$

x est la différence de marche comptée sur l'axe de déplacement théorique du coin de cube (axe \vec{x})

$$x = 2\overrightarrow{C1C2} \cdot \vec{x}$$

Avant d'aller plus loin, c'est-à-dire avant de définir le repère de référence (\vec{x} , \vec{y} , \vec{z}) et la trajectoire du vecteur $\overrightarrow{C1C2}$, il est nécessaire de modifier légèrement le modèle pour tenir compte de l'épaisseur finie de la lame séparatrice. C'est ce qui va être décrit dans la section suivante.

6.4.2.2 OFFSET CHROMATIQUE

Le modèle de calcul présenté dans la section précédente doit être modifié légèrement pour tenir compte du chromatisme introduit par la configuration optique de l'instrument qui n'est pas tout à fait classique⁹⁸.

On se référera à [DR36] pour une présentation détaillée des propriétés de cette configuration. On peut toutefois comprendre qualitativement le phénomène qui conduit à la nécessité de la correction de « l'offset chromatique » selon la terminologie employée dans la fiche SAF₇₆.

Cette notion d'offset chromatique est liée au décalage latéral des rayons qui sortent d'une lame à face parallèle attaquée sous incidence. Ce décalage dépend de l'indice de réfraction du matériau et donc de la longueur d'onde de la radiation incidente. On se reportera à la figure 6.8 ci-dessous sur laquelle on a tracé 2 rayons ayant une même origine mais de longueur d'onde différente.⁹⁹

⁹⁸ la lame compensatrice déportée est orthogonale au faisceau au lieu d'être parallèle à la séparatrice

⁹⁹ les angles d'incidence sur la lame ne sont pas respectés pour faciliter la représentation des rayons réfractés

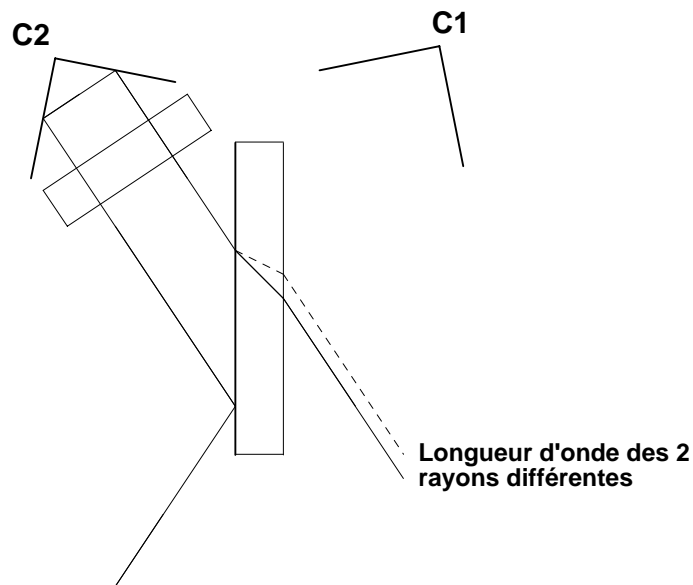


Figure 6.8 – Chromatisme d’une lame à faces parallèles

Sur la figure 6.9 on a tracé la trajectoire de ces mêmes rayons cette fois dans les deux bras de l’interféromètre de manière à montrer les effets différentiels qui sont à l’origine de « l’offset chromatique ».

On voit sur cette figure que, pour une longueur d’onde particulière (rayon tracés en traits continus), les rayons issus des 2 bras sont confondus. Un observateur qui placerait son oeil à la sortie de l’interféromètre verrait donc les sommets des 2 coins de cube confondus pour cette longueur d’onde particulière.

Pour une autre longueur d’onde en revanche les rayons des 2 bras sont décalés. L’observateur observerait alors un décalage entre les deux coins de cube. Ce phénomène purement optique est absolument indiscernable d’un décalage qui serait dû à un déplacement d’un des 2 coins de cube. On parle donc de l’« offset chromatique »¹⁰⁰ qui est représenté sur la figure 6.10 ci-dessous.

¹⁰⁰ les différences de trajet optique entre les deux bras dont on vient de discuter ici induisent aussi une variation de la position du ZPD en fonction de la longueur d’onde de la radiation incidente. C’est l’explication de la fonction d’erreur de phase théorique dont il sera question au paragraphe suivant.

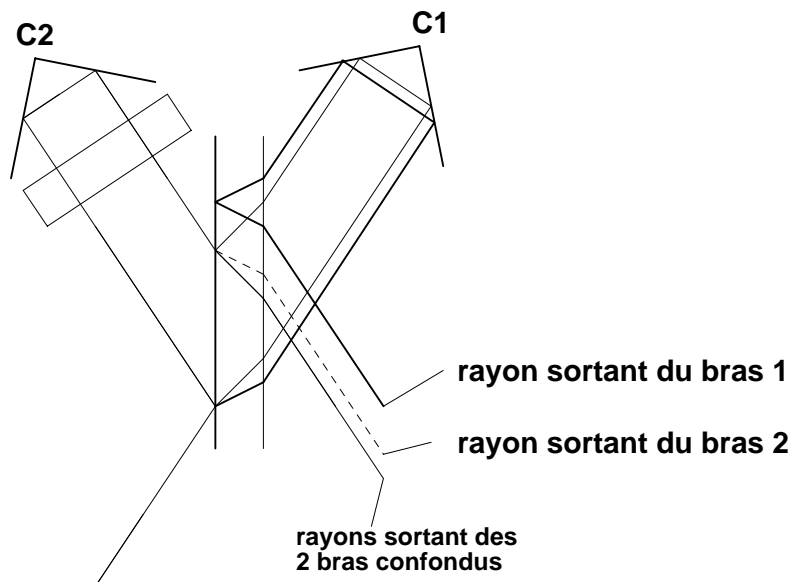


Figure 6.9 – Chromatisme différentiel entre les deux voies

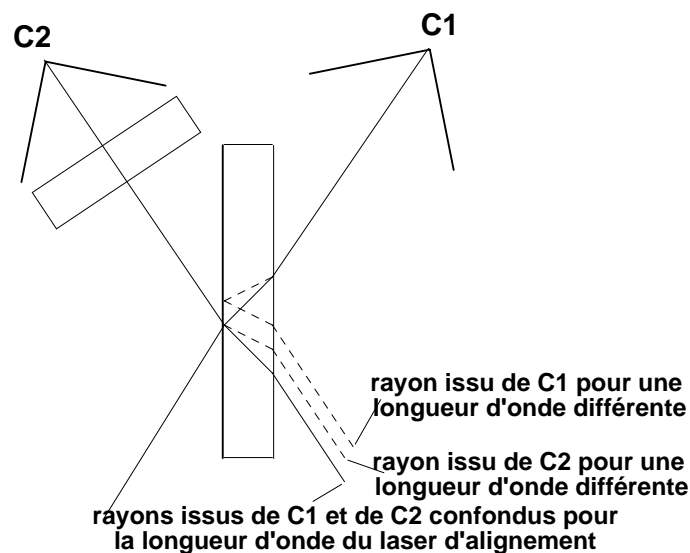


Figure 6.10 – “Offset chromatique” du coin de cube

6.4.2.3 REPERE DE REFERENCE

Il nous reste maintenant à rassembler ce qui vient d’être dit ci-dessus pour préciser le modèle de calcul de la fonction d’autoapodisation. Pour cela il faut définir l’espace dans lequel on travaille.

Dans la section d’introduction (§3.5) on a présenté l’offset du coin de cube à partir de l’image CC2’ du coin de cube mobile CC2 dans l’espace du coin de cube fixe CC1. En fait, parler d’image devient un abus de langage à partir du moment où on a introduit une lame séparatrice épaisse dans le modèle. **Ce qu’on cherche**

réellement, c'est à déterminer la position, dans l'espace de sortie de l'interféromètre, des coins de cube qui donneraient les mêmes plans d'onde que l'interféromètre réel ¹⁰¹.

C'est donc dans cet espace de sortie qu'est défini le repère de référence $(O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$:

- l'axe \vec{x} est l'axe nominal de déplacement du coin de cube,
- l'axe \vec{z} est dans le plan de la lame séparatrice orthogonal à \vec{x} ,
- l'axe \vec{y} complète le trièdre direct $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$.

6.4.2.4 TRAJECTOIRE DU COIN DE CUBE

La trajectoire relative des 2 coins de cube (vecteur $\overrightarrow{C1C2}$) peut alors être donnée sous forme paramétrique par ses 3 composantes dans cet espace (variables $ApexX$, $ApexY$, $ApexZ$ dans les fiches descriptives)

$$\overrightarrow{C1C2}(t) = ApexX(t) \vec{x} + (y_0 + ApexY(t)) \vec{y} + (z_0 + ApexZ(t)) \vec{z} + \vec{\delta}_c(\nu, \vec{u}) - \vec{\delta}_c(\nu_0, \vec{x}) \quad (6-8)$$

(y_0, z_0) est « l'offset constant » du coin de cube dont on a déjà parlé (qui peut être réévalué en vol grâce à l'algorithme CCO₅₇)

$(ApexX(t), ApexY(t), ApexZ(t))$ est une correction qui a été caractérisée en recette équipement (composante linéaire ou parabolique du mouvement par exemple)

$\vec{\delta}_c(\nu, \vec{u})$ est l'offset chromatique discuté en § 6.4.2.2

ν_0 est le nombre d'ondes pour lequel l'effet de l'offset chromatique est minimisé¹⁰² C'est normalement le nombre d'ondes du laser d'alignement

6.4.2.5 DESCRIPTION DES PIXELS DU SONDEUR (IPSF)

La géométrie des pixels du sondeur ¹⁰³ est définie par le diaphragme de champ placé dans le plan focal du miroir M4 (voir la figure 3.17). Cette géométrie est donc parfaitement figée et déterminée une fois pour toute lors des caractérisations de l'instrument qui sont effectuées pendant le recette au sol.

Cependant la position de ce diaphragme est susceptible d'évoluer par rapport à la trajectoire du CC. C'est la cause du déplacement de l'axe interférométrique.

La géométrie relative des pixels ainsi que leur taille reste donc fixe au cours du temps. On la décrira dans un repère de référence (O, \vec{y}, \vec{z}) où le point O est une origine quasiment arbitraire située approximativement au milieu des 4 pixels et qui est nominalement située sur l'axe \vec{x} si l'interféromètre est parfaitement aligné. Elle

¹⁰¹ c'est aussi ce que l'on faisait implicitement dans le modèle à lame séparatrice infiniment mince, puisqu'alors il n'y a pas de différence entre l'espace du CC1 et l'espace de sortie.

¹⁰² l'effet ne peut pas être annulé dans tout le champ de l'instrument. On le minimise en l'annulant au centre du champ, c'est-à-dire dans la direction \vec{x}

¹⁰³ forme et position relative des pixels

sera donnée pour chaque pixel p par une matrice W_{ij}^p donnant la valeur de l'IPSF du pixel p sur une grille régulière¹⁰⁴ (voir fig. 6.11 ci-dessous).

Note : La figure ci-dessous n'a pas vocation à décrire la position des pixels du sondeur dans le repère plan focal. Cette description est en effet contenue dans le fichier de configuration OPS et pourra donc être modifiée au cours de la recette en vol de l'instrument IASI.

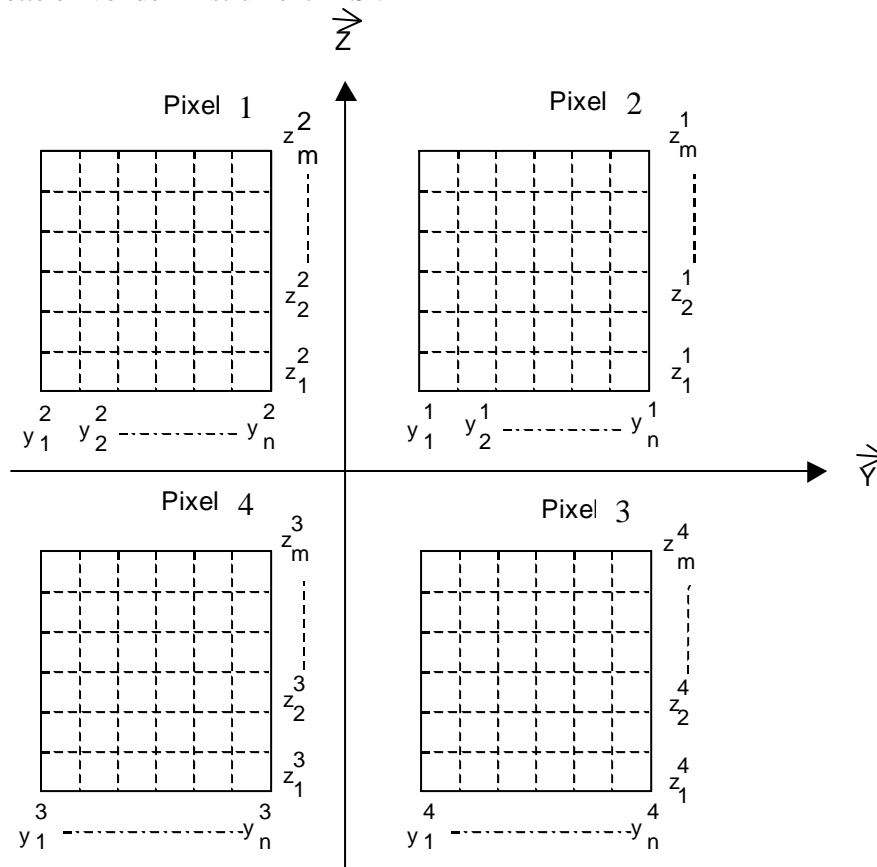


Figure 6.11 – Grille de description des IPSF dans le repère nominal instrument

Compte tenu de cette description des pixels sondeurs, on obtient l'IPSF dans la direction $\vec{u} = \vec{x} + Y\vec{y} + Z\vec{z}$ et pour une position donnée de l'axe interférométrique $\vec{a} = \vec{x} + Y_A\vec{y} + Z_A\vec{z}$ par $IPSF^p(\vec{u}) = W_{ij}^p$ où i et j sont définis par $y_i \leq Y - Y_A < y_{i+1}$ et par $z_j \leq Z - Z_A < z_{j+1}$.

La position de l'axe interférométrique est donc l'endroit où l'axe \vec{x} "perce" le plan des pixels.

¹⁰⁴ La grille définissant l'IPSF de chaque pixel est de taille 100 x 100 ou inférieure ; elle décrit le pixel avec une résolution angulaire de 0,5 mrad nominale.

6.4.2.6 ECHANTILLONNAGE

On a vu dans la section 3.2.4 que l'interférogramme est échantillonné tous les $0,7 \mu\text{m}$ environ. La valeur de ce pas doit être rigoureusement constante et connue avec une grande précision car c'est elle qui fixe les nombres d'ondes ν_n pour lesquelles les spectres bruts sont calculés à bord (formules (9a) et (9b)).

Comme la vitesse de déplacement du miroir mobile ne peut pas être stabilisée avec une précision suffisante, les instants d'échantillonnage ne sont pas fournis par une horloge stable. En fait, ils sont fournis par un deuxième interférogramme auxiliaire obtenu à partir d'une source de référence monochromatique (L) dont la longueur d'onde est parfaitement connue (laser). La figure 6.12 ci-dessous montre le schéma de principe d'obtention d'un tel interférogramme auxiliaire.

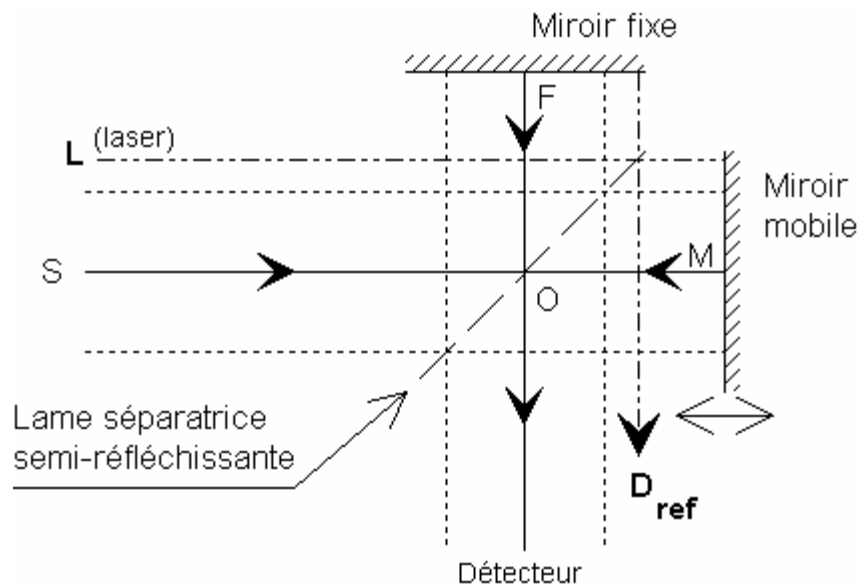


Figure 6.12 – Interférogramme de référence

L'analyse du §3.2.1 qui s'applique directement montre alors que l'interférogramme de référence s'éteint régulièrement avec une périodicité spatiale rigoureusement constante¹⁰⁵, égale à la moitié de la longueur d'onde du laser de référence. Les passages à zéro de ce signal (dits signal RPD pour *Reference Path Difference*) sont utilisés pour déclencher le prélèvement des échantillons de l'interférogramme mesuré.

Plus précisément, l'interférogramme laser s'écrit :

$$I(x) = \cos(2\pi\nu_{\text{laser}}x)$$

où

$$x = 2C_1C_2 \cdot \vec{u}_{\text{laser}}$$

on voit que les positions d'échantillonnage sont obtenues pour :

¹⁰⁵ Laser stabilisé par une transition moléculaire de l'acétylène.

$$\overrightarrow{C_1 C_2} \cdot \vec{u}_{laser} = \frac{k}{4\nu_{laser}} + \varepsilon \quad k=\text{entier} \quad (6-9)$$

Le terme ε est induit par le retard dans les chaînes électroniques.

La figure 6.13 fournit une interprétation géométrique de l'équation (6-9). Elle montre les positions géométriques du coin de cube (vecteur $\overrightarrow{C_1 C_2}$) correspondant aux échantillons de l'interférogramme.

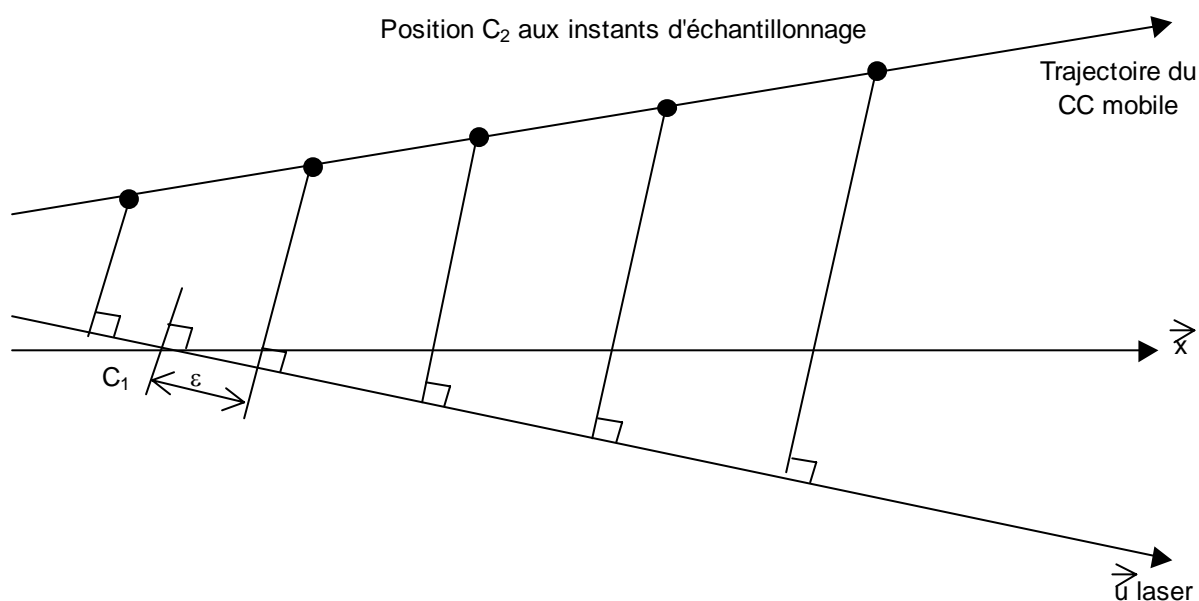


Fig . 6.13 – Géométrie de l'échantillonnage

Note : Si l'alignement de l'interféromètre était parfait, la trajectoire du coin de cube mobile serait parallèle à l'axe du laser \vec{u}_{laser} .

D'autre part l'axe de référence \vec{x} qui pour le moment n'a pas été matérialisé peut être considéré comme étant confondu avec \vec{u}_{laser} (par définition).

6.4.3 DETERMINATION DE L'OFFSET DU COIN DE CUBE (CCO₅₇)

6.4.3.1 INTRODUCTION

Un paramètre d'entrée pour le calcul des fonctions spectrales est "l'offset constant" du coin de cube

$$y_0 \vec{y} + z_0 \vec{z}$$

qui intervient dans l'équation (6-8). On a vu son importance dans le § 3.6.1 (figure 3.21b).

Ce défaut d'alignement sera caractérisé en recette sol instrument (on cherche à le réduire au maximum) mais il est susceptible d'évoluer notamment à cause des charges subies au lancement. Il est donc prévu de le réestimer en vol (algorithme CCO₅₇).

Au sol, la caractérisation peut se faire en analysant l'enveloppe d'un interférogramme laser qui fournit "directement" le module de la fonction d'auto-apodisation.

6.4.3.2 PRINCIPE DE L'ALGORITHME

En vol, on est amené à utiliser une technique complètement différente. Celle-ci repose sur le fait que la position du Zpd par rapport aux points d'échantillonnage dépend de l'amplitude de l'offset constant du coin de cube pour un pixel hors axe (voir figure 6.14 ci-dessous).

Pour tracer cette figure on a utilisé le fait que la différence de marche nulle (Zpd) pour une direction d'observation \vec{u} est obtenue lorsque le vecteur $\overrightarrow{C_1 C_2}$ est perpendiculaire à \vec{u} (puisque la différence de marche vaut $x = 2\overrightarrow{C_1 C_2} \cdot \vec{u}$). On a d'autre part considéré pour simplifier la figure que l'axe \vec{x} était défini par la direction du laser Rpd et que la direction de déplacement du coin de cube était parallèle à cet axe.

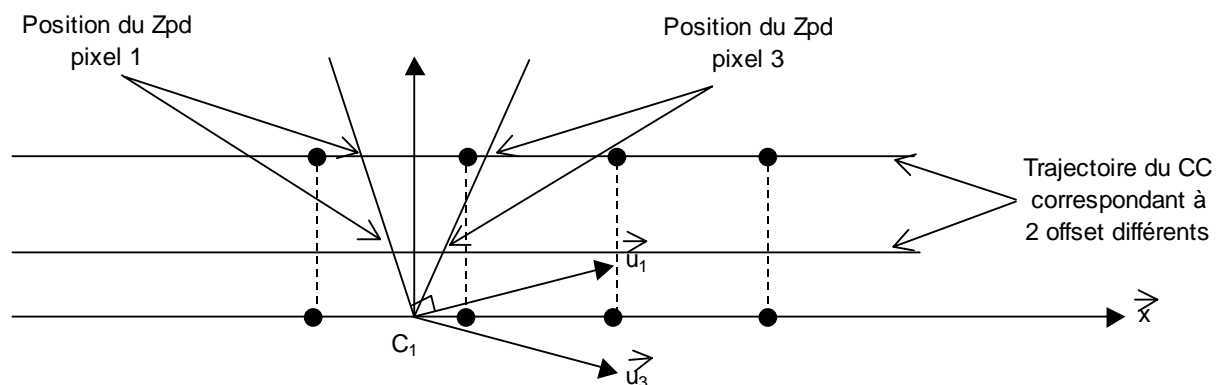


Fig. 6.14 – Principe de détermination de l'offset constant du CC en vol

La figure est tracée dans le plan qui contient le centre de 2 pixels symétriques par rapport à l'axe (par exemple les pixels 1 et 3).

On voit que la distance entre les positions du Zpd déterminées sur les interférogrammes 1 et 3 croît linéairement avec l'amplitude de l'offset du CC (on utilise la différence entre 2 valeurs pour éliminer l'erreur ε due au retard dans les chaînes électroniques).

Plus précisément, on obtient les équations de la fiche algo CCO₅₇ de la façon suivante.

Si on écrit la trajectoire¹⁰⁶ :

$$\overrightarrow{C_1 C_2}(x) = \overrightarrow{C_1 C_{2_0}} + x\vec{x} = y_0\vec{y} + z_0\vec{z} + x\vec{x}$$

La position x_p du Zpd pour chaque pixel p est donnée par :

$$\overrightarrow{C_1 C_2}(x_p - \varepsilon) \cdot \vec{u}_p = 0$$

où \vec{u}_p est la direction du centre du pixel p

¹⁰⁶ Cette équation est cohérente avec l'équation (6-8) parce qu'on construit les fonctions ApexY et ApexZ de telle sorte qu'elles soient nulles lorsque $x = 0$.

d'où
$$\overrightarrow{C_1 C_{20}} \cdot \vec{u}_p + (x_p - \varepsilon) \vec{x} \cdot \vec{u}_p = 0$$

et en choisissant un pixel particulier p_0 (par exemple le pixel 1 s'il est disponible) on obtient 3 équations

$$\overrightarrow{C_1 C_{20}} \cdot (\vec{u}_p - \vec{u}_{p0}) = (x_{p0} - x_p) \vec{x} \cdot \vec{u}_p \quad (6-10)$$

qui permettent de déterminer les 2 composantes (y_0, z_0) de $\overrightarrow{C_1 C_{20}}$ lorsqu'on connaît les 4 valeurs de x_p ¹⁰⁷.

Ces valeurs sont un sous produit des calculs des spectres réduits (algorithmes RSC₅₄ et RSH₅₅) et d'un post traitement qui va être expliqué dans la section suivante.

On peut noter que la géométrie fait qu'une erreur de détermination de la position du Zpd entraîne une erreur sur l'offset restitué qui est environ 50 fois plus importante. Il est donc nécessaire de moyenner les positions x_p sur plusieurs interférogrammes avant de les utiliser en entrée de CCO₅₇ pour diminuer le bruit.

On a le choix de faire la détermination d'offset du coin de cube à partir des Zpd de visées espace froid (fournis par RCS₅₄) ou de visée corps noir (fournis par RSH₅₅).

On utilisera nominalelement les visées espace froid car cela demande deux fois moins d'interférogrammes et donc réduit la durée nécessaire à l'acquisition des interférogrammes de vérification.

L'inconvénient est que le bruit risque d'être un peu plus élevé que sur les Zpd corps noir. Si le bruit est trop élevé, on se rabattra sur cette dernière solution.

6.4.3.3 MISE EN COHERENCE DES ZPD SUR LES 4 PIXELS

Les algorithmes de calcul des spectres réduits (RSC₅₄ et RSH₅₅) fournissent comme sous produit la position du Zpd pour chaque interférogramme qui leur est transmis.

Cette position est définie par le nombre d'échantillons qui séparent le Zpd du premier point de l'interférogramme (partie entière et fraction d'échantillon).

On sait que la position géométrique correspondant au Zpd évolue très peu au cours du temps et pourtant on va observer des fluctuations importantes (de quelques dizaines d'échantillons) de la position du Zpd restitué d'une ligne à l'autre. Ces fluctuations sont simplement dues au fait que le premier point des interférogrammes ne correspond pas toujours à la même position géométrique du CC (jitter de l'horloge ASE qui déclenche le début de l'acquisition).

Comme les 4 Zpd utilisés pour déterminer l'offset CC sont acquis sur des lignes différentes¹⁰⁸, il est nécessaire de corriger les sorties de RSC₅₄ et RSH₅₅ avant d'appeler CCO₅₇. On va décrire la méthode en considérant l'utilisation de 4 interférogrammes seulement.

La généralisation à un nombre d'interférogrammes plus important pour réduire le bruit est immédiate.

On dispose de :

¹⁰⁷ Pour obtenir les formules de la fiche CCO₅₇, il faut tenir compte de l'approximation $\vec{x} \cdot \vec{u}_p \approx 1$.

¹⁰⁸ On les obtient nominalelement à partir d'interférogrammes CS transmis dans les données de vérification ; il n'y en a donc qu'un seul par ligne.

- 4 positions y_p de ZPD déterminées au sol à partir des interférogrammes de vérification I_p ($p = 1, 2, 3$ ou 4 est le numéro du pixel correspondant),
- 16 valeurs n_{pq} de NZPD déterminées à bord par l'algorithme ZPD_4 (transmises dans la télémesure scientifique).

$n_{p1}, n_{p2}, n_{p3}, n_{p4}$ sont les valeurs de NZPD déterminées sur les interférogrammes acquis en même temps que l'interférogramme de vérification I_p (on doit donc avoir la relation $n_{pp} = E(y_p)$).

Comme on suppose que la position géométrique du Zpd n'évolue pas, on peut reconstituer un ensemble cohérent (x_1, x_2, x_3, x_4) de position de ZPD sur les 4 pixels par :

$$x_q = n_{pq} + \delta_q$$

où

$$\delta_1 = y_1 - n_{11}, \delta_2 = y_2 - n_{22}, \delta_3 = y_3 - n_{33}, \delta_4 = y_4 - n_{44}$$

6.4.4 CALCUL DES FONCTIONS D'AUTO-APODISATION

La fonction d'auto-apodisation $A(x, \nu)$ est tabulée pour :

- les 301 points x_i correspondant à une discrétisation régulière de la différence de marche,
- les 142 nombres d'ondes $\mu_k = 645, 660, \dots, 2760 \text{ cm}^{-1}$,
- les 121 positions de l'axe interférométrique correspondant à la grille définie au § 5.1.6 conformément au modèle de calcul décrit au § 6.4.2.

Le résultat est modifié légèrement par l'algorithme SAS_{77} pour prendre en compte les défauts éventuels (négligeables en théorie) du laser d'échantillonnage.

Ce dernier algorithme détermine d'autre part l'argument (phase) des 142 nombres complexes $A(0, \mu)$. Ces valeurs représentent la fonction d'erreur de phase modélisée $\varphi_{ext}(\mu)$ qui est due à la configuration à lame compensatrice déportée. Cette fonction est définie et utilisée dans la section 6.5 (initialisation des spectres réduits) où ces affirmations sont justifiées.

Enfin, les nombres complexes $A(x, \mu)$ sont remplacés par $(A(x, \mu)e^{-i \arg[A(0, \mu)]})$ afin que le module de A ne soit pas modifié et que $A(0, \mu)$ soit un nombre réel.

Cette "normalisation" est nécessaire pour que les fonctions d'instrument modélisées soient compatibles avec les spectres calibrés radiométriquement.

6.4.5 FONCTIONS D'INSTRUMENT (SRF₇₈)

Celles-ci sont les transformées de Fourier inverses des fonctions d'auto-apodisation (voir la formule (19) du § 3.7). Les fonctions d'auto-apodisation étant calculées pour un nombre fini de fréquences μ_k (cf § précédent) distantes de 15 cm^{-1} , les fonctions d'instrument seront aussi calculées pour ces fréquences.

La fonction d'instrument globale $ISRF(\nu, \nu_0)$ sera alors calculée par interpolation linéaire entre $ISRF(\nu, \nu_0, \mu_k)$ et $ISRF(\nu, \nu_0, \mu_{k+1})$. On n'a donc besoin de connaître les $ISRF$ que sur un intervalle de 30 cm^{-1} (c'est la même chose que pour l'apodisation des spectres 1C, voir § 5.1.5). Elles sont tabulées dans la base de données spectrale sur $\pm 16 \text{ cm}^{-1}$ autour du centroïde. Le nombre de points de discrétisation est égal à 2049.

A l'intérieur de l'algorithme, elles sont en fait calculées sur une largeur d'environ $\pm 32 \text{ cm}^{-1}$ pour tenir compte de la nécessité de les recentrer sur leur centre de gravité.

			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 123 of : 502
---	---	--	--

Le pas de discrétisation en x des fonctions d'autopodisation est choisi pour avoir un point de la discrétisation aux deux extrémités de la différence de marche effective des interférogrammes bord. Du fait que cette différence de marche maximale n'est pas exactement égale à ± 2 cm (env. 1.968 cm), la TF de la fonction d'autoapodisation ne fournit pas les ISRF sur la base de nombre d'ondes désirée. C'est le rééchantillonnage, qui est de toute façon nécessaire pour recentrer les ISRF sur leur centre de gravité, qui permet d'obtenir les ISRF tabulées sur la base spectrale nominale.

Les fonctions d'apodisation ont été tabulées avec un pas approximativement égal à $\frac{4.02 \text{ cm}}{300}$. Il est donc nécessaire de les rééchantillonner.

L'algorithme SRF_{78} réalise toutes ces opérations et calcule ensuite par FFT

$$F(\nu) = TF^{-1}(A_{\mu})(\nu - \mu)$$

Le centre de gravité de F

$$\nu_G = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \nu |F(\nu)|^2 d\nu}{\int_{-\infty}^{\infty} |F(\nu)|^2 d\nu}$$

représente le décalage spectral de la fonction d'instrument (lié essentiellement au fait que les pixels IASI ne sont pas sur l'axe comme le montre l'annexe 6).

L'algorithme SRF_{78} se termine par le recentrage de la fonction d'instrument sur son centre de gravité et par sa normalisation.

$$\text{ISRF}(\mu, \nu) = \text{Re} \left[F(\nu - \nu_G) / \int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} F(\nu - \nu_G) d\nu \right]$$

6.4.6 FONCTIONS DE CALIBRATION SPECTRALE (SDB₇₄)

Le calcul est immédiat une fois que celui des fonctions instrument est terminé. En effet, le décalage spectral $\Delta\nu(\mu_k)$ a été calculé pour chaque nombre d'ondes μ_k par l'algorithme SRF_{78} .

La fonction de calibration spectrale f_{cs} au point μ_k est tout simplement

$$f_{cs}(\mu_k) = 1 + \frac{\Delta\nu(\mu_k)}{\mu_k}$$

La fonction $f_{cs}(\nu)$ est obtenue en tous les points ν^{1B} par une simple interpolation spline cubique.

6.4.7 FONCTIONS D'APODISATION (CAF₇₉)

L'algorithme applique simplement la définition

$$Af(x, \mu) = \frac{TF(G)(x)}{A(x, \mu)}$$

et rééchantillonne cette fonction avec un pas (AD).

6.5 INITIALISATION DES SPECTRES REDUITS

6.5.1 INTRODUCTION

Le but de ce groupe d'algorithmes (RSC_{54} , RSH_{55}) est de calculer les spectres initiaux qui sont nécessaires au fonctionnement de l'algorithme bord ZPD₄.

Ces spectres sont le résultat du traitement d'interférogrammes de calibration (visées corps noir chaud BB ou espace froid CS)

- dont le nombre de points est réduit (512 nominale)
- qui sont centrés sur l'échantillon central NZPD.

C'est bien sûr la détermination de cet échantillon central qui constitue la principale difficulté de ces algorithmes. La suite de cette section 6.5 sera donc consacrée à cet aspect.

Mise à jour des spectres réduits

Une valeur initiale des spectres réduits est déterminée en recette sol instrument et est implantée à bord avant le lancement. Cette version peut être calculée par les méthodes décrites dans cette section.

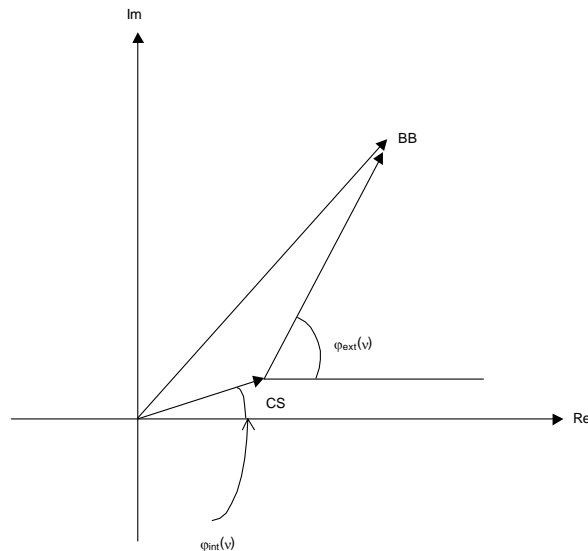
Il serait toutefois possible que, par suite de perturbations induites par le lancement, ces spectres initiaux ne soient plus suffisamment proches des spectres observés et que cela interdise la détermination à bord du NZPD. Dans cette éventualité des interférogrammes des visées de calibration¹⁰⁹ seraient traités au sol (à la TEC) afin de régénérer des spectres réduits qui seraient ensuite rechargés dans le logiciel de vol.

6.5.2 DEFINITION DES FONCTIONS D'ERREUR DE PHASE

Les algorithmes d'initialisation des spectres réduits reposent sur le traitement de la phase des spectres de visées de calibration. On distingue :

- la phase interne qui est la phase du spectre S_{CS}
- la phase externe qui est la phase du spectre $S_{BB}-S_{CS}$

¹⁰⁹ Interférogrammes transmis dans les données de vérification (i.e. 1 interférogramme toutes les 8 secondes).



Plus précisément les fonctions d'erreur de phase $\varphi_{\text{int}}(v)$ et $\varphi_{\text{ext}}(v)$ sont les composantes non linéaires de ces fonctions de phase.

En effet, la partie linéaire de la phase étant liée au choix de l'échantillon central, ce n'est pas une caractéristique de l'instrument. Au contraire, la partie non linéaire est liée au chromatisme de l'instrument (traitements des surfaces optiques, configuration déportée, variation des retards en fonction de la fréquence dans les électroniques). C'est donc bien elle qui est la caractéristique instrumentale.

6.5.3 INITIALISATION DU SPECTRE REDUIT ESPACE FROID (RSC₅₄)

Le principe de détermination du NZPD adopté est celui de la méthode de Connes qui a déjà été évoquée dans la section 3.5.1 et qui va être détaillée ici.

Dans un premier temps, une valeur grossière du NZPD est déterminée en recherchant la position approximative de la frange centrale dans l'interférogramme puis en calculant le centre de gravité d'un interférogramme réduit centré sur cette position (figure 6.15 ci-dessous).

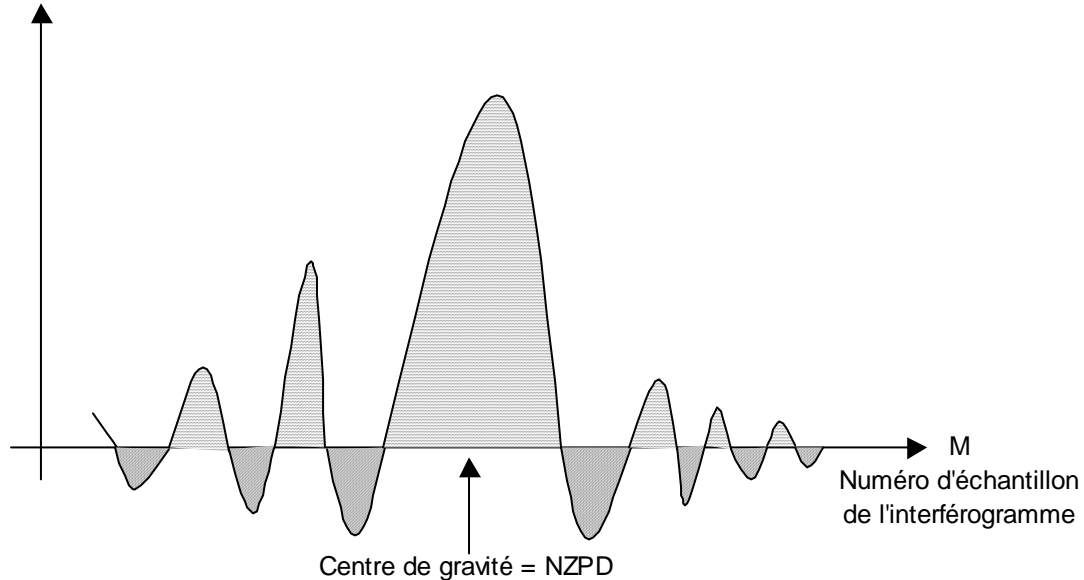


Figure 6.15 – Détermination approchée du NZPD (1^{ère} étape)

Un spectre réduit de 512 points est alors calculé à partir de l'interférogramme recentré sur l'échantillon le plus proche de ce centre de gravité¹¹⁰.

$$S(\nu) = TF^{-1}(I)(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) e^{i2\pi x \nu} dx$$

Si la différence de marche réelle est $x' = x - \varepsilon$, le spectre (théorique) de l'interférogramme centré sur ZPD serait

$$T(\nu) = TF^{-1}(I)(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x') e^{i2\pi x' \nu} dx'$$

On voit donc que la relation entre les deux spectres S et T est

$$S(\nu) = e^{i2\pi \nu \varepsilon} T(\nu) = e^{i\varphi(\nu)} T(\nu) \quad (6-11)$$

Avec un instrument parfait, le spectre $T(\nu)$ serait parfaitement réel et la relation (6-11) montre que la phase du spectre $\varphi(\nu)$ varie linéairement avec ν . La valeur de la pente $\frac{d\varphi}{d\nu} = 2\pi\varepsilon$ fournit alors la position du ZPD réel en relatif par rapport au NZPD (figure 6.16 ci-dessous).

¹¹⁰ Pour ne pas alourdir la présentation, on néglige dans la suite le fait que l'interférogramme est échantillonné et est de taille finie. On travaille donc avec des TF mathématiques. Cela ne change rien au principe de la méthode.

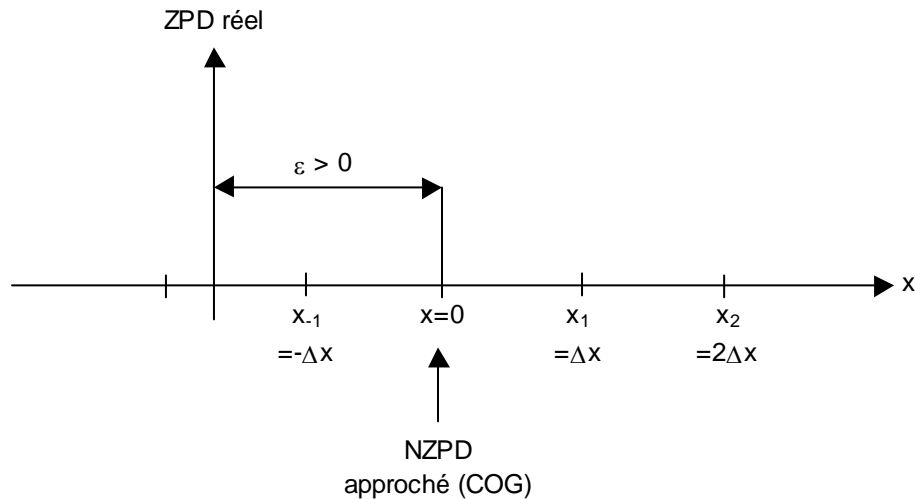


Figure 6.16 – Position du ZPD réel donné par la méthode de Connes

En réalité la phase $\varphi(v)$ n'est pas parfaitement linéaire (voir la figure 6.17 ci-dessous).

L'approximation du graphe de cette fonction par une droite fournira une pente entachée d'erreur à cause :

- du bruit de mesure de l'instrument,
- d'effets non linéaires dus à l'optique (fonction d'erreur de phase).

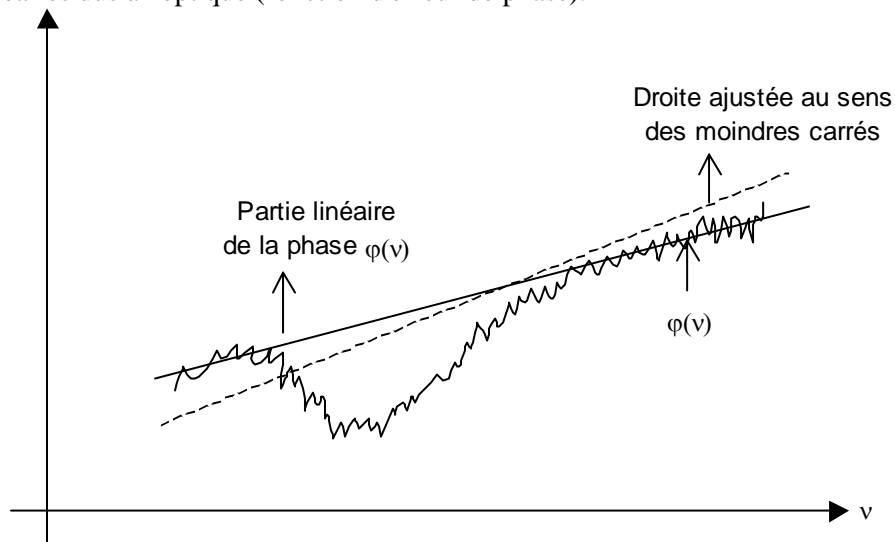


Figure 6.17 – Impact des fonctions d'erreur de phase sur la détermination du NZPD

A priori, les non linéarités de la phase interne sont faibles et on appellera l'algorithme RSC_{54} avec $\varphi_{int}(v)=0$.

Dans le cas contraire, on recalculerait à partir d'un nombre important d'interférogrammes CS une fonction d'erreur de phase interne $\varphi_{int}(v)$ par l'algorithme PEF_{60} (qui est utilisé pour effectuer des surveillances).

L'algorithme ainsi défini fournit pour chaque interférogramme :

- un spectre réduit,

- la position estimée du Zpd (numéro de l'échantillon le plus proche + partie fractionnaire).

On conçoit que si la position du Zpd est située quasiment à mi-chemin entre deux échantillons consécutifs alors l'échantillon le plus proche sera évalué tantôt par défaut tantôt par excès à cause du bruit de mesure. Lorsqu'il y a de tels basculements, il est difficile de combiner les spectres réduits obtenus afin de diminuer le bruit.

Pour éviter ce phénomène, lorsque RSC_{54} fournit une partie fractionnaire r_{ZPD} proche de 0,5, on relance l'algorithme avec cette valeur approchée ce qui supprime l'oscillation. On pourra alors éventuellement faire des moyennes des spectres réduits pour réduire le bruit.

6.5.4 INITIALISATION DU SPECTRE REDUIT CORPS NOIR (RSH₅₅)

La méthode employée diffère de celle utilisée dans l'algorithme RSC_{54} . En effet, on souhaite ici que le NZPD choisi pour calculer le spectre réduit BB corresponde à la position du coin de cube qui a été choisie pour calculer le spectre réduit CS.

Dans le cas contraire, on observerait :

- une erreur de calibration radiométrique trop importante,
- ou une impossibilité de déterminer le NZPD des visées terres (voir la discussion dans les § 3.3.2 et 3.3.3).

La méthode employée part du fait qu'une erreur d'un échantillon sur le NZPD entraîne une non linéarité significative dans la fonction d'erreur de phase externe. Le NZPD choisi par RSH_{55} est donc le numéro d'échantillon qui minimise le résidu non linéaire de la phase $S_{BB}(v)-S_{CS}(v)$.

Une petite complication de l'algorithme est induite par le fait que la phase de $S_{BB}(v)-S_{CS}(v)$ présente naturellement une composante non linéaire (sensiblement parabolique) à cause du chromatisme de l'instrument induit par la configuration à lame compensatrice déportée. Pour améliorer la sensibilité de l'algorithme, on compense cette non linéarité avant de faire la recherche du NZPD.

Détermination de la partie modélisée de $\varphi_{ext}(v)$

En fait

$$\varphi_{ext}(v) = A(0,v) \quad (6-12)$$

où $A(u,v)$ est la fonction d'auto-apodisation calculée par le modèle du § 6.4.2 et l'algorithme SAF_{76} avant correction par l'algo SAS_{77} .

La démonstration n'est pas très compliquée.

On a par définition :

$$S_{BB}(v) - S_{CS}(v) = \int_{-\infty}^{\infty} B(v) \cdot ISRF(v, v_0) dv$$

avec $B(v)$ = Fonction de Planck à la température du BB.

En faisant les approximations suivantes :

- $ISRF(v, v_0) = 0$ si $|v - v_0| > \Delta v$ donné
- $B(v) = B(v_0)$ si $|v - v_0| < \Delta v$

L'équation précédente s'écrit :

$$S_{BB}(\nu) - S_{CS}(\nu) = B(\nu_0) \int_{-\infty}^{\infty} IRSF(\nu, \nu_0) d\nu$$

or
$$\int_{-\infty}^{\infty} IRSF(\nu, \nu_0) d\nu = A(0, \nu_0)$$

d'où l'affirmation ci-dessus.

6.5.5 DETERMINATION DES FONCTIONS D'ERREUR DE PHASE (PEF₆₀)

La détermination des fonctions d'erreur de phase à partir d'interférogrammes des visées de calibration est faite selon les mêmes principes que ceux discutés dans le calcul des spectres réduits mais en employant un nombre de points légèrement plus important pour augmenter la résolution (n = 4096 AC). Le nombre de points ne doit toutefois pas être trop élevé sous peine d'augmenter le bruit.

Ces fonctions sont très bruitées. Il est donc nécessaire d'une part de moyenner les spectres et donc pour cela de prendre les précautions qui ont été décrites dans le § 6.5.3. D'autre part, comme ces fonctions varient lentement avec ν , on les lisse en leur appliquant une moyenne glissante :

$$\bar{y}(\nu_i) = \frac{1}{(2m+1)} \sum_{j=-m}^m \varphi(\nu_{i+j})$$

L'utilisation de ces résultats est a priori uniquement informatif et à des fins de surveillance puisqu'ils ne sont nominalement pas utilisés par les algorithmes de calcul des spectres réduits.

6.6 CARACTERISATION DE LA NON LINEARITE ANALOGIQUE (ATT₆₁)

Note : Cette section ne traite que de l'initialisation de la table de non linéarité en amont du numériseur. L'initialisation des tables de correction de la non linéarité HF et BF du numériseur est décrite dans le chapitre 7.

6.6.1 INTRODUCTION

Les détecteurs HgCdTe employés dans l'instrument IASI présentent une très grande sensibilité dans la bande mission. Cette sensibilité cependant varie légèrement avec le niveau du signal illuminant le détecteur¹¹¹.

Si on note I l'interférogramme théorique qui devrait être obtenu par une chaîne de détection parfaite et I^m l'interférogramme qui est effectivement mesuré avec la chaîne réelle. On a la relation¹¹²

$$I^m = R(I) \quad (6-13)$$

¹¹¹ pour la bande B1 principalement

¹¹² l'écriture ci-dessus suppose que la variation relative de responsivité en fonction du flux incident est indépendante du nombre d'ondes.

où R est une fonction proche de l'identité.

Des erreurs de calibration radiométrique de plusieurs Kelvin peuvent être observées si on ne tient pas compte de la non linéarité introduite par (6-13). En revanche après correction de celle-ci par l'algorithme bord NLC₂, l'erreur résiduelle devient inférieure à 0.05 K.

La méthode qui est présentée dans cette section détermine la correction qu'il faut apporter à l'interférogramme mesuré I^m pour restituer l'interférogramme I^L qui serait obtenu à partir d'une chaîne de détection parfaitement linéaire.

$$I^L = P(I^m) \quad (6-14)$$

Dans l'équation ci-dessus la fonction de correction P ($= R^{-1}$) est approximée par un polynôme de faible degré (4 nominalement).

La section 6.6.2 décrit les effets induits par l'introduction d'une non linéarité dans la chaîne de détection.

On utilise ensuite la connaissance de ces effets pour déterminer le polynôme de correction P par la méthode décrite dans la section 6.6.3.

6.6.2 ARTEFACTS SPECTRAUX

Si on développe le formule (6-13) en séparant l'interférogramme théorique $I(x)$ en ses deux composantes I_c et I_{mod}

(I_c : composante continue ou ligne de base, $I_{mod}(x)$: composante modulée)

$$I(x) = I_c + I_{mod}(x)$$

On obtient tous calculs faits :

$$I(x) = A_1 (I_{mod}(x) + \alpha_2 I_{mod}^2(x) + \alpha_3 I_{mod}^3(x) + \dots) \quad (6-15)$$

On voit que le coefficient A_1 ¹¹³ a un effet équivalent à une modification de la sensibilité globale du détecteur. Les coefficients d'ordre supérieur α_2 , α_3 , ... entraînent une variation de la sensibilité en fonction de l'amplitude du signal qu'on cherche à mesurer (I_{mod}). En d'autres termes cela signifie que l'hypothèse faite dans le § 3.3.2 selon laquelle l'instrument est linéaire en énergie, n'est plus vérifiée. Ces coefficients entraînent donc une erreur de calibration radiométrique comme indiqué en 6.6.1.

Observons maintenant l'effet de ces non linéarités sur le spectre brut qui va être déduit des interférogrammes en supposant que $I_{mod}(x)$ est le résultat de l'observation d'un spectre théorique $T(v)$. Comme la Transformée de Fourier est une opération linéaire on obtient :

$$S(v) = A_1 T(v) + S_2(v) + S_3(v) + S_4(v) + S_5(v) + \dots \quad (6-16)$$

où $S_2(v)$, $S_3(v)$, ... sont des artefacts spectraux qui dépendent de $T(v)$ et des coefficients A_1 , α_2 , α_3 , ... (respectivement).

¹¹³ Dans cette équation il faut noter que les coefficients A_1 , α_2 , α_3 , ... dépendent non seulement de la non linéarité du détecteur $R(I)$ définie par l'équation (6-13) mais aussi de la valeur de la ligne de base I_c .

On montre facilement¹¹⁴ que si $T(\nu)$ est un spectre à support borné centré autour de la fréquence ν_0 , alors les artefacts $S_i(\nu)$ contiennent de l'énergie autour de certains nombres d'ondes donnés par le tableau suivant.

$S_2(\nu)$	$\nu = 0$	$2 \nu_0$	
$S_3(\nu)$	$\nu = \nu_0$	$3 \nu_0$	
$S_4(\nu)$	$\nu = 0$	$2 \nu_0$	$4 \nu_0$
$S_5(\nu)$	$\nu = \nu_0$	$3 \nu_0$	$5 \nu_0$

La figure 6.18 ci-dessous extraite de [DR26] illustre le phénomène sur des données expérimentales. On voit clairement apparaître l'artefact S_2 .

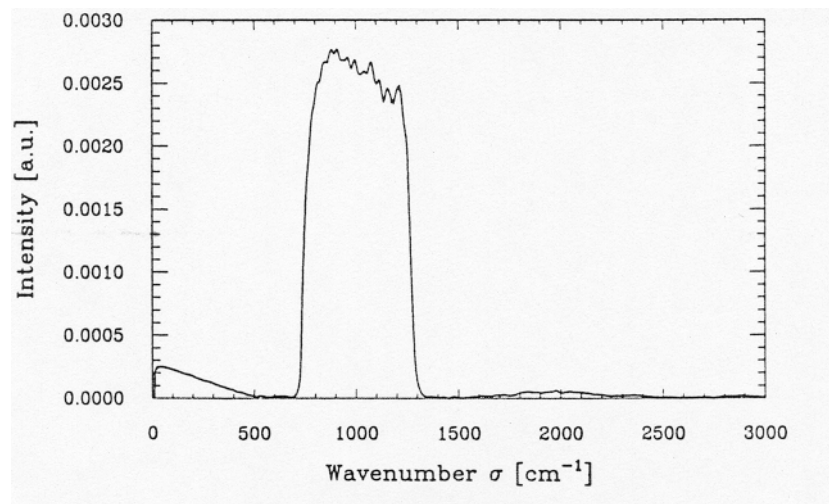


Figure 6.18 – Spectre brut expérimental affecté par une non linéarité

Notes :

1. L'amplitude diminue rapidement avec l'ordre des artefacts ce qui fait que S_5 peut en pratique être négligé.
2. On voit que $S_2(\nu)$ ne perturbe pas (ou très peu) la mesure de $S(\nu)$ puisqu'il ne ramène pas d'énergie dans la bande utile autour de ν_0 . Le seul effet est sur la calibration radiométrique (déperdition d'énergie en dehors de la bande utile).
3. En revanche, l'artefact $S_3(\nu)$ peut avoir un impact direct puisqu'on observe une perturbation autour de ν_0 .

Muni des résultats précédents, il est maintenant facile de comprendre le principe sur lequel repose la caractérisation de la non linéarité qui est décrit dans la section suivante.

¹¹⁴ Voir par exemple [DR26] ou plus simplement prendre comme spectre de test $T(\nu)$ un Dirac ($I_{\text{mod}}(x)$ est alors un sinus) et observer l'effet sur $S(\nu) = \text{TF}^{-1}(I)(\nu)$.

6.6.3 METHODE DE CARACTERISATION (ATT₆₁)

Le principe de la méthode repose sur le fait que l'interférogramme de IASI est largement suréchantillonné¹¹⁵. En conséquence, la TF d'un interférogramme IASI fournit un spectre brut jusqu'à un nombre d'ondes ν_{MAX} proche de 6500 cm^{-1} largement supérieur aux limites de bandes imposées par les détecteurs et les optiques (voir le tableau ci-dessous).

	ν_{iMAX}	$\frac{\nu_{MAX}}{\nu_{iMAX}}$
B1	1210	5.4
B2	1900	3.4
B3	2760	2.3

Ainsi qu'on l'a vu dans la section 6.6.2, une non linéarité dans la chaîne de détection va ramener de l'énergie dans une plage de nombre d'ondes $[\nu_{iMAX}, \nu_{MAX}]$ où il ne devait pas y en avoir¹¹⁶.

L'algorithme ATT₆₁ détermine de façon itérative le polynôme P de l'équation (6-14) de manière à minimiser l'énergie du spectre $S = \text{TF}^{-1}[P(I^m)]$ dans cette bande (ce qui signifie que le spectre a été débarrassé des artefacts dus à la non linéarité).

On commence par calculer le spectre correspondant à l'interférogramme mesuré :

$$S_m = \text{TF}^{-1}(I^m)$$

Ce spectre est débarrassé des artefacts hors bande utile (définie par $\nu \in P_v$)

$$\begin{aligned} S^L(\nu) &= S_m(\nu) & \text{si } \nu \in P_v \\ S^L(\nu) &= 0 & \text{si } \nu \notin P_v \end{aligned}$$

Un interférogramme "linéaire" est alors obtenu :

$$I^L = \text{TF}(S^L)$$

Et le polynôme P tel que $I^L = P(I^m)$ est alors déterminé par ajustement au sens des moindres carrés en utilisant un nombre assez faible d'échantillons de l'interférogramme (environ 100) situés autour de la frange centrale¹¹⁷.

En pratique, le processus précédent doit être itéré parce que le spectre S^L peut encore contenir de l'énergie due aux artefacts d'ordre impair (notamment S_3).

¹¹⁵ Notamment pour la bande B1 qui est la plus susceptible d'être touchée par ce phénomène à cause de la technologie du détecteur (photoconducteur).

¹¹⁶ En ignorant d'autres effets perturbateurs tels que les microvibrations ou des perturbations électriques qui peuvent aussi ramener de l'énergie dans cette zone.

¹¹⁷ Pour être à peu près assuré de couvrir la dynamique couverte par l'interférogramme sans accorder trop de poids aux valeurs proches de la ligne de base.

Pour avoir une bonne estimation du polynôme P, il est important que les interférogrammes utilisés couvrent une large dynamique et en tout cas une fraction importante de la dynamique totale rencontrée (visées atmosphériques ou de calibration). On utilisera donc nominalement les interférogrammes acquis sur les visées de calibration BB.

Notes :

1. On peut penser à moyenner les polynômes obtenus sur plusieurs interférogrammes différents pour minimiser le bruit.
2. Il faut que l'interférogramme I^m utilisé par l'algorithme ATT_{61} ait été au préalable débarrassé de la non linéarité du numériseur¹¹⁸.
3. Le support sur lequel le spectre S^m est annulé pour le débarrasser des artefacts sera constitué de plusieurs intervalles (20 AC) inclus dans $[-v_{MAX}, v_{MAX}]$ de manière à pouvoir prendre en compte des défauts instruments qui ne seraient pas des non linéarités (interférogrammes de retour à fréquence double, raie parasite, etc).

6.7 MATRICE DE COVARIANCE DE BRUIT

6.7.1 INTRODUCTION

Si on note

- $S^t(v_i)$ Le spectre théorique mesuré (i.e. spectre théorique convolué par les fonctions d'instrument)
- $S^m(v_i)$ Le spectre effectivement mesuré : c'est-à-dire déterminé à partir des mesures par les algorithmes bord et de l'OPS décrits dans les § 4 et 5.

On peut écrire

$$S^m(v_i) = S^t(v_i) + \eta_i(S^t) + \varepsilon_i \quad (6-17)$$

On a séparé dans cette équation les erreurs

- $\eta_i(S)$ qui dépendent de la mesure elle-même ou qui sont à variation lente. Ces erreurs ne peuvent pas être considérées comme des bruits et sont prises en compte par les différents processus de calibration
- ε_i qui au contraire sont de véritables bruits (moyenne nulle et indépendance d'un spectre à l'autre)

La matrice de covariance de bruit caractérise la distribution des erreurs ε_i (amplitude et corrélation entre les erreurs observées sur des canaux différents dans le même spectre). Par définition elle s'écrit :

$$C = E(\varepsilon \varepsilon^t)$$

avec

¹¹⁸ En effet, cette non linéarité du numériseur n'a pas le même effet que la non linéarité amont puisque les effets de l'une dépendent de la valeur de la ligne de banc et ceux de l'autre non.

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_N \end{bmatrix}$$

N est le nombre de « canaux » de IASI ($N \approx 8500$) et E l'opérateur « Espérance mathématique ».

Note 1: la diagonale est normalement dominée par le bruit radiométrique de l'instrument qui a été déterminé par les méthodes décrites au §6.3.3.

Note 2 : Il existe 2 matrices de covariance de bruit. Une relative aux produits 1B, l'autre aux produits 1C.

La matrice de covariance C est utilisée par les traitements de niveau 2 ou 3 qui l'utilisent au cours de l'inversion afin d'estimer s'il vaut mieux « faire confiance » aux mesures ou au modèle (pondération « optimale » des mesures).

6.7.2 ESTIMATION EMPIRIQUE

Cette estimation part de la connaissance d'un nombre important de vecteurs d'erreur de mesure $\varepsilon^1, \varepsilon^2, \dots, \varepsilon^m$ (typiquement $m=10000$) à partir desquels on obtient

$$\tilde{C}_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \varepsilon_i^k \varepsilon_j^k$$

Les vecteurs d'erreur ne sont pas calculés en faisant la différence entre la valeur mesurée et une valeur théorique connue par ailleurs mais sont évalués de la même façon que pour l'estimation du bruit radiométrique (voir §6.3.3). On les obtient comme écart entre le spectre mesuré et la moyenne calculée sur quelques spectres acquis en succession (typiquement 30 AC). La seule différence par rapport à la méthode d'estimation du bruit radiométrique de l'instrument est qu'on doit, ici, utiliser des spectres atmosphériques acquis en mode calibration externe.

Les spectres utilisés doivent être sélectionnés de telle sorte que l'écart à la moyenne soit significatif d'un bruit instrumental et non d'une fluctuation du spectre atmosphérique lui-même :

- spectres en ciel clair,
- émissivité du sol homogène (mer),
- durée de chaque cycle de moyennage courte (typiquement < 1 min).

6.7.3 REPRESENTATION COMPRESSEE DE LA MATRICE

On décompose alors la matrice obtenue au § précédent sous la forme

$$\tilde{C} = \tilde{C}' + \tilde{C}''$$

où

\tilde{C}' est une matrice bande diagonale qui représente essentiellement le bruit radiométrique de l'instrument et l'effet d'appodisation des spectres 1C,

\tilde{C}'' représente les structures hors diagonale de la matrice,

Les matrices \tilde{C}' et \tilde{C}'' sont représentées respectivement par n' et n'' vecteurs de taille N selon les formules.

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 135 of : 502
---	---	--	--

$$\begin{aligned}
 \tilde{C} &= \sum_{k=1}^{n'} \sigma_k'^2 \tilde{C}'^k + \sum_{k=1}^{n''} \sigma_k''^2 \tilde{C}''^k \\
 \tilde{C}'_{i,i+k} &= \tilde{C}'_{i+k,i} = V_i'^k, \tilde{C}'_{i,j} = \tilde{C}'_{j,i} = 0 \quad \text{si } j \neq i+k \\
 \tilde{C}''^k &= V''^k (V''^k)^T
 \end{aligned}
 \tag{6-18}$$

Le nombre total de vecteurs $n' + n''$ est inférieur à 100.

Les vecteurs V'^k et V''^k constituent la représentation compressée des matrices de covariance de bruit « normalisées » (IDefCovarMat1b et IDefCovarMat1c) qui sont transmises par la TEC au système EPS.

- les V'^k sont obtenus directement à partir de la matrice de covariance estimée \tilde{C} ,
- les V''^k sont obtenus (fiche descriptive à écrire)
 - directement pour certains défauts pour lesquels on est en mesure de définir un jacobien (par exemple : défaut de calibration spectrale)
 - par une méthode qui est encore AD (analyse factorielle, analyse en composante principale, etc.). L'étude est en cours.

Les paramètres σ_k' et σ_k'' permettent d'ajuster la matrice de covariance de bruit en fonction de l'évolution des indices de qualité des produits. Ces paramètres sont recalculés par les algorithmes OPS (fiche QIS₄₅) et transmis aux utilisateurs dans le produit pour reconstruire la matrice de covariance de bruit courante grâce aux formules (6-18).

6.8 INITIALISATION DES PHASES NATURELLES (WNP₅₈)

6.8.1 DESCRIPTION DE L'ALGORITHME

L'objectif de cet algorithme est de préparer les entrées nécessaires à l'algorithme SSD₂₃ qui est implanté dans le segment sol opérationnel d'EUMETSAT pour réaliser en temps réel la calibration spectrale des spectres IASI. On utilisera aussi SSD₂₃ en recette en vol pour vérifier la calibration spectrale dans les 3 bandes IASI (cf. [DR43]).

On ne revient pas sur la méthode employée dont le principe est décrit dans le § 5.7.1. Le lecteur se référera aussi à cette section pour la définition des notations.

L'algorithme WNP₅₈ part de la définition d'une fenêtre spectrale connue¹¹⁹ et d'un spectre atmosphérique synthétisé par un logiciel de transfert radiatif en tenant compte de la convolution par les fonctions d'instrument. La position des raies dans le spectre est issue de la banque de données spectroscopique qui a aussi été utilisée pour générer le spectre synthétique.

La formule de calcul du nombre d'ondes représentatif de la fenêtre semble un peu compliquée, mais en fait elle positionne ce nombre d'ondes ν_{ref} au centre du peigne de raies (rigoureusement si le peigne est parfaitement périodique).

¹¹⁹ On utilise nominalement pour IASI la fenêtre [2340-2380] cm⁻¹ contenant un peigne de raies d'une transition du CO₂ qui est peu influencé par les variations de l'état atmosphérique. Voir [DR18] et [DR19].

Le reste de l'algorithme consiste à calculer la taille de la FFT qui est suffisante pour que tous les harmoniques de $TF(S_i)(x_h)$ apparaissent.

La base d'abscisses spectrales "périodisée" $v(v)$ (voir la figure 5.9 du § 5.7.1.3) est alors calculée.

Ensuite $\rho(x_h)$ et $\Phi_0(x_h)$ sont calculés pour chacun de ces harmoniques.

6.8.2 CHOIX DE LA FENETRE SPECTRALE

La fenêtre choisie nominale pour la calibration spectrale de IASI est dans la bande B3 (entre 2340 et 2380 cm^{-1} environ).

Elle contient un système de raies correspondant à une transition de la molécule CO_2 . Les raisons ayant conduit à ce choix sont exposées dans [DR18]. On rappelle cependant rapidement ici les caractéristiques qui sont recherchées.

1. Un peigne de raies n'est jamais isolé dans une fenêtre spectrale. Plusieurs systèmes de raies se superposent. Il faut donc choisir les fenêtres de telle sorte qu'un système domine¹²⁰ ou qu'il ait des caractéristiques très différentes des autres (on sélectionne alors ce système de raies en choisissant l'harmonique adéquat¹²¹). Note : Ce sont en particulier ces systèmes "parasites" qui sont responsables de la création de la phase naturelle $\Phi_0(x)$ (la Transformée de Fourier du signal utile donnant une phase nulle).
2. Les caractéristiques du spectre S^i dépendent de l'état de l'atmosphère. On choisit donc, quand on le peut, une fenêtre dans laquelle le spectre infrarouge émis par le système terre atmosphère est relativement indépendant de la météorologie¹²². Dans le cas contraire, il est nécessaire de sélectionner un spectre synthétique proche du spectre mesuré (par une recherche dans une base de spectres synthétiques correspondant à des profils atmosphériques variables). Ce type d'activité pourra être nécessaire à la TEC en raison de la nécessité de trouver une fenêtre spectrale dans chacune des 3 bandes IASI (et qu'on ne trouve pas de fenêtre indépendante de la météo dans chacune de ces 3 bandes).
3. La taille de la fenêtre résulte d'un compromis entre :
 - réduire la taille de la fenêtre pour minimiser l'influence de la variation des décalages spectraux en fonction de la fréquence,
 - augmenter le nombre de points du spectre pour minimiser l'influence du bruit radiométrique.

¹²⁰ C'est le cas pour la fenêtre [2340-2380] cm^{-1} .

¹²¹ On choisit l'harmonique qui présente le plus grand module dans $TF^{-1}(S^i)$.

¹²² C'est le cas pour la fenêtre [2340-2380] cm^{-1} .

6.9 COREGISTRATION SONDEUR-IMAGEUR IASI (ISC₁₀₉)

Le sondeur et l'imageur IASI étant situés tous les deux dans le même instrument, et en particulier en aval du miroir de changement de visée, on a une bonne confiance dans la stabilité de positionnement relatif de leurs référentiels optiques. La coregistration sondeur-imageur est donc effectuée peu fréquemment et sur une grande collection de couples (sondage/image) correspondant à quelques jours ou quelques semaines d'acquisition.

L'idée de la méthode est illustrée par la figure 6-19 ci-dessous.

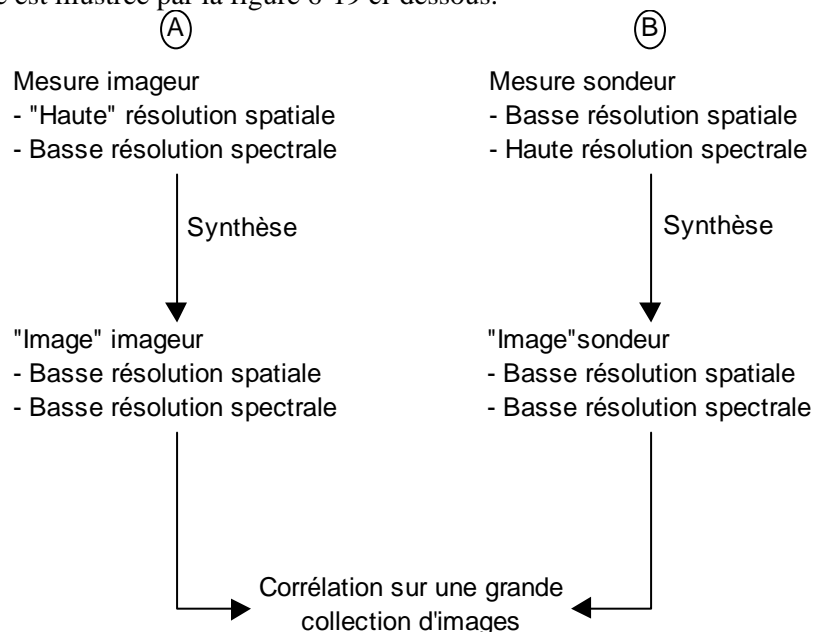


Figure 6-19 - Principe de la coregistration sondeur/imageur

La synthèse de l'"image" A se fait en intégrant la radiance mesurée par l'imageur dans le pixel du sondeur (moyenne pondérée)

$$\text{Image A} = \sum_{\substack{\text{pixels image} \\ \in \text{pixel sondeur}}} \text{IPSF}(p) \cdot \text{Radiance}(p)$$

La synthèse de l'"image" B se fait en intégrant le spectre mesuré par le sondeur pondéré par la réponse spectrale de l'imageur.

$$\text{Image B} = \int_{10.3\mu}^{11.5\mu} S_n(\lambda) R_{im}(\lambda) d\lambda$$

Les hypothèses nécessaires au bon fonctionnement de cet algorithme sont les suivantes :

- La réponse spectrale est la même pour tous les pixels de l'imageur.
- La mesure spectrale du sondeur ne dépend pas de la répartition spatiale de luminance à l'intérieur de la scène.

Le processus de corrélation implique l'utilisation d'images dotées d'un contenu structural varié ce qui ne peut raisonnablement être satisfait simplement et efficacement que sous contrôle d'un expert/opérateur. Le

			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 138 of : 502
---	---	---	--

processus de sélection de la collection d'images s'exercera donc entièrement en différé en utilisant des outils de visualisation et traitement d'images présents à la TEC.

L'algorithme ISC109 décrit dans la fiche fait l'hypothèse (réaliste) d'un décalage constant entre l'IIS et le sondeur.

L'interface entre les algorithmes de la TEC et l'OPS prévoit cependant une provision pour une évolution (dérive et variation orbitale sinusoïdale) de cet offset. En phase de recette en vol l'hypothèse de stabilité de l'offset sera vérifiée en utilisant des collections d'images réparties sur plusieurs orbites mais restreintes à certaines positions sur l'orbite. Si besoin est, le modèle de décalage évolutif dans le temps sera alors ajusté.

6.10 CALCUL D'UN MODELE ORBITAL (CMO₈₁)

Il s'agit de calculer les tables représentant un modèle d'évolution de la température de certains éléments (miroir de balayage, surfaces radiatives se réfléchissant dans le corps noir interne) qui sont utilisées par le logiciel OPS (algorithmes SME₃₃ et HEC₃₂). Ce modèle est fonction de la date courante et de la date de fin de l'éclipse précédente.

Pour calculer ce modèle on dispose d'une modélisation mathématique (courbe ou fichier) qui sera fournie par le maître d'œuvre de l'instrument. Cette modélisation donne l'évolution de la température sur une orbite en relatif par rapport à la position de l'éclipse et pour plusieurs saisons (AC).

La forme précise de ce modèle est définie dans l'annexe 7.

 <p>cnes CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES</p>	 <p>IASI</p>	 <p>IASI</p>	<p>Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE</p> <p>Issue : 6 Date:</p> <p>Rev : 5 Date: 04/06/ 2009</p> <p>Page : 139 of : 502</p>
---	--	---	---

7. ALGORITHMES DE LA CHAÎNE DE RECETTE SOL (GSE)

A COMPLETER

8. SURVEILLANCE DU FONCTIONNEMENT DE L'ALGORITHMIE

8.1 INTRODUCTION

Chaque fois que cela est possible les algorithmes¹²³ du système IASI vérifient la qualité des résultats qu'ils produisent. En général, chaque algorithme génère :

- un ou plusieurs indices de qualité qui permettent de positionner le résultat sur une échelle de qualité continue
- un ou plusieurs flags qui indiquent si les résultats sont ou non disponibles.

Les indices de qualité et les flags élémentaires produits par les algorithmes bord ou de l'OPS sont analysés en temps réel et synthétisés. Cette information est intégrée dans le produit afin d'attester de la qualité de celui-ci. La construction des indices de qualité synthétiques est décrite dans la section 8.3. Les indicateurs d'erreurs (ou flags) sont répertoriés dans la section 8.4.

La surveillance du fonctionnement de l'algorithmie et de la performance système est assurée par le Centre d'Expertise Technique (TEC).

Un premier niveau de surveillance générale est assuré par cette entité :

- surveillance des flags synthétiques et élémentaires,
- surveillance d'observables (résultats produits par des algorithmes)

informations en provenance du bord ou du logiciel OPS. Par défaut, on considère que la TEC est capable de surveiller et de visualiser (synoptique, courbe) n'importe quel paramètre élémentaire qui lui est transmis et on ne détaillera pas ici ces surveillances¹²⁴.

La surveillance générique des résultats produits par le bord devra permettre de sélectionner les valeurs d'un observable produit par le bord en fonction de la position du miroir de scan (SP) sur laquelle cette valeur a été calculée (ex : tous les SP, un SP particulier, toutes les visées EW i.e. SP=1 à 30)

En revanche, on détaille dans la section 8.2 qui suit un ensemble de surveillances particulières qui mettent en jeu des enchaînements plus ou moins complexes d'algorithmes déjà présentés dans les chapitres précédents et/ou qui nécessitent des séquences spécifiques d'acquisition de données instrument (données de vérification ou données acquises en mode calibration externe).

Il est à noter qu'une même séquence de programmations spécifiques peut être utilisée pour réaliser plusieurs surveillances. La meilleure utilisation des données acquises devrait être recherchée notamment pour les acquisitions réalisées en mode calibration externe qui sont exclusives des mesures nominales de l'instrument et donc diminuent la disponibilité de celui-ci.

¹²³ Que ce soient les algorithmes bord ou les algorithmes sol.

¹²⁴ Un nombre important de ces paramètres est déjà surveillé par les algorithmes bord ou OPS. Dans ce cas, la surveillance demandée à la TEC consiste en des analyses de tendance pour s'assurer que le paramètre n'est pas en train de dériver et ne va pas déclencher une surveillance bord ou OPS qui signifierait l'interruption de la génération des produits ou au moins la levée d'un indicateur "qualité douteuse".

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 141 of : 502
---	---	---	--

8.2 SURVEILLANCE DES OBSERVABLES

On décrit dans la suite de cette section un ensemble de surveillances spécifiques qui sont à assurer par la TEC en phase de routine (elles seront aussi utilisées en recette en vol).

Pour chaque surveillance, on trouve les paragraphes suivants :

Objectif : Décrit les raisons pour lesquelles on souhaite faire cette surveillance.

Données d'entrées systématiques :

Fournit la liste des paramètres utilisés et qui sont présents systématiquement dans la télémessure scientifique ou dans les données technologiques générées par le logiciel OPS.

Acquisitions spécifiques :

Fournit la description des données nécessaires à la surveillance qui nécessitent pour leur acquisition une "programmation" de l'instrument (passage en mode calibration externe ou programmation d'une séquence de données de vérification).

Méthode : Décrit succinctement et informellement la méthode à employer en s'appuyant sur les algorithmes décrits dans les chapitres précédents.

Note : A ce stade de développement du projet la liste ci-dessous ne peut pas être considérée comme exhaustive. On considère cependant qu'elle est suffisante pour :

- définir les fonctionnalités à implémenter dans le logiciel du Centre d'Expertise Technique,
- définir le dimensionnement de ce centre.

8.2.1 SURVEILLANCE DU BRUIT RADIOMETRIQUE DE L'INSTRUMENT

Objectif : Surveiller les évolutions du spectre de bruit radiométrique de l'instrument. Optimiser les limites de bandes par rapport à ce spectre. Détecter d'éventuels problèmes en analysant le spectre hors bande utile.

Données d'entrées systématiques :

Acquisitions spécifiques :

Calibration externe : Spectres BB 4 pixels sur n lignes (n=10 AC), + Données de vérification : pixel fixé, bande fixée

Méthode : Le calcul (RNS_{67}), pour chaque échantillon spectral, des écarts par rapport à une référence (moyenne sur chaque ligne, ou valeur correspondant à une régression linéaire) fournit le spectre de bruit dans la bande utile (**IRnsNeDTspect**). Ce spectre est comparé à un seuil fonction de v défini en fonction des bandes mission de la spécification instrument.

On extrapole ce bruit dans les zones de recouvrement B1/B2 et B2/B3 à l'aide de la transmission¹²⁵ de l'interféromètre. Les limites de bandes sont alors recalculées par les algorithmes ZSB₅₃ et SBL₅₆.

¹²⁵ transmission théorique issue de la recette instrument

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 142 of : 502
---	---	---	--

Le spectre de bruit large bande est obtenu par la même méthode (algorithme SHB₁₀₁) mais en utilisant un spectre obtenu à partir des interférogrammes de vérification (nombre d'interférogrammes de vérification important). Il faut surveiller de plus la moyenne des spectres obtenus. Les artefacts, situés en dehors de la bande utile, par exemple à fréquence double, peuvent être le signe de non linéarité non corrigée ou encore d'autres défauts de l'instrument. Les contrôles à effectuer sont :

- Energie hors bande utile par rapport à l'énergie dans la bande utile.
- Moyenne du module du spectre hors bande utile < seuil dépendant de v .

8.2.2 EVOLUTION DES SPECTRES REDUITS FILTRES

Objectif : Mettre à jour un modèle d'évolution temporel (pour obtenir une meilleure estimée des spectres réduits S_r à un instant donné). Vérifier si on doit mettre à jour les seuils de NON UPDATE utilisés à bord.

Données d'entrées systématiques :

BFRsSrdBB et BFRsSrdCS

Note: Il s'agit uniquement des 25 (AC) échantillons contenus dans la bande utile du Zpd

Acquisitions spécifiques : Données de vérification (pixel fixé, bande fixée)

Méthode : Statistiques¹²⁶ sur chacune série temporelle $S_r(v)$

Ajustement d'un modèle $f(t)$ sur chacune des séries temporelles $S_r(v_i)$

Statistique sur la distance DistSrd calculée par l'algorithme bord ISR₅ pour vérifier la valeur du seuil CutoffSrdDist.

Note :

1. Si on doit recharger les spectres réduits à cause du fonctionnement de l'algorithme ZPD₄ et de ses algorithmes périphériques (IRS₅ et FRS₆) c'est que l'instrument est en train d'évoluer rapidement. Il faut revenir à ce qui a été mis en place en recette instrument (initialisation des spectres réduits) et élargir les seuils de surveillance bord en fonction des dérives qui ont été observées.
2. Si le rechargement est lié à une autre cause alors on recharge au plus vite le meilleur estimé des spectres réduits dont on dispose. On programme par la même occasion la séquence d'acquisition des interférogrammes de vérification qui sert à recalculer ces spectres réduits au cas où le DPS ne redémarrerait pas à l'aide des données précédentes.

8.2.3 SURVEILLANCE DU NZPD

Objectif : Vérifier que la position de la frange centrale de l'interférogramme ne dérive pas. La position de cette frange est en effet utilisée par les algorithmes bord ZPD₄ et SPK₃.

Données d'entrées systématiques : BZpdNzpd (PN, CCD)

Acquisitions spécifiques : néant

¹²⁶ minimum, maximum, moyenne, écart-type

			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 143 of : 502
---	---	--	--

Contraintes : $IMzqNsfirstNzpdCF + \text{marge } 1 < BZpdNzpd < IMzqNslastNzpdCF - \text{marge } 1$
 $IMzqNsfirstSpikCF + \text{marge } 2 < BZpdNzpd < IMzqNslastSpikCF - \text{marge } 2$

Méthode : 1. Surveillance par rapport à des seuils. Analyse de tendance pour prévoir à quelle date les seuils bord risquent d'être atteint (en supposant dérive constante).

2. Calcul de la valeur moyenne : NzpdMean (PN, CCD)

8.2.4 SURVEILLANCE DE L'HOMOGENEITE DU NZPD INTERPIXEL

La variation du NZPD est gouvernée par deux types de phénomènes :

- la fluctuation de l'ASE (jitter et dérive) qui affecte de façon identique le NZPD des 4 pixels. C'est le phénomène principal.
- d'autres variations (déformées de l'interféromètre, retards dans les chaînes électroniques) qui peuvent affecter de façon différente le NZPD des 4 pixels.

Objectif : Vérifier que les fluctuations différentielles des NZpd sont faibles pour une direction donnée du mouvement du coin de cube¹²⁷. Valider les données utilisées pour la surveillance de l'offset constant du coin de cube (voir § 8.2.5).

Données d'entrées systématiques : BZpdNzpd(1..4, CCD)

Acquisitions spécifiques : néant

Méthode : Statistiques sur les séries temporelles BZpdNzpd (i, CCD) - BZpdNzpd (i₀, CCD)¹²⁸.
i₀ est fixé (typiquement i₀=1, si le pixel 1 est disponible)
i correspond à l'ensemble des pixels disponibles.

8.2.5 SURVEILLANCE DE L'OFFSET CONSTANT DU COIN DE CUBE

Objectif : Surveiller l'évolution de l'offset constant du coin de cube **C1C2Cst** pour décider si une remise à jour de la base de donnée spectrale est nécessaire.

Données d'entrées systématiques : BZpdNzpd(1..4, CCD)

Acquisitions spécifiques : interférogrammes BB (données de vérification) pour une direction de mouvement du CC donnée et pour la bande de calcul du NZPD (nominalement B3). Séquence : Pixel 1, Pixel 2, Pixel 3, Pixel 4, ... répétée *n* fois (typiquement n=10).

Méthode : On reconstitue le Zpd réel¹²⁹ des 4 pixels à partir de :

- le Zpd issu de l'algorithme RSC₅₄¹³⁰

¹²⁷ on attend des variations très rares de +1 ou -1

¹²⁸ Comptage du nombre d'occurrences $\Delta < -2, \Delta = -2, \Delta = -1, \Delta = 0, \Delta = 1, \Delta > 2$, + seuil d'alerte si $|\Delta| > 1$

¹²⁹ c'est à dire partie entière plus partie fractionnaire

¹³⁰ il faut s'assurer que le Zpd fractionnaire ne subit pas de discontinuité (tracé du résultat IRscZpdOffsetCS). Si c'est le cas il faut modifier la valeur de IDefZpdOffsetCS pour supprimer ces discontinuités.

– les différences de NZPD interpixels calculées comme dans la surveillance § 8.2.4.

Cet ensemble de 4 valeurs est fourni à l'algorithme CCO₅₇ qui produit **C1C2Cst**.

La moyenne des n valeurs précédentes permet de recalculer les fonctions d'instrument pour les 4 pixels et la position courante de l'axe interférométrique. On calcule ensuite l'indice de forme entre cette nouvelle fonction d'instrument et par rapport à la fonction d'instrument courante (pour 5 nombres d'ondes ν_0 répartis dans la bande utile). On rappelle ci-dessous la définition de l'indice de forme.

$$\varepsilon(\nu_0) = \int_{-\Delta\nu}^{\Delta\nu} |Re(ISRF_{old}(\nu, \nu_0) - ISRF_{new}(\nu, \nu_0))| d\nu$$

Ces indices de forme sont comparés à la valeur spécifiée dans la spécification instrument (IPS5). Si leur valeur est trop élevée on remet à jour la banque spectrale.

Note : l'algorithme est ici décrit dans son fonctionnement à 4 pixels. Le principe adopté permet sans modification de traiter le cas dégradé d'un fonctionnement à 3 pixels. Cette possibilité doit être préservée dans l'implémentation de l'algorithme dans le Centre d'Expertise Technique (TEC).

Contrôle préalable : Il faudra avoir identifié le bruit sur les retards de la chaîne d'acquisition avant de faire ce calcul pour juger de la signification de la valeur trouvée (voir §8.4.6).

8.2.6 SURVEILLANCE DU RETARD DES CHAINES D'ACQUISITION

Objectif : Déterminer la valeur du retard des chaînes électroniques pour les 3 bandes et les 4 pixels

Données d'entrées systématiques : néant

Acquisitions spécifiques : interférogrammes espace froid ou corps noir chaud (données de vérification) pour les 3 bandes.

Séquence : Pixel 1 B1 CD +, Pixel 1 B1 CD -, Pixel 1 B2 CD +, Pixel 1 B2 CCD -, Pixel 1 B3 CD +, Pixel 1 B3 CD -, Pixel 2 B1 CD +, Pixel 2 B1 CD -, ..., Pixel 4 B3 CD +, Pixel 4 B3 CD -, ... répétée n fois (typiquement 10).

Méthode : On calcule la distance entre les Zpd dans les deux directions du mouvement du coin de cube pour chaque pixel¹³¹. On convertit cette distance en retard en utilisant la vitesse connue du coin de cube.

On fait ensuite des statistiques sur les retards.

$$\Delta t = \frac{[(\Delta x_1 + \Delta x_2) \bmod 1] \lambda_{laser} / 4}{V_{cc}}$$

¹³¹ la valeur des différences n'est connue que modulo le pas d'échantillonnage parce qu'on ne connaît pas la relation entre les positions des ASE pour 2 directions du mouvement du CC. Cela ne pose pas de problème car les retards des chaînes électroniques sont nominalement d'une fraction du pas d'échantillonnage.

8.2.7 SURVEILLANCE DES FONCTIONS D'ERREUR DE PHASE

Objectif : Vérifier que les fonctions d'erreur de phase mesurées sont bien conformes aux fonctions d'erreur de phase modélisées¹³² (erreur attendue de quelques milliradians une fois supprimée la composante linéaire).

Note : L'utilisation des fonctions d'erreur de phase modélisées est suffisante pour le calcul des spectres réduits. C'est la seule utilisation des ces fonctions dans l'algorithme. Par contre, il peut être nécessaire de prendre en compte les fonctions de phase caractérisées pour simuler de façon réaliste des interférogrammes en cas d'analyse des défauts de l'instrument IASI par simulation.

Données d'entrées systématiques : néant

Acquisitions spécifiques : Série d'interférogrammes CS et BB pour un pixel et une bande donnée (n=10 AC)

Méthode :

1. On calcule les fonctions d'erreur de phase modélisées comme la phase de la fonction d'auto-apodisation en $x=0$
2. On évalue¹³³ les différences entre les phases mesurées et modélisées qu'on compare à un seuil.
3. On peut de plus faire un tracé des 2 fonctions et de leur différence.

8.2.8 SURVEILLANCE DES NON-LINEARITES ANALOGIQUES

Objectif : Vérifier si les tables de correction utilisées à bord (IAttOffsetTabAnalog et IAttSlopeTabAnalog) ne doivent pas être mises à jour pour tenir la performance.

Données d'entrées systématiques :

Acquisitions spécifiques : interférogrammes Black Body (données de vérification) pour une bande et un pixel donnés. Il faut s'assurer de la qualité de ces interférogrammes avant de les utiliser (§8.2.18)¹³⁴

Méthode :

1. On calcule un polynôme pour chaque interférogramme par l'algorithme ATT₆₁.
2. On moyenne les différents polynômes trouvés pour réduire le bruit.
3. On calcule les tables bord correspondantes.
4. On compare les spectres obtenus avec les nouvelles et les anciennes tables sur une collection d'interférogrammes de tests¹³⁵ (AD) ou bien plus simplement en calculant une différence entre polynômes.

Note : Il pourrait être utile d'utiliser d'autres interférogrammes¹³⁶ dans la procédure si l'interférogramme du BB ne couvrirait pas complètement la dynamique.

¹³² Voir § 6.5.4..

¹³³ voir la fiche descriptive SEP₁₀₂

¹³⁴ par exemple, il faut qu'ils ne soient pas pollués par des spikes.

¹³⁵ Vérifier qu'il n'y a plus d'artefacts (par exemple à fréquence double) dans les spectres de bruit large bande

¹³⁶ par exemple interférogrammes de visées atmosphériques ou espace froid.

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 146 of : 502
---	---	---	--

8.2.9 SURVEILLANCE DE LA CALIBRATION RADIOMETRIQUE COMPLEXE

Objectif : La calibration radiométrique complexe devrait en théorie fournir un résultat réel. Le résidu imaginaire (biais et bruit) est converti en une erreur de calibration radiométrique qui est comparée au poste correspondant du budget d'erreur.

Note : Si on observe un biais c'est le signe d'une dérive des émissions internes entre les visées de calibration (CS, BB) et les visées d'observation (EW).

Données d'entrées systématiques : BarcImagMean, BArcImagMeanMS, BArcImagRMS, MMcxBiasCalRad et MMcxNoiseCalRad

Acquisitions spécifiques : néant

Méthode : L'algorithme MCX₁₁₁ tourne en continu dans le segment sol EPS/CGS. Cet algorithme de l'OPS convertit les observables bord en erreur de température plus immédiatement exploitable et élabore un flag destiné à une surveillance rapide (BArcCalSpectNonQual). A la TEC on surveille l'évolution de MMcxBiasCalRad et MMcxNoiseCalRad (analyse statistique et dérive).

8.2.10 SURVEILLANCE DES COEFFICIENTS DE CALIBRATION RADIOMETRIQUE

Objectif : (1) Vérifier qu'il n'y a pas de grosses variations des coefficients de calibration $\alpha(v,t)$ et $\beta(v,t)$. Ces variations pourraient être dues en particulier à un dépôt de glace sur les optiques froides. Cette surveillance a donc pour but de prévoir la nécessité d'une décontamination. (2) Vérifier que les seuils de NON UPDATE sont bien dimensionnés.

Données d'entrées systématiques :

Acquisitions spécifiques : BCrcOffset, BCrcSlope, BFrcOffset, BFrcSlope correspondant aux données de vérification sélectionnées.

Séquence : Les coefficients de calibration transmis dans la télémesure scientifique correspondent à l'interférogramme programmé. La séquence de données de vérification sera donc adaptée pour obtenir les coefficients de calibration sur 10 lignes consécutives pour un pixel, une bande et une direction du coin de cube donnés et bouclage sur ces paramètres.

Méthode : (1) Tracé de $1/BFrcSlope(v)$ en fonction de v pour une date donnée (4 PN et 3 SB). Permettra de le comparer à des courbes de référence déduites des essais sol de l'instrument après correction tenant compte notamment des gains des chaînes de détection et des températures effectives de l'instrument. Idem pour l'offset.

(2) Tracé en fonction de v du rapport $R(v)=BFrcSlope_ref(v)/BFrcSlope(v)$ où $BFrcSlope_ref$ correspond à une valeur de référence de $BFrcSlope$ (stockée par exemple après chaque opération de décontamination). Le rapport correspond à l'évolution du gain¹³⁷ de l'instrument entre les 2 dates de mesures. Idem pour le rapport $BFrcOffset_ref(v)/BFrcOffset(v)$ qui pourrait indiquer cette fois une pollution des optiques chaudes.

¹³⁷ produit de la transmission par le contraste. La surveillance du contraste est décrite en § 8.2.21. La décision de décontaminer sera prise en considérant le résultat de ces 2 surveillances ainsi que l'évolution de températures caractéristiques de l'instrument.

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 147 of : 502
---	---	---	--

Tracé long terme de l'évolution temporelle du rapport $R(v)$ pour quelques nombres d'ondes v sélectionnés. Tracé du rapport $R(v_1)/R(v_2)$ en fonction du temps, v_1 et v_2 étant 2 nombres d'ondes paramétrables. Ce rapport permet de s'affranchir dans une large mesure des variations de température des détecteurs et des changements de gain des chaînes de détection pour l'analyse de la contamination de l'instrument par la glace.

(3) Analyse de série temporelle pour certains nombres d'ondes (tous les 10 ou 20 cm^{-1}). Il faut en particulier surveiller la dérive des coefficients sur 80 sec (durée de la période de calibration) qui induit une erreur de calibration radiométrique par effet de traînage liée au filtre linéaire du premier ordre utilisé à bord. On calcule, d'autre part, l'écart entre les coefficients de calibration instantanés et les coefficients filtrés (formule de calcul de la variable **Dist** dans l'algorithme bord RCI_{11}) pour déterminer s'il convient de remettre à jour les seuils de surveillance bord. On tracera l'évolution de la variable **dist** ainsi que le rapport $\text{Dist}/\text{CoeffCalCoeffCutoff}$ pour $\text{Coeff}=\text{Slope}$ et $\text{Coeff}=\text{Offset}$.

8.2.11 SURVEILLANCE DE LA TABLE DES PIXELS MORTS DE L'IIS

Objectif : On considère que les pixels de l'imageur IASI (IIS) sont dans un des trois états suivants : en bonne santé, état douteux, pixel morts. L'algorithme automatique DPT_{110} qui tourne dans l'OPS fait passer les pixels de l'état "en bonne santé" à l'état "douteux".

Données d'entrées systématiques : MDptIISBadHealthPix et MDptIISInHomPix (données techno)

Acquisitions spécifiques : Néant

Méthode : Analyse effectuée en différé à partir des informations produites par l'algorithme DPT_{110} et de séquences d'images extraites de l'archive EPS.

8.2.12 SURVEILLANCE DE LA COREGISTRATION IMAGEUR-AVHRR

Objectif :

1. Surveiller le bon fonctionnement de l'algorithme de corrélation
2. Extraire un modèle de l'évolution de la coregistration imageur IIS-AVHRR (fonction de t et de la PSO) pour : 1) définir un first-guess tant que la coregistration n'a pas été faite, 2) calculer une loi nominale qui pourrait être utilisée si l'IIS tombait en panne.

Données d'entrées systématiques : GIacCorrelQual, GIacPosMaxQual, GIacOffsetIISAvhrr

Acquisitions spécifiques : néant

Méthode :

1. Comparaison des indices de qualité avec la valeur théorique qui serait obtenue en ne tenant compte que du bruit des 2 instruments.
2. Ajuster un modèle temporel ou $f(\text{PSO})$ de l'écart IIS-AVHRR (en angle de visée satellite pour éviter les effets de projection au sol). Prévoir dans la boîte à outils ajustement de dérive (modèle polynomial) et analyse de Fourier du résidu.

8.2.13 SURVEILLANCE DE LA COREGISTRATION SONDEUR-IMAGEUR

Objectif :

1. Surveiller le bon fonctionnement de l'algorithme de corrélation
2. Extraire un modèle de l'évolution de la coregistration imageur IIS-Sondeur (fonction de t et de la PSO) pour : 1) définir un first-guess tant que la coregistration n'a pas été faite, 2) calculer une loi nominale qui pourrait être utilisée si l'IIS tombait en panne.

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 148 of : 502
---	---	--	--

Données d'entrées systématiques : MIscOffsetSondIIS et MIscCorrelQual

Acquisitions spécifiques : néant

Méthode : idem § 8.2.12.

8.2.14 SURVEILLANCE DES SEUILS DE DETECTION DE SPIKE

Objectif : Vérifier que les seuils de surveillance des spikes sont bien dimensionnés : trop petits ils donneront un taux de fausses alarmes trop important.

Données d'entrées systématiques : Flag de détection de spike BSpkFlagSpik (PN, SB, SN)

Acquisitions spécifiques :

Méthode : En cas de levée fréquente du flag de détection de spike par l'algorithme SPK₃, il faut pour commencer à comprendre avoir une collection d'interférogrammes de vérification qui correspondent à des détections de spike. On commence donc par rechercher ces événements dans la base d'interférogramme disponible (à la TEC ?) ou bien si la fréquence est vraiment très élevée sur un certain type d'interférogrammes (pixel, bande visée) on programme l'acquisition d'interférogrammes de vérification de ce type.

Analyse : on filtre l'interférogramme avec le même filtre que celui qui est implémenté par l'algorithme SPK₃. Si le signal est partout supérieur au seuil : cela peut être le signe d'une non linéarité mal corrigée (qui crée un artefact dans le spectre : le défaut s'étale donc un peut partout dans l'interférogramme). Si le dépassement est localisé on peut certainement l'attribuer à un spike.

8.2.15 SURVEILLANCE DE LA CALIBRATION SPECTRALE

Objectif : S'assurer du bon fonctionnement de la calibration spectrale effectuée par les algorithmes du logiciel opérationnel (SSD₂₃ et SSS₂₁)

Données d'entrées systématiques : GSsdFlagSpectralShiftNonQual, GSsdWnshift, GSsdWnshiftQual, GSssFlagNonSelPix, GSssWnshiftMean, GSssWnshiftMeanQual

Acquisitions spécifiques :

Méthode :

1. Vérifier qu'il n'y a pas de levée de flags
2. Vérifier que la sélection des décalage spectraux élimine bien les valeurs de Δv aberrantes en comparant la distribution des décalages spectraux sélectionnés et non sélectionnés par SSS₂₁.
3. Ajuster un modèle de la moyenne des décalages spectraux sélectionnés des 4 pixel en fonction de la PSO¹³⁸.

¹³⁸ destiné à vérifier qu'il n'y a pas d'erreur de la calibration spectrale en fonction du type d'atmosphère : erreur qui pourrait être due à une mauvaise initialisation des phases naturelles pour la fenêtre spectrale utilisée par SSD₂₃. Si on était conduit à recalculer les phases naturelles (IWnpPhaseNat et IWnpModulNat) pour améliorer la précision ou pour résoudre des problèmes de calibration identifiés par des utilisateurs, on validerait ces valeurs en simulant le traitement de l'OPS sur une collection de spectres 1A archivés (qui auraient par exemple été recueillis par ces mêmes utilisateurs).

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 149 of : 502
---	---	--	--

8.2.16 SURVEILLANCE DE LA POSITION DE L'AXE INTERFEROMETRIQUE

Objectif : Surveiller la qualité de la détermination de l'axe interférométrique et son mouvement pour s'assurer qu'il ne sort pas de la grille servant à tabuler les fonctions spectrales. A analyser en relation avec § 8.2.15.

Données d'entrées systématiques : Position instantanée et incertitude, position filtrée et indices de qualités issus de IAX₂₄ et FAX₂₅

Acquisitions spécifiques : néant

Méthode :

1. Dérives du mouvement par rapport à la précision affichée
2. Ajuster un modèle d'évolution et prédire date de sortie de grille si la tendance se conservait
3. S'assurer de la bonne adéquation du filtrage (durée d'oubli)

8.2.17 SURVEILLANCE DES TABLES DE CODAGE ET SPECTRES EXTREMES

Objectif : Vérifier que les tables de codage utilisées à bord sont correctement dimensionnées par rapport à la distribution de spectres mesurés par IASI. (marges suffisantes pour éviter les overflows/underflows et pas trop grandes pour ne pas introduire un bruit de codage trop important).

Données d'entrées systématiques : MExsSmax, MExsSmin (données techno de l'OPS)

Acquisitions spécifiques : néant

Méthode :

1. Surveillances des Overflows/Underflows (fréquence et position)
2. Description statistique des spectres extrêmes rencontrés (variation au cours de l'année pour optimiser les tables de codage)
3. Comparaison avec les valeurs min et max encodables avec les tables de codage
4. Nouveau calcul, si nécessaire, des tables de codage avec marges ajustées (dans les zones où les overflows apparaissent)

8.2.18 QUALITE DES INTERFEROGRAMMES DE VERIFICATION

Objectif : S'assurer, avant de les utiliser que les interférogrammes transmis dans les données de vérification sont "corrects".

Données d'entrées systématiques :

Acquisitions spécifiques :

Méthode :

1. Décommutation, analyse des données/flags bord,
2. Passage par l'algorithme de détection de spike

8.2.19 SPECTRE ESPACE FROID

Supprimée (intégrée dans §8.2.10)

8.2.20 INTERFEROGRAMMES DES VISEES DE CALIBRATION

Objectif : Surveiller l'évolution de la ligne de base et des valeurs min/max des interférogrammes sur les visées de calibration afin de détecter d'éventuelles dérives de la chaîne de mesure (offset électrique). Dans le cas où une dérive est détectée, avant de l'attribuer à une dérive de l'offset électrique, il faut s'assurer que l'évolution du flux thermique de l'instrument n'en est pas la cause (surveillance des températures des optiques chaudes). En fonction des résultats obtenus une modification des réglages de la chaîne de détection pourra être nécessaires (cf.[DR44])

Données d'entrées : BZpdNzpd, BNlcAnaMV

Acquisitions spécifiques : Série de n interférogrammes bruts des visées de calibration chaude (BB) ou froide (CS) pour une bande donnée et un pixel donné (n=10 AC).

Méthode :

1. Reconstitution de chaque interférogramme dans sa dynamique complète (ajout de la valeur de la ligne de base approchée BNlcAnaMV aux valeurs des interférogrammes bruts) et recentrage sur le NZPD correspondant (donné par NZpdNzpd).
2. Détermination du maximum I^{Max} , du minimum I^{min} , et de la ligne de base de tous les interférogrammes de la série (cf. note 140 ci-après). Cela nécessite un suréchantillonnage précédents (nécessite un suréchantillonnage qui peut être effectué par la technique du « zero padding »).
3. Stockage des ces 3 n valeurs afin de pouvoir faire des analyses de tendance (en distinguant les résultats obtenus sur les visées CS et BB)

8.2.21 CONTRASTE INTERFEROMETRIQUE

Objectif : Surveiller l'évolution du contraste de l'interféromètre.

Données d'entrées systématiques : BZpdNzpd, BNlcAnaMV

Acquisitions spécifiques : Série de n interférogrammes des visées de calibration chaude (BB) et froide (CS) pour une bande donnée (B3 en priorité) et un pixel donné (n=10 AC) après correction de non linéarité. L'ordre programmé devrait être BB, CS, BB, CS, etc.

Méthode :

1. Reconstitution de chaque interférogramme dans sa dynamique complète (ajout de la valeur de la ligne de base approchée BNlcAnaMV aux valeurs des interférogrammes sortis de NLC₂) et recentrage sur le NZPD correspondant (donné par BZpdNzpd).
2. Calcul séparé de la moyenne des interférogrammes CS et BB pour supprimer le bruit. Moyenne des interférogrammes CS --> I_h . Moyenne des interférogrammes BB --> I_c .
3. Détermination du maximum I^{Max} , du minimum I^{min} , de la ligne de base $I^{\text{inf}139}$ pour chacun des interférogrammes moyens précédents (nécessite un suréchantillonnage qui peut être effectué par la technique du « zero padding »).
4. Calcul du contraste moyen dans la bande en appliquant la formule ci-dessous¹⁴⁰

¹³⁹ La ligne de base I_{inf} est calculée comme la moyenne des valeurs de l'interférogramme en ignorant la partie centrale de celui-ci (IDefNsCF échantillons de part et d'autre du NZPD).

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 151 of : 502
---	---	---	--

$$\tilde{C}_{\text{interferogram}} = \frac{(I_H^{\text{Max}} - I_H^{\text{min}}) + (I_C^{\text{Max}} - I_C^{\text{min}})}{2 \cdot (I_H^{\text{inf}} - I_C^{\text{inf}})}$$

On stockera les résultats pour pouvoir réaliser une analyse de tendance à long terme. (pour plus de détail se référer à [DR45]).

8.3 INDICES DE QUALITE SYSTEME (QIS₄₅)

Les produits IASI contiennent cinq indices de qualité et un flag indiquant que le produit est bon ou doit être considéré avec beaucoup de précautions.

Trois des indices de qualité sont relatifs aux performances spectrales, radiométriques et géométriques du sondeur ; le quatrième est une synthèse des précédents. Le cinquième est relatif à la qualité des images fournies par l'IIS.

Le document [DR41] décrit les principes selon lesquels les indices de qualité des spectres doivent être élaborés. En synthèse, on peut dire que les indices de qualité représentent l'augmentation NeΔT par rapport au bruit radiométrique purement instrumental.

L'approche actuelle du calcul est la suivante :

- Pour la performance spectrale : on utilise l'incertitude sur la position de l'axe interférométrique filtré issue de l'algorithme FAX₂₅.
- Pour la qualité de la calibration radiométrique : on utilise l'information sur le résidu imaginaire de la calibration radiométrique complexe élaboré par MCX₁₁₁.
- Pour la qualité géométrique, on utilise à la fois l'incertitude sur la coregistration IIS-AVHRR donnée par IAC₄₀ ainsi que l'information sur la variabilité des spectres à l'intérieur de l'image extraite des sorties de l'algorithme d'analyse des radiances AVHRR (CCS₄₁).

8.4 INDICATEURS D'ERREURS (FLAGS)

Le tableau suivant fournit la liste des flags produits par le système IASI. Dans une prochaine version de ce document, on fera apparaître les dépendances entre ces différents flags (de manière à distinguer les flags synthétiques à surveiller systématiquement et les flags élémentaires qui pourraient n'être consultés qu'à des fins d'investigation).

La colonne prod. indique :

- soit l'algorithme générateur,
- soit OPS si le flag est levé lors des contrôles de la télémessure scientifique ou des produits AVHRR (absence ou corruption des données d'entrée).

Identificateur	Libellé	Prod.
----------------	---------	-------

¹⁴⁰ L'emploi de cette formule est justifié par le fait que les spectres BB et CS sont déphasés de π sur l'instrument IASI

Identificateur	Libellé	Prod.
BArcFlagCalSpectNonQual	Flag de qualité de la calibration radiométrique complexe	ARC
BCodFlagFlood	Flag de débordement du champ de bits alloué au spectre	COD
BDcoFlagErrorInterf	Flag de qualité réception de l'interférogramme	DCO
BDcoFlagMasEcret	Flag d'ecrétage du signal Mas	DCO
BDcoFlagMasErrorNbWords	Flag d'erreur entre le nombre de Rpd et le nombre de mots reçus	DCO
BDcoFlagMasErrorPath	Flag d'erreur de codage de la voie d'amplification	DCO
BDcoFlagMasOverFlow	Flag d'overflow du numériseur	DCO
BIRSFlagSrdNonIntegrityBB	Flag d'intégrité du spectre réduit du corps noir chaud	IRS
BIRSFlagSrdNonIntegrityCS	Flag d'intégrité du spectre réduit de l'espace froid	IRS
BISIFlagErrorFft	Flag d'intégrité du nombre d'échantillon de l'interférogramme	ISI
BRciFlagNonIntegrityOffset	Flag d'intégrité du coefficient de calibration Offset	RCI
BRciFlagNonIntegritySlope	Flag d'intégrité du coefficient de calibration Slope	RCI
BSpkFlagSpik	Flag de détection de spike	SPK
BZpdFlagNZpdNonQualBB	Flag de qualité de détection du Nzpd corps noir chaud	ZPD
BZpdFlagNZpdNonQualCS	Flag de qualité de détection du Nzpd espace froid	ZPD
BZpdFlagNZpdNonQualEW	Flag de qualité de détection du Nzpd visée terre	ZPD
GDocFlagErrorNbBit	Flag de non concordance nombre de bits au codage-décodage	DOC
GDocFlagUnderOverFlow	Flag de présence d'under ou d'overflow	DOC
GFaxFlagAxeNonQual	Flag de qualité de la position filtrée de l'axe interférométrique	FAX
GIacFlagCoregNonQual	Flag de qualité de coregistration imageurs IASI/AVHRR	IAC
GIacFlagCoregNonValid	Flag de défaut de coregistration imageurs IASI/AVHRR	IAC
GIaxFlagAxeNonQual	Flag de qualité de la détermination de l'axe interférométrique	IAX
GIsfFlagPdsNonValid	Flag de validité des poids d'interpolation	ISF
GOPSFlaDataGap	Trou de mesure	OPS
GOPSFlaGeoAvhrrMiss	Données de navigation AVHRR non disponibles	OPS
GOPSFlaIisCalibMiss	Tableau utilisé pour indiquer à 38_ICC quelles images sont disponibles.	OPS
GOPSFlaPacketAPMiss	Le paquet instrument de données auxiliaires est manquant.	OPS
GOPSFlaPacketIPMiss	Les paquets IP sont manquants.	OPS
GOPSFlaPacketPXMiss	Les paquets PX sont manquants	OPS
GOPSFlaPacketVPMiss	Les paquets instrument de vérification sont inexploitable	OPS

Identificateur	Libellé	Prod.
GOPSFlaPixMiss	Données liées au spectre IASI non utilisable	OPS
GOPSFltBandMiss	Une bande est considérée non utilisable	OPS
GOPSFltBBTMiss	La température du corps noir est inutilisable	OPS
GOPSFltImgBBMiss	Une image de calibration corps noir chaud est absente.	OPS
GOPSFltImgCSMiss	Une image de calibration espace froid est absente.	OPS
GOPSFltImgEWMiss	L'image du SN correspondant est non utilisable	OPS
GOPSFltIsrfemOff	Chaîne ISRFEM (22_SOS, 23_SSD) non activée	OPS
GOPSFltRadAvhrrMiss	Les radiances AVHRR sont inutilisables pour le SN associé	OPS
GSsdFlagSpectralShiftNonQual	Flag de qualité de détermination du shift spectral	SSD
GSssFlagNonSelPix	Flag de non sélection du pixel	SSS
HMuwFlagOffsetMVNonValid	Flag de non validité de la compensation de la ligne de base	MUW
ICtcFlagNbBitMax	Flag de dépassement du nombre de bit maximum par spectre	CTC
ICtcFlagNbBitSplMax	Flag de dépassement du nombre de bit maximum par échantillon	CTC
ISblFlagErrorLimits	Flag d'erreur de détermination des limites de bande spectrale	SBL
ISblFlagNoiseError	Flag de dépassement du seuil de bruit dans la bande spectrale	SBL
ISblOsbFlagErrorLimits	Flag d'erreur dans la détermination des limites de recouvrement	OSB
ISmtFlagTScanNonQual	Flag de qualité de la mesure de température du scan	SMT
MIscFlagCoregNonQual	Flag de mauvaise qualité de la co-registation sondeur-imageur	ISC
MIscFlagCoregNonValid	Flag d'échec de la co-registation sondeur-imageur	ISC
MMatFlagQual	Flag de stabilité de la fonction de transfert analogique	MAT
MMccFlagShapeIndex	Flag de dépassement du seuil de qualité de l'index de forme	MCC
MMcxFlagBiasCalRad	Flag de dépassement de seuil du biais de calibration radiométrique	MCX
MMcxFlagImagRMSNonValid	Flag de non validité du seuil de qualité de calibration radiométrique complexe	MCX
MMcxFlagNoiseCalRad	Flag de dépassement de seuil du bruit de calibration radiométrique	MCX
MScoFlagNsfirstCF	Flag de mauvaise position du début de frange centrale	SCO
MScoFlagNslastCF	Flag de mauvaise position de la fin de frange centrale	SCO
MScoFlagSpikCutoffCF	Flag de proximité au cutoff dans la frange centrale	SCO
MScoFlagSpikCutoffCFO	Flag de proximité au cutoff hors de la frange centrale	SCO

9. REPERTOIRE DES ALGORITHMES

La table suivante présente la liste des algorithmes avec les différentes localisations où ces algorithmes sont implantés dans le système IASI (cf § 3.8).

- Bord : Algorithmes implantés dans l'instrument IASI,
- OPS : Algorithmes implantés dans le logiciel OPS qui fournit les produits IASI de niveau 1,
- GSE : Algorithmes implantés dans les logiciels de recette sol de l'instrument,
- TEC : Algorithmes implantés dans le Centre d'Expertise Technique.

9.1 ALGORITHMES BORD

N°	Nom	Libellé	Bord	OPS	TEC	GSE
1a	DCO	Décompactage des valeurs de l'interférogramme	x		x	
1c	COI	Troncature des images	x		x	
2	NLC	Correction de non-linéarité de la chaîne d'acquisition	x		x	
3	SPK	Détection de spikes	x		x	
4	ZPD	Détermination du ZPD	x		x	
5	IRS	Calcul de l'intégrité des spectres réduits instantanés des visées de calibration	x		x	
6	FRS	Filtrage des spectres réduits des visées de calibration	x		x	
7	ISI	Préparation de l'interférogramme centré sur le NZPD	x		x	
8	FFT	Transformée de Fourier	x		x	
9	PLK	Calcul de la fonction de Planck	x	x	x	x
10	CRC	Calcul des coefficients de calibration radiométrique	x		x	
11	RCI	Elaboration du flag d'intégrité des coeff de calibration radiométrique	x		x	
12	FRC	Filtrage des coefficients de calibration radiométrique	x		x	
13	ARC	Calibration radiométrique	x		x	
14	MRG	Combinaison des bandes spectrales	x		x	
15	COD	Codage des spectres	x		x	

9.2 ALGORITHMES DU TRAITEMENT SOL

N°	Nom	Libellé	Bord	OPS	TEC	GSE
20	DOC	Décodage des spectres		x	x	x
21	SSS	Sélection des déterminations des décalages spectraux		x	x	
22	SOS	Suréchantillonnage d'un spectre		x	x	
23	SSD	Détermination des décalages spectraux		x	x ¹⁴¹	
		Détermination des décalages spectraux		x		x ¹⁴²
24	IAX	Détermination de la position de l'axe interférométrique instantané		x	x	x
25	FAX	Détermination de la position de l'axe interférométrique filtré		x	x	x
30	FTB	Filtrage de la température du corps noir interne (BB)		x	x	x
31	SCR	Calibration spectrale du coefficient de calibration radiométrique		x	x	x
32	HEC	Correction d'émissivité du corps noir chaud		x	x	x
33	SME	Estimation de la température du miroir de balayage		x	x	x
34	SMC	Correction angulaire de réflectivité et de polarisation du miroir de balayage		x	x	x
35	S1B	Rééchantillonnage du spectre		x	x	
37	S1C	Apodisation d'un spectre		x	x	
38	ICC	Calcul des coefficients de calibration radiométrique des images		x	x	x
39	IRC	Calibration radiométrique des images		x	x	x
40	IAC	Co-registraton imageur-AVHRR		x	x	
41	CCS	Analyse des radiances dans les FOVs sondeur		x		
42	PCH	Construction des pseudos canaux IASI-AVHRR		x		x
43	ISF	Interpolation des fonctions spectrales		x	x	
44	GEO	Localisation des produits IASI		x	x	

¹⁴¹ sur cibles atmosphériques

¹⁴² pour les conditions de recette

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 156 of : 502
---	---	--	--

N°	Nom	Libellé	Bord	OPS	TEC	GSE
45	QIS	Indices de qualité système		x		
46	HIP	Homogénéité inter-pixel du NZPD		x		x

9.3 ALGORITHMES D'INITIALISATION

N°	Nom	Libellé	Bord	OPS	TEC	GSE
50	CTC	Construction des tables de codage des spectres			x	x
51	USB	Détermination des limites des bandes spectrales utiles			x	
52						
53	ZSB	Détermination des limites de bandes spectrales utiles des spectres réduits de calibration			x	
54	RSC	Initialisation des spectres réduits des visées de l'espace froid			x	x
55	RSH	Initialisation des spectres réduits des visées du corps noir chaud			x	x
56	SBL	Calcul des limites de bandes			x	x
57	CCO	Calcul de l'offset long terme du mouvement du coin de cube			x	x
58	WNP	Calcul des phases naturelles d'une fenêtre spectrale			x	
59	SMA	Actualisation des coefficients de réflectivité du miroir de balayage			x	x
60	PEF	Calcul des fonctions d'erreur de phase			x	x
61	ATT	Construction de la table de correction de la fonction de transfert analogique			x	x
62	DTT	Construction des tables de correction de la fonction du numériseur				x
63	SMM	Initialisation du modèle de calcul de la température du miroir de balayage			x	x
64		Supprimé				
65	CCM	Initialisation du mouvement du coin de cube			x	
66	SMT	Mesure de la température du miroir de balayage			x	x

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES			Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 157 of : 502
---	---	--	--

N°	Nom	Libellé	Bord	OPS	TEC	GSE
67	RNS	Calcul des spectres de bruit radiométrique			x	
68	NLB	Calcul des spectres de bruit large bande			x	
69						
70	MZQ	Calcul des limites de détection de la frange centrale			x	
71	RNM	Calcul de la matrice de covariance du bruit radiométrique				
72	ESM	Modélisation des spectres atmosphériques extrêmes				
73	CSM	Modélisation des spectres extrêmes de calibration			x	
74	SDB	Lecture et écriture de la banque de données spectrales			x	
75	PSP	Positionnement des IPSF			x	
76	SAF	Calcul des fonctions d'auto-apodisation			x	x
77	SAS	Prise en compte de l'échantillonnage Rpd				x
78	SRF	Calcul des fonctions d'instrument				x
79	CAF	Calcul des fonctions d'apodisation				
80	NPS	Introduction de la variation inter pixels de la phase naturelle dans les shifts spectraux			x	
81	CMO	Calcul d'un modèle orbital			x	
82	SRC	Calcul de la fonction instrument 1C				

9.4 ALGORITHMES DE SURVEILLANCE

N°	Nom	Libellé	Bord	OPS	TEC	GSE
100	EXS	Mise à jour des spectres d'énergie minimale et maximale		x	x	
101	SHB	Surveillance du signal hors bande utile			x	
102	SEP	Surveillance des fonctions d'erreur de phase			x	
105	IHB	Calcul de l'interférogramme moyen et du bruit brut			x	
106	HCD	Calcul de différences entre histogrammes cumulés			x	
109	ISC	Co-registration sondeur-imageur		x	x	
110	DPT	Calcul de la table des pixels-image morts		x	x	x

 <small>CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES</small>	 IASI	 IASI	Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE Issue : 6 Date: Rev : 5 Date: 04/06/ 2009 Page : 158 of : 502
--	--	---	--

N°	Nom	Libellé	Bord	OPS	TEC	GSE
111	MCX	Surveillance de la calibration radiométrique complexe		x	x	
122	SCO	Surveillance de la validité des seuils de détection des spikes			x	

 <p>cnes CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES</p>	 <p>IASI</p>	<p>Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE</p> <p>Issue : 6 Date:</p> <p>Rev : 5 Date: 04/06/ 2009</p> <p>Page : 159 of : 502</p>
---	--	---

Page laissée intentionnellement blanche

 CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES	 IASI	 IASI	<p>Doc n° IA-DF-0000-2006-CNE</p> <p>Issue : 6 Date:</p> <p>Rev : 5 Date: 04/06/ 2009</p> <p>Page : 160 of : 502</p>
---	---	--	---

Page laissée intentionnellement blanche