



*Rapport final de recherche en
partenariat industriel entre le
BRGM et le DLR.*

*RPI n°21. Evaluation du Spectro-Imageur
GERIS en géologie.*

Jean-Paul DEROIN, Véronique CARRERE et Jean-Yves SCANVIC

Rapport final de recherche en partenariat industriel (RPI) entre le BRGM et le DLR

* * * * *

RPI n°21. Evaluation du Spectro-Imageur GERIS en Géologie

Le traitement numérique des données de télédétection à haute résolution spectrale
dans 63 canaux (0,477-2,44 μm) :
Application au site de Bessèges (Cévennes)

Jean-Paul DEROIN (SGN/TED)
Véronique CARRERE (JPL, Etats-Unis)

Jean-Yves SCANVIC (SGN/TED), Chef de Projet



qualité

INFORMATIONS A NOS LECTEURS

Ce document est un rapport du

BRGM

This document is a report of

BRGM

Dans une bibliographie, ce document doit être cité de la manière suivante :

J.P.DEROIN, V.CARRERE et J.Y.SCANVIC (1992). Rapport final de recherche en partenariat industriel (RPI) entre le BRGM et le DLR. RPI n°21. Evaluation du Spectro-imageur GERIS en Géologie. Rapport public BRGM, 34373, 24 p., 2 fig., 4 tabl., 21 p. d'annexes.

(auteur, année d'édition, titre, nature et numéro du document, nombre de pages, de figures, de tableaux, de planches, d'annexes).

Le BRGM conserve la propriété intellectuelle de ce document et de ses annexes. La reproduction, la recopie ou la communication intégrales ou partielles de ce document, y compris les annexes, sont soumises à autorisation écrite du BRGM

© **BRGM**

All rights reserved. This document, including its annexes, may not be reproduced or copied, in any form or by any means whatsoever, or lent, given or communicated in any way whatsoever, in whole or in part, without the prior written consent of the BRGM.

Le contenu de ce document a fait l'objet d'un contrôle technique

Fiche de contrôle

Fiche de lecture

N° du formulaire
AQ0281/AQ106FO

Rapport n°: 34373

Opération n°:

Contrat n°: RPI n°21

RESUME

Des données du capteur GER (0,477 à 2,44 μm) ont été acquises le 14 juin 1989 sur le site-test des Cévennes (secteur de Bessèges, Dpt du Gard). Le GERIS (Geophysical Environmental Research Imaging Spectrometer) est un spectro-imageur à haute résolution spectrale qui fournit une information sur 63 canaux du visible au SWIR (short wave infrared). Les enregistrements numériques, traités de façon préliminaire au Département Télédétection du BRGM en 1990, sont réétudiés au Département "Earth Sciences and Planetology" du JPL (Pasadena, Etats-Unis). On corrige spectralement les données (correction de radiance, corrections atmosphériques par LOWTRAN 7) et l'on extrait des spectres dans les domaines de longueur d'onde du visible et du SWIR. On teste notamment différents types de correction atmosphérique (flat field, logs résiduels, modèle de transfert radiatif).

On utilise la connaissance du terrain pour sélectionner une cinquantaine de plages homogènes dans les unités de paysage représentatives des aires carbonatées (dépôts d'âge mésozoïque du Causse de Berrias) ou siliceuses (grès et conglomérats du Houiller et du Trias, Schistes des Cévennes et leptynites). Les unités de végétation sont également abordées, même si le site expérimental de la hêtraie pure de la Cham du Pont (Lozère) n'a pu être exploité en raison des conditions d'enneigement.

Les résultats obtenus, argumentés à partir des cibles, confirment la mauvaise qualité radiométrique des données du GER-II de la campagne EISAC'89 ; certaines bandes d'absorption atmosphérique (CO₂) qui servent habituellement à caler les enregistrements ne sont pas retrouvées, en raison de bandes plus larges (30-35 nm) que prévues (12-16 nm) dans le SWIR. Dans le domaine des réponses minérales, seules les argiles semblent individualisées vers 2,20-2,22 μm (zones de sols nus sur le Houiller, stériles de mines, terres labourées, zones urbaines). Ni les calcaires ni les marnes liasiques ne sont détectés. Dans les Cévennes, en milieu climatique tempéré, les seules aires minérales suffisamment étendues perçues en spectro-imagerie sont des secteurs d'altération à phyllosilicates caractérisés dans certaines bandes spectrales du SWIR.

TABLE DES MATIERES

Résumé	2
Table des matières	3
Les données du GER	4
Contexte	4
La campagne EISAC'89	5
Présentation géographique et géologique	5
La spectrométrie imageante	7
Généralités	7
Principaux pics d'absorption des minéraux	8
Le traitement des données du GER	9
Tableau de calibration (1)	9
Tableau de calibration (2)	10
La zone d'étude et les cibles homogènes	10
Tableau des 37 cibles homogènes	11
Calibration des enregistrements numériques	12
Procédures de correction atmosphérique	12
Méthodes dépendantes de la scène	12
Méthode indépendante de la scène	13
Paramètres de l'acquisition GER	14
Correction par log. résiduels	14
Les maxima d'absorption	15
Résolution spectrale du GERIS	16
Conclusion	18
Bibliographie	20
Annexes (spectres GERIS)	24

LES DONNEES DU GER

CONTEXTE

Dans le cadre d'une collaboration liant le BRGM au DLR (*Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt*, Oberpfaffenhofen, Allemagne), une acquisition aéroportée du capteur GERIS (*Geophysical Environmental Research Imaging Spectrometer*), développé par la société américaine GER Corp., a été effectuée le 14 juin 1989 (8h30 GMT, 10h30 MEZ) suivant un axe d'azimut N.115°E s'étirant sur environ 40km du bassin d'Alès (région de Barjac) au Mont Lozère (région des Signaux). L'altitude de vol (3450 m) induit une résolution spatiale de 12,5m (suivant la verticale du vol) et 17,5m (en limite de la trace). L'enregistrement numérique a été effectué sur une zone de 512 x 3441 pixels. Cette expérimentation s'insère dans le programme EISAC'89 (*European Imaging Spectroscopy Airborne Campaign*) d'évaluation des données du GER sur des sites européens (Espagne, Norvège, Allemagne, France, Italie, Angleterre) et du Proche-Orient (Israël). Le BRGM a assuré le financement de l'acquisition "Cévennes".

Les données ont été mises à la disposition du BRGM au premier semestre 1990. Elles ont été prétraitées (correction de roulis, *electronic time constant correction*) à l'Institut d'Opto-Electronique du DLR suivant les procédures standard (LEHMANN *et al.*, 1989a, 1989b et 1991).

Il était initialement envisagé de calibrer les données à partir de spectres obtenus sur le terrain avec le spectroradiomètre portable MARK IV du BGR (*Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*, Hanovre, Allemagne). La mission de reconnaissance de juin 1990 n'a pas pu inclure ce travail de radiométrie de terrain en raison des impératifs d'emploi du temps des partenaires allemands ; elle a consisté en une définition de cibles homogènes du point de vue spectral (végétation ou sol) pouvant être utilisées pour calibrer et interpréter les enregistrements numériques. Un contrôle de la lithologie des terrains a été effectué. Les unités de végétation ont été analysées par Thierry DEROIN (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris).

Les données brutes ont été évaluées de façon préliminaire sur le secteur restreint à la fenêtre de Bessèges (512 x 1024 pixels) en raison de conditions nuageuses, d'une part, au-dessus du Mont Lozère et, d'autre part, au-dessus du bassin d'Alès (DEROIN, 1990 ; DEROIN et SCANVIC, 1990). Il restait à effectuer les procédures de correction radiométrique (correction de radiance, correction atmosphérique). Les relations privilégiées avec le Jet Propulsion Laboratory (NASA-JPL) nous ont encouragé à effectuer la chaîne de traitement en collaboration avec ce laboratoire ; en outre, les impératifs d'emploi du temps du DLR ne permettaient pas de faire l'opération à Oberpfaffenhofen dans les délais impartis au RPI.

LA CAMPAGNE EISAC'89

Des données aéroportées du GER (BODECHTEL et SOMMER, 1990) ont été acquises sur le site d'Almaden (Espagne) pour la cartographie de certaines altérations servant de guides en exploration minière (LEHMANN *et al.*, 1990 ; WERNER et LEHMANN, 1990a et 1990b), sur le site de Fribourg-en-Brigau (Allemagne) pour le suivi de différents types de culture (BACH et MAUSER, 1990), sur le site maritime du Skagerrak, entre le Danemark et la Norvège, pour des études phytosanitaires (PETERSSON *et al.*, 1990), sur le site de l'Ardèche (Sud de la France) pour la classification de l'occupation des sols en zone méditerranéenne (HILL et KOHL, 1990), sur le désert du Negev (Israël) pour la cartographie de certains minéraux, notamment dans des zones d'altération hydrothermale (KAUFMANN et RONEN, 1990 ; KAUFMANN *et al.*, 1990). D'autres acquisitions ont été effectuées sur Sylt et Helgoland (Allemagne du Nord), Somerset Levels (Sud de l'Angleterre) et la région de Venise et Sacca di Goro (Italie du Nord).

Le vol sur le site des Cévennes, effectué près du vol "Ardèche" de l'équipe du JRC (*Joint Research Center*) d'ISPR (J.HILL), avait pour objet l'étude des signatures spectrales des terrains sédimentaires et métamorphiques plus ou moins couverts par la végétation. Les zones les plus affleurantes s'observent dans les carbonates du Causse de Berrias et, beaucoup plus localement, dans les niveaux d'âge stéphanien du bassin houiller de Bessèges. Les seules zones métamorphiques non couvertes par des forêts sont des secteurs d'anciennes exploitations minières.

PRESENTATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU SITE-TEST DES CEVENNES (Sud-Est du Massif central français)

Les conditions climatiques (enneigement) ont rendu difficile le choix d'une zone-test permettant de répondre aux objectifs, car les zones les plus affleurantes (reliefs monumentaux des granites porphyroïdes à l'est du Mont Lozère) ou les plus intéressantes du point de vue de l'étude des anomalies de réponse spectrale (hêtraie pure de la Cham du Pont, DEROIN et DEROIN, 1990) étaient sous un couvert nuageux dense. La partie orientale du Causse de Berrias, à carbonates et alternances marno-calcaires affleurants, était également oblitérée par une passée nuageuse s'étendant sur l'ensemble du bassin d'Alès.

Le site expérimental finalement sélectionné correspond à un peu moins de la moitié (45%) de la zone couverte, soit 512 x 1530 pixels (Fig.1). La fenêtre retenue est sensiblement plus grande que celle utilisée pour l'étude préliminaire (512 x 1024 pixels). Il s'agit d'une fenêtre d'axe N.115°E, centrée sur la ville de Bessèges (Dép. du Gard) et s'étendant le long de la vallée de la Cèze, un affluent de l'Ardèche. Vers l'ouest, la zone inclut le barrage écréteur de Sénéchas. Les coordonnées du centre sont, exprimées en degrés : latitude N.44°21', longitude E.4°05'. Les cartes topographiques de référence sont, à 1/25.000, les coupures de Bessèges et Saint-Paul-le-Jeune (2839 W et E). La carte géologique du secteur est la feuille Bessèges à 1/50.000 (n.888, Ed. du BRGM).

A l'est, les terrains d'âge mésozoïque (Trias à Néocomien) du Causse de Berrias (partie méridionale) forment une structure synclinale dont les auréoles sont à dominante calcaire ou dolomitique, et le cœur à dominante marno-calcaire. Les unités de paysage sont

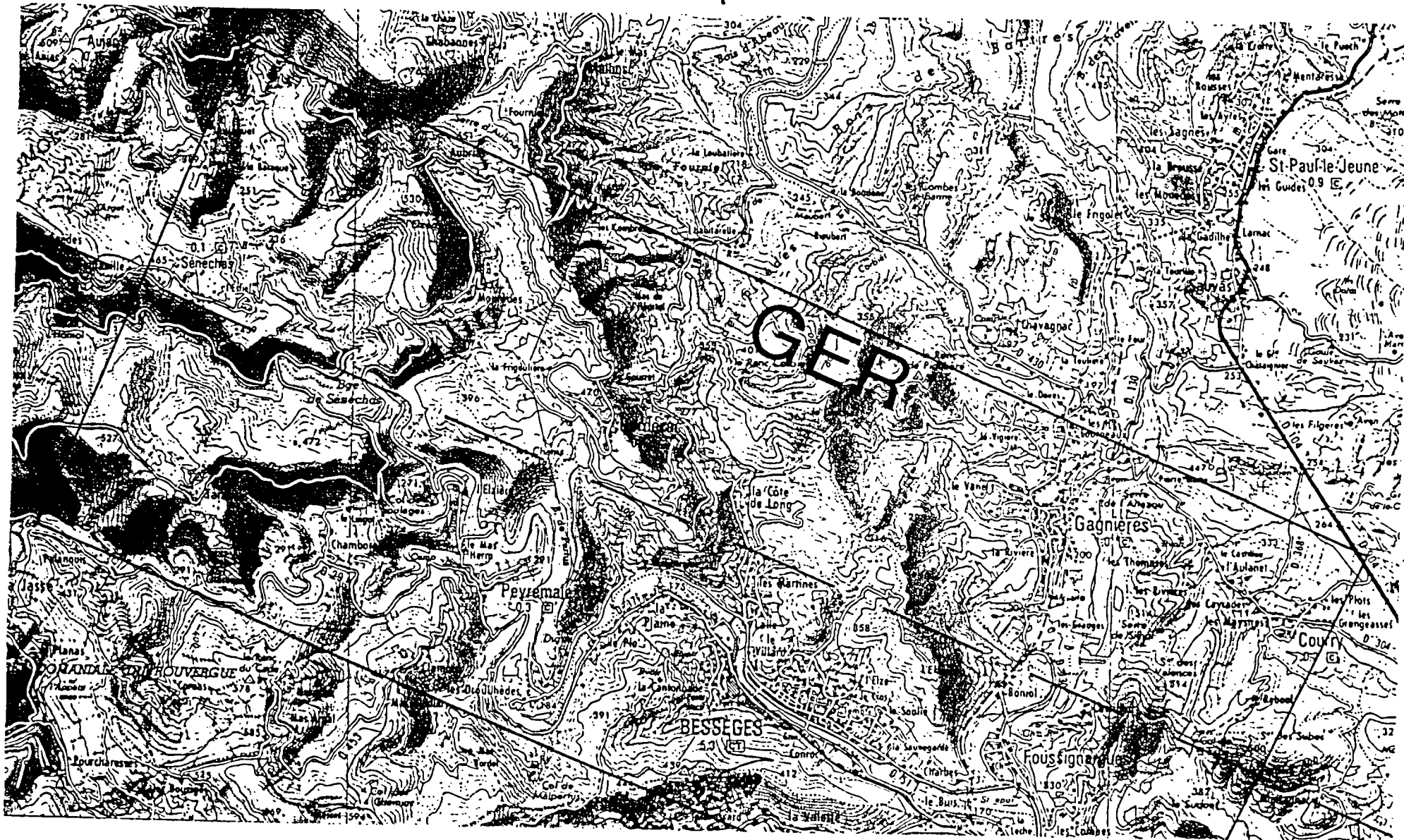


Fig. 1 - GER Flight (1989) - Geology JPL/BRGM/PARIS VI

tranchées en raison de couverts végétaux variant des dépressions cultivées (cœur du bassin) à la garrigue dense (sur dolomie), et à la forêt de feuillus (châtaigniers dominants) sur les grès triasiques qui constituent la base de la série sédimentaire du bassin (Fig.2).

Le bassin d'âge stéphanien de Bessèges constitue le prolongement, vers le nord, du bassin du Gard particulièrement développé dans la région de la Grand'Combe. Dans le secteur d'intérêt, le Houiller est surtout représenté par des formations gréseuses, souvent stériles, et d'anciens niveaux d'extraction de la houille reboisés en essences résineuses. Certaines de ces zones ont été brûlées au cours d'incendies estivaux.

Le substratum cristallophyllien est constitué de schistes épimétamorphiques (Schistes des Cévennes) et de leptynites (orthogneiss de la Cézarenque) qui pourraient représenter leur socle relatif (protérozoïque ?). La structuration majeure de cette unité est d'âge varisque. Le relief est accentué et le couvert forestier quasi continu ; seules certaines aires d'anciennes exploitations minières (Sb, As, W, Au, etc.) offrent des surfaces minérales affleurantes, plus ou moins envahies par la végétation en fonction de l'époque de l'abandon des concessions. L'or a également, et principalement, été prospecté le long des cours d'eau, en placers. On note aussi la présence de très nombreuses occurrences de type BPG à zinc ou plomb (argentifère) dominant.

Vers le NW, le batholite granitique de Villefort (Mont Lozère et massif de la Borne) intrude les séries métamorphiques. Il n'affleure pas sur le secteur retenu.

La structuration régionale date principalement du Paléozoïque supérieur (tectonique tardi-hercynienne) et du Cénozoïque (tectonique alpine), cette dernière ayant réactivé des traits structuraux créés au Tardi-Hercynien (DEROIN *et al.*, 1990 ; DEROIN *et al.*, 1992). La faille subméridienne de Villefort, bien exprimée au niveau des massifs granitiques de la Borne et du Mont Lozère décalés de plusieurs kilomètres au Stéphano-Autunien, est reconnue dans la morphologie actuelle de la zone métamorphique (notamment sur les images satellitaires), mais son rôle au cours de la structuration ductile des Schistes des Cévennes n'est pas clairement établi.

* * *

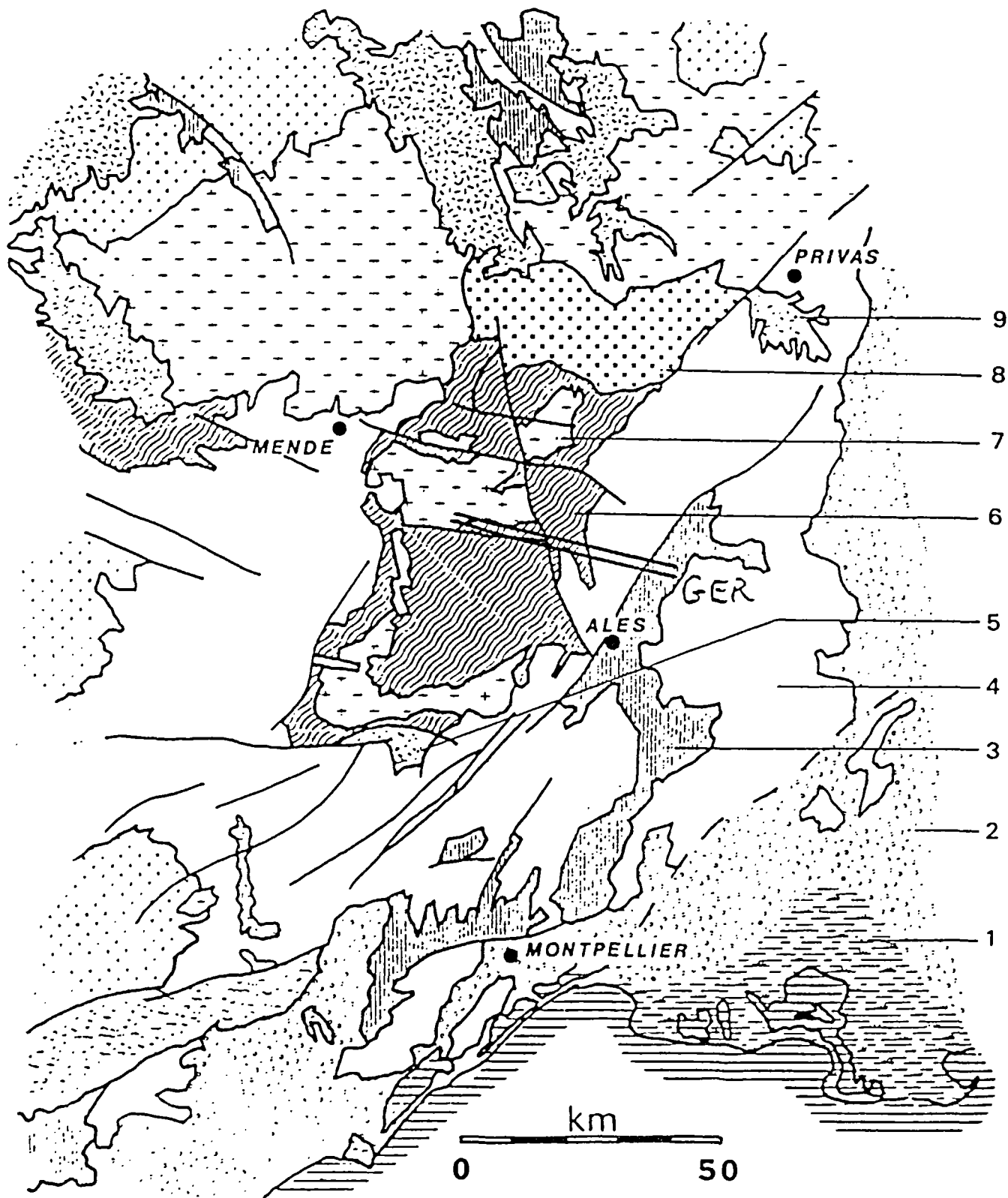


Fig.2. . Schéma structural de la zone d'étude.

Formations sédimentaires et détritiques: 1. Alluvions récentes (delta du Rhône); 2. Mio-pliocène; 3. Paléogène; 4. Couverture mésozoïque; 5. Paléozoïque non métamorphisé. Formation métamorphique: 6. Schistes des Cévennes et schistes cristallins de Joyeuse. Formations plutoniques: 7. Granites calco-alkalins tardivarisiques; 8. Migmatites. Formation volcanique: 9. Basaltes plio-quaternaires de l'Aubrac, du Velay, des Coirons et de l'Escandorgue.

LA SPECTROMETRIE IMAGEANTE

Brève synthèse

GENERALITES

La spectrométrie imageante à très haute résolution spectrale consiste en l'acquisition simultanée d'images numériques, dans des bandes spectrales contiguës et étroites, méthode développée notamment dans le domaine des sciences de la Terre (GOETZ *et al.*, 1985, VANE et GOETZ, 1988). C'est un outil utile pour la production rapide de cartes détaillées dans des secteurs non ou mal cartographiés, ainsi que pour la mise à jour des cartographies géologiques existantes et la prospection minérale (*e.g.* CARRERE, 1990 & 1991 ; KRUSE *et al.*, 1990).

Les larges bandes spectrales des systèmes opérationnels tels que LANDSAT-MSS, -TM ou SPOT-HRV (100-200 nm) intègrent l'information de nombreux objets qu'il n'est généralement pas possible d'isoler spectralement. Un spectro-imageur, au contraire, échantillonne à intervalle fin (10-50 nm) et permet théoriquement d'obtenir après correction atmosphérique, sur des cibles minérales homogènes, des spectres proches de ceux que l'on mesurerait en laboratoire.

Le succès des premiers spectro-imageurs, tels que AIS (*Airborne Imaging Spectrometer*) (*e.g.* CROWLEY *et al.*, 1989), et la demande des industries minières et pétrolières ont conduit la GER Corp. à développer un scanneur à haute résolution spectrale possédant 63 canaux, un 64e canal servant au stockage des informations gyroscopiques.

Le système comprend trois spectromètres indépendants qui permettent l'acquisition simultanée des données dans l'ensemble des canaux : (1) 0,477 à 0,848 μm ; (2) 1,44 à 1,80 μm ; (3) 2,01 à 2,44 μm . La largeur des bandes varie en fonction de la gamme spectrale : (1) 12 nm ; (2) 120 nm ; (3) 16 nm. Le choix de bandes spectrales pour les compositions colorées est très varié. BACH et MAUSER (1990) utilise la composition en vraies couleurs : (1) 0,477 μm , (7) 0,551 μm , (18) 0,687 μm . Dans le domaine du visible, WERNER et LEHMANN (1990b) préconisent l'emploi des canaux (17) 0,675 μm , (7) 0,551 μm , (2) 0,489 μm pour la discrimination des unités de végétation relativement sèches (maquis) en Espagne. Pour la classification des sols, ces mêmes auteurs proposent (40) 2,07 μm , (44) 2,14 μm , (48) 2,20 μm ce qui permet de discriminer les sols d'altération des granites des aires sub-affleurantes des coupoles granitiques. KAUFMANN *et al.* (1990) utilisent les bandes complémentaires (1) 0,477 μm , (30) 0,835 μm , (36) 2,01 μm , (48) 2,20 μm et (56) 2,33 μm afin de discriminer, en milieu désertique, le gypse, certaines argiles et les oxydes de fer.

Le développement actuel des spectromètres à haute résolution spectrale conduit à des instruments possédant davantage de bandes que le GERIS : ISM, développé par l'Institut d'Optique de l'Université d'Orsay (128 canaux de 0,75 à plus de 3 μm), HIRIS, prévu pour équiper la plate-forme satellisée EOS-A (192 canaux de 0,400 à 2,45 μm , *e.g.* GOETZ et DAVIS, 1991), AVIRIS (224 canaux de 0,40 à 2,45 μm , *e.g.* CARRERE, 1990 et *sous presse*, BOARDMAN et GOETZ, 1991), ..., avec poursuite de l'étude des spectres de laboratoire obtenus sur des poudres minérales dans les longueurs d'onde du visible à

l'infrarouge thermique (e.g. LANG *et al.*, 1990), dans le prolongement des travaux précurseurs de HUNT et SALISBURY (1970, 1971, 1976) et HUNT *et al.* (1971, 1973a, 1973b).

PRINCIPAUX PICS D'ABSORPTION DES MINERAUX

On utilise classiquement un certain nombre de minéraux que l'on peut retrouver en abondance dans les conditions naturelles d'affleurement. Les maxima d'absorption dans le NIR et le SWIR pour les oxydes de fer, les phyllosilicates et divers minéraux communs, sont :

Tableau 1. *Pics d'absorption des minéraux (NIR-SWIR).*

Alunite	1.77	2.17	2.20	2.317	
Calcite				2.34	
Chlorite			2.26	2.355	
Dolomie				2.30	
Gypse	1.75			2.21	
Kaolinite		2.16	2.21		
Mica-K			2.205	2.30	2.40
Montmorillonite			2.20		
Oxydes de fer	NIR (0,8-1,0)				
Pyrophyllite		2.166		2.314	
Canaux GER	24-31 - - - -	43	48	55	57 61

Dans le domaine de longueur d'ondes considéré (0,4-2,5 μm), et compte tenu de la lithologie des terrains, les bandes d'absorption *a priori* les plus intéressantes sont situées, d'une part, dans le proche infrarouge (oxydes de fer), et, d'autre part, dans le domaine 2,2-2,4 μm . Pour ce dernier domaine, on peut considérer que les minéraux les plus fréquents sont les argiles (2,2-2,22 μm), la dolomie (2,30 μm) et la calcite (2,34 μm). Les maxima d'absorption sont liés à la composition chimique des minéraux (relation longueur d'onde/structure, vibration, rotation des molécules, etc.), permettant ainsi d'identifier les minéraux ou les roches.

On se concentrera par la suite sur les réponses dans le domaine du SWIR.

LE TRAITEMENT DES DONNEES DU GER

On consultera également les spectres en annexes.

Les données numériques ont été traitées sur l'environnement VAX-VMS (*Virtual Memory System*) du Département *Earth Sciences and Planetology* (groupe géologie) du JPL.

Les données GER de la campagne EISAC'89 ont été acquises à l'aide de l'instrument GERIS-II dont les longueurs d'onde (exprimées en nm) et la fonction de correction de radiance sont les suivantes (d'après les informations fournies par GER Corp.):

Tableau 2. Calibration en laboratoire du GERIS-II.

1	442.479980	0,00199	32	-----	-----
2	457.839990	0.00259	33	1560.000000	0.000671
3	473.200000	0.00281	34	1680.000000	0.000842
4	488.560010	0.00266	35	1800.000000	0.000576
5	503.920020	0.00191	36	2005.409961	0.000567
6	519.280029	0.000914	37	2021.629883	0.000531
7	534.640039	0.000890	38	2037.849805	0.000548
8	550.000049	0.000888	39	2054.069727	0.000595
9	565.360059	0.000980	40	2070.289648	0.000594
10	580.720068	0.00114	41	2086.509570	0.000624
11	596.080078	0.00125	42	2102.729492	0.000609
12	611.440088	0.00138	43	2118.949414	0.000635
13	626.800098	0.00162	44	2135.169336	0.000661
14	642.160107	0.00152	45	2151.389258	0.000651
15	657.520117	0.00178	46	2167.609180	0.000709
16	672.880127	0.00180	47	2183.829102	0.000708
17	688.240137	0.00175	48	2200.049023	0.000736
18	703.600146	0.00183	49	2216.268945	0.000755
19	718.960156	0,00206	50	2232.488867	0.000847
20	734.320166	0.00214	51	2248.708789	0.000860
21	749.680176	0.00234	52	2264.928711	0.000837
22	765.040186	0.00238	53	2281.148633	0.000843
23	780.400195	0.00257	54	2297.368555	0.000827
24	795.760205	0.00259	55	2313.588477	0.000862
25	811.120215	0.00259	56	2329.808398	0.000838
26	826.480176	0.00269	57	2346.028320	0.000914
27	841.840137	0.00206	58	2362.248242	0.000968
28	-----	-----	59	2378.468164	0.00102
29	872.560059	0.00278	60	2394.688086	0.00102
30	887.920020	0.00391	61	2410.908008	0.00113
31	903.279980	0.00446	62	2427.127930	0.00119
			63	2443.347852	0.00128

Les valeurs mises à jour par le DLR, après comparaison avec le modèle de transfert radiatif LOWTRAN 7 (LEHMANN, comm. pers., 1992) sont les suivantes :

Tableau 3. Calibration de la campagne EISAC'89.

1	477	0.052909	32	1440	0.00015960
2	489	0.057772	33	1560	0.00077808
3	502	0.057334	34	1680	0.00105200
4	514	0.045767	35	1800	0.00033660
5	526	0.040639	36	2005	0.00047228
6	539	0.038285	37	2022	0.00064694
7	551	0.031494	38	2038	0.00057699
8	564	0.037443	39	2054	0.00052955
9	576	0.038895	40	2070	0.00051621
10	588	0.036057	41	2087	0.00058319
11	601	0.034009	42	2103	0.00055129
12	613	0.035656	43	2119	0.00055079
13	625	0.031781	44	2135	0.00056094
14	638	0.028318	45	2151	0.00052941
15	650	0.028784	46	2168	0.00054960
16	662	0.027170	47	2184	0.00054891
17	675	0.028832	48	2200	0.00055173
18	687	0.028270	49	2216	0.00056507
19	699	0.026066	50	2232	0.00062085
20	712	0.023068	51	2249	0.00061474
21	724	0.025961	52	2265	0.00058543
22	736	0.023228	53	2281	0.00060178
23	749	0.023418	54	2297	0.00055523
24	761	0.023215	55	2314	0.00052493
25	774	0.022158	56	2330	0.00049082
26	786	0.021820	57	2346	0.00059245
27	798	0.015170	58	2362	0.00066600
28	-----	-----	59	2378	0.00064700
29	823	0.015100	60	2395	0.00066300
30	835	0.018540	61	2411	0.00073280
31	848	0.017146	62	2427	0.00079760
			63	2443	0.00075800

LA ZONE D'ETUDE ET LES CIBLES HOMOGENES

On sélectionne la zone (1:511; 730:2259), c'est-à-dire que l'on retient une image de taille : 512 colonnes, 1530 lignes, 63 canaux.

Une composition colorée "standard" est réalisée pour définir des cibles spectralement homogènes, certaines d'entre elles ayant été étalonnées sur le terrain au cours de la mission de juin 1990. On utilise une composition des canaux "16 29 49", prenant en compte une bande du visible (16) 0,662 μm , une bande du proche infrarouge (29) 0,823 μm et une bande du SWIR (49) 2,216 μm .

Les 37 cibles sont des imagerie (3x3), sauf spécification contraire.

Tableau 4. Cibles homogènes (coordonnées et nature).

1	22	57		cœur du synclinal (a)
2	37	33		cœur du synclinal (b)
3	184	98		première auréole (carbonates) (a)
4	226	209		deuxième auréole (calcaires) (a)
5	314	292		forêt sur marnes liasiques (a)
6	606	414		ville de Bessèges (toits)
7	508	357		Est de Bessèges (a)
8	716	194		reboisement sur Houiller stérile
9	884	127		stériles d'une mine Sb-As (a)
10	838	263		forêt sur leptynites (a)
11	76	52		cœur du synclinal (c)
12	141	176		première auréole (carbonates) (b)
13	150	118		première auréole (carbonates) (c)
14	97	151		première auréole (carbonates) (d)
15	48	280		deuxième auréole (calcaires) (b)
16	284	169		deuxième auréole (calcaires) (c)
17	116	237		deuxième auréole (calcaires) (d)
18	102	357		forêt sur marnes liasiques (b)
19	385	279		forêt sur marnes liasiques (c)
20	361	279		forêt sur marnes liasiques (d)
21	454	437		confluence ru de Gagnières/Cèze
22	648	419		Bessèges : Cèze rive droite
23	522	297		Est de Bessèges (b)
24	516	254		Est de Bessèges (c)
25	694	368		terrain en terre battue
26	734	411		Est de Bessèges (d)
27	872	121	10x10	stériles d'une mine Sb-As (b)
28	859	43		forêt sur leptynites (b)
29	893	210		forêt sur leptynites (c), à l'ombre
30	1165	207		forêt sur leptynites (d)
31 à 34 transect				
31	1198	50		forêt sur leptynites (e)
32	1196	100		forêt sur leptynites (f)
33	1188	140		forêt sur leptynites (g)
34	1157	143		forêt sur leptynites (h)
35	1082	400		terrain labouré au sud du lac
36	1067	304	1x1	barrage de Sénéchas
37	1079	320		surface d'eau du lac de Sénéchas

CALIBRATION DES ENREGISTREMENTS NUMERIQUES

On a appliqué aux données brutes la fonction de correction de radiance définie au tableau 3.

Les données calibrées montrent que le signal est #35 fois plus fort (en valeur absolue) dans le visible qu'il ne l'est dans le SWIR.

On pourra comparer (annexes, 1) le spectre des données brutes et celui des données calibrées pour la cible 27 (stériles de mine).

PROCEDURES DE CORRECTION ATMOSPHERIQUE

Trois méthodes - dépendantes ou indépendante de la scène - peuvent être utilisées pour corriger les enregistrements numériques. Il s'agit de la correction par champ plat (*flat field*), par logarithmes résiduels ou par modèle de transfert radiatif. "Flat field" et "log-résiduels" sont dépendantes de la scène (c'est-à-dire que les résultats obtenus ne sont valables que pour la scène étudiée et ne peuvent être appliqués à d'autres données) parce qu'elles utilisent des informations extraites de la scène étudiée proprement dite (zone de référence) pour la correction. L'approche par modèle de transfert radiatif est indépendante car elle se base sur la modélisation des conditions atmosphériques et de réflectance au moment de l'acquisition des données, indépendamment des performances de l'instrument qui a acquis les données par exemple.

Méthodes dépendantes de la scène.

Correction par champ plat : Cette technique ne nécessite pas de traiter des données calibrées en radiance. Elle prend en considération une zone de l'image qui est spectralement plate et homogène ; on divise la scène entière par le spectre moyen de l'imagerie. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne compense pas de l'écart de radiance qui peut être induit par une dérive de certains objets dans les longueurs d'onde du visible. Un autre problème potentiel est la différence d'altitude entre la cible de référence et le reste de la scène, ce qui provoque une variation des paramètres atmosphériques et, par conséquent, une sous- ou une sur-compensation partielle de l'absorption atmosphérique.

Les logarithmes résiduels : Cette technique ne nécessite pas non plus de traiter des données calibrées en radiance (GREEN et CRAIG, 1985). Elle est très semblable à la précédente mais s'opère cette fois dans un espace logarithmique. Elle a été appliquée sur la fenêtre de Bessèges en utilisant, pour la gamme spectrale 2,0-2,4 μm , des sous-zones à couverts végétaux homogènes (forêt) ; une démarche semblable a été effectuée, entre autres, par CARRERE (*sous presse*) pour corriger des secteurs d'altérations minérales à partir des caractéristiques de zones *a priori* non altérées. On conserve les principaux maxima d'absorption liés aux minéraux d'altération, puisque le principe des logarithmes résiduels est de comparer chaque pixel au spectre moyen. Cette technique possède les mêmes inconvénients que la précédente ; de plus, elle est dépendante du choix de la zone de référence puisque des pics d'absorption liés aux minéraux présents dans tous les échantillonnages seront éliminés au cours du traitement de correction.

Méthode indépendante de la scène.

LOWTRAN et MODTRAN sont des modèles de transfert radiatif développés par l'aviation militaire américaine pour, entre autres, guider des missiles ; ils servent à prédire la radiance à l'instrument considéré pour des conditions atmosphériques et de surface prédéfinies.

On sait que:

$\text{Radiance} = L_{\text{path}} + L_s t_u t_d r + \dots$ (1)

émissivité, négligeable dans cette partie du spectre.

L_{path} : luminance atmosphérique

L_s : irradiance solaire

t_u, t_d : énergie reçue et réfléchi

r : réflectance

L_{path} est supposé constant sur toute la scène, c'est-à-dire que les aérosols sont les mêmes et également répartis sur l'ensemble de l'image.

Il faut donc déterminer L_{path} et $L_s t_u t_d$ (appelé x) pour pouvoir extraire r des données en radiance.

Pour ce faire, on utilise un modèle de transfert radiatif (ici LOWTRAN 7) qui permet de prédire la radiance observée au capteur en fonction de paramètres correspondant aux conditions atmosphériques observées (ou estimées) au moment de l'acquisition des données et une réflectance de la surface prédéfinie par l'utilisateur :

(1) $r=0$ pour définir L_{path} ; le second terme de l'équation (1) s'annule pour $r=0$ et on a donc $\text{Radiance} = L_{\text{path}}$.

(2) $r=0.25$ (ou n'importe quelle autre valeur connue) pour déterminer x :

$$x = [\text{Radiance} - L_{\text{path}}(r=0)]/0.25$$
 (2)

On peut ensuite corriger les données du capteur:

$$\text{Radiance}_{\text{GER}} = L_{\text{path}}(r=0) + xr$$
 (3)

$$\text{D'où } r = (\text{Radiance}_{\text{GER}} - L_{\text{path}}) / x$$
 (4)

$$\text{ou } r = (1/x)\text{Radiance}_{\text{GER}} - (L_{\text{path}}/x)$$
 (5)

et on est ramené à un problème de "gain et offset" à appliquer à l'ensemble des données pour obtenir des données en réflectance:

$$r = A * \text{Radiance}_{\text{GER}} + B$$
 (6) avec $A = 1/x$ et $B = -L_{\text{path}}/x$

Avec les données AVIRIS, la vapeur d'eau atmosphérique peut être quantifiée en utilisant la technique du *Continuum Interpolated Band Ratio* (CIBR) (CONEL *et al.*, 1988; CONEL *et al.*, 1989 ; GREEN *et al.*, 1989 ; CONEL *et al.*, 1990 ; CARRERE *et al.*

1990). Cette technique permet d'évaluer la teneur en eau à partir de la bande d'absorption à 940 nm (ou à 1130 nm), ces deux bandes n'étant pas disponibles avec le GERIS. La "profondeur" d'absorption est alors convertie en quantité d'eau libre par l'intermédiaire d'une courbe de calibration obtenue en faisant tourner le programme LOWTRAN 7 pour différentes configurations de vol. Pour être tout à fait rigoureuse, cette technique requiert une bonne connaissance des paramètres atmosphériques au moment de l'enregistrement, ainsi qu'une parfaite calibration de l'instrument (ce qui n'est pas le cas ici). Les effets dus tant à la pente et à l'orientation qu'à l'altitude sont à prendre en compte, et chaque pixel doit être corrigé séparément.

Les paramètres de l'acquisition GER.

Nous avons ainsi défini les conditions standard d'acquisition des données GER sur les Cévennes en tenant compte de :

- le jour de l'année (165e) ;
- la latitude moyenne, soit 44 degrés 21 minutes (44,35) ;
- la longitude moyenne, soit 4 degrés 5 minutes (4,08) ;
- la visibilité moyenne, 23 km, compte tenu du fait que l'on n'a pas de données climatologiques spécifiques à l'acquisition ;
- une valeur moyenne de réflectance fixée à 25 % (constante).

CORRECTION PAR LOG. RESIDUELS

Il y a peu de surfaces plates et spectralement homogènes sur le secteur de Bessèges. En fait, parmi les 37 cibles (*cf supra*) seul le lac de Sénéchas (cible 37, surface d'eau) possède une topographie idéale et correspond à un objet monospécifique assez bien défini. Nous l'avons utilisé dans un premier temps pour effectuer une correction de *flat field*. Mais il s'est avéré difficile d'interpréter les spectres résultants en raison d'une augmentation du "bruit" dans les données dues au fait que l'eau est une surface non réfléchissante dans le visible-proche infrarouge (noire), diminuant le rapport "signal/bruit" de l'instrument.

Une zone spectralement homogène a été sélectionnée dans les zones de végétation dense et assez homogène en utilisant un indice de végétation. Ce dernier utilise le rapport normalisé des canaux (23) 0,780 μm et (16) 0,662 μm : $IV = \frac{23-16}{23+16}$, qui permet de mettre en valeur le contraste rouge/proche infrarouge typique de la végétation. A partir du nouveau fichier ainsi conçu, nous avons retenu la zone (304:319; 288:304), très homogène, dans un secteur de forêts de feuillus sur marnes.

A partir de ces zones de référence, nous avons effectué, pour le domaine de 2,0 à 2,4 μm , une correction de type "logarithmes résiduels". L'utilisation de la cible "spéciale" (#5) correspondant à une zone à végétation dense comme zone de référence pour la correction atmosphérique par log-résiduels permet d'atténuer et même d'éliminer la réponse spectrale de la végétation sur l'ensemble de l'image, mettant ainsi mieux en valeur les réponses spectrales dues aux minéraux/roches qui nous intéressent.

LES MAXIMA D'ABSORPTION

L'étape suivante consiste à identifier et cartographier les minéraux/roches qui nous intéressent en se basant sur leurs caractéristiques spectrales, donc sur la position des bandes d'absorption qui leur sont propres. Pour ce faire, nous avons créé, à partir des données corrigées des effets atmosphériques, une image où la valeur de chaque pixel correspond à la longueur d'onde du maximum d'absorption (recherche de minimum spectral). Les données ont également été corrigées au préalable des effets de la "courbe solaire" (l'énergie solaire décroît régulièrement au fur et à mesure que l'on se déplace vers des longueurs d'ondes plus longues). Ceci a été effectué par la méthode dite des "hull quotients" (GREEN et CRAIG, 1985). Pour chaque pixel de l'image, une courbe ou enveloppe spectrale est calculée en reliant entre eux les points les plus hauts. Cette "enveloppe" est ensuite divisée par le spectre qui lui correspond ce qui a pour effet d'annuler la courbure naturelle du spectre et d'accentuer les bandes d'absorption. Les minima détectés lors de l'étape suivante sont donc des absorptions réelles, significatives, et non simplement des effets dus à la diminution de l'énergie solaire (on aurait alors un minimum systématique vers 2.5mm pour la partie du spectre étudiée). Un simple codage par couleur permet ensuite d'obtenir la distribution spatiale d'une absorption particulière.

On code l'image suivant une palette de pseudocouleurs choisies en fonction des maxima d'absorption connus pour les principaux minéraux. On applique un filtre de type *median'filter* avec une fenêtre de taille 3 x 3, ce qui permet de supprimer la plupart des pixels isolés non significatifs.

L'image résultante montre que seules les aires à argiles (stériles d'exploitations minières, terres labourées, surfaces urbaines, auréoles carbonatées altérées du Causse de Berrias, etc.) peuvent être caractérisées dans le domaine du 2,20-2,22 μm . L'auréole carbonatée interne du Causse de Berrias semble traduite par des réponses dominantes vers 2,30-2,34 μm , significatives des carbonates.

On définit 13 nouvelles zones sur l'image des maxima d'absorption. Elles sont regroupées en 4 groupes de pseudocouleurs.

Rappel : Par défaut, les fenêtres ont une taille de 3x3 pixels.

Groupe 1 (carbonates)

38	764	292		2,377 μm
39	1110	226		2,345 μm
40	1064	434		2,377 μm

Groupe 2 (argiles)

41	1194	47	2x2	2,053 μm
42	1377	13	2x2	2,281 μm
43	1073	308		2,135 μm

Groupe 3 (carbonates/argiles + végétation)

44	1100	135		2,297 μm
45	366	192		2,281 μm
46	567	92		2,263 μm

Groupe 4 (argiles/carbonates + végétation)

47	601	145	4x4	2,199 μm
48	579	413	5x5	2,215 μm
49	870	122	10x10	2,215 μm
50	1231	296		2,215 μm

Les bandes d'absorption maximale des 37 cibles sont les suivantes :

On voit se dessiner plusieurs types de réponses dominantes dans le SWIR :

- (1) Des réponses liées à la présence de minéraux argileux : cibles 9-27 (stériles), cible 8 (reboisements lâches sur stériles du Houiller), cibles 1-2 (cœur du synclinal de Berrias, dépôts marneux), cible 6 (toits de tuile de Bessèges), ...
- (2) Des réponses liées à la présence de carbonates : cible 13 (carbonates), plus ponctuelles à l'intérieur d'une plage de même nature lithologique (non-répétitivité pour les cibles 4-15), ...
- (3) Des réponses hétérogènes dans les zones de couverts végétaux : (cibles 28 à 34) ... L'étagement de 2,21 à 2,35 μm correspond à des pics d'absorption de diverses substances contenues dans les végétaux : amidon (2,25, 2,27, 2,28, 2,32 μm), cellulose (2,27, 2,28, 2,34 μm), ...

Dans le détail, les unités de végétation peuvent être approchées par l'étude du pic d'absorption chlorophyllienne (*red edge*). L'amplitude de ce dernier dépend étroitement de la nature des espèces dominantes. Le châtaignier (*Castanea sativa*) fournit par exemple une réponse plus forte que le chêne vert (*Quercus ilex*). La garrigue (Causse de Berrias) présente une association de végétaux sclérophylles (buis, arbousier, chêne vert, etc.) dont la réponse globale est cependant éloignée de celle du chêne vert seul. On ne fournit pas de données qualitatives relatives aux résineux ; en effet, même si ces résineux couvrent parfois des surfaces importantes, les introductions et les mélanges d'essences rendent délicate toute interprétation fiable des données de spectro-radiométrie.

LA RESOLUTION SPECTRALE DU GERIS

Dans le domaine SWIR (3^e spectromètre de 2,005 à 2,443 μm), l'instrument GERIS possède une résolution spectrale théorique de 16 nm. En fait, la visualisation d'un certain nombre de spectres a rapidement montré que la résolution spectrale réelle devait être nettement moins bonne, puisque certains pics d'absorption atmosphérique n'étaient pas toujours retrouvés.

Sur une cible homogène et bien individualisée (cible 27, stériles de mine), nous avons extrait le spectre calibré en radiance, puis comparé l'allure générale du spectre moyen aux spectres simulés par LOWTRAN 7 dans des conditions standard définies plus haut (dans la gamme SWIR du GER), en ne faisant varier que la largeur de bande originale de 16nm puis, 20 à 50 nm, avec pas de 5 nm (*cf spectres en annexes*).

On remarque que l'allure des bandes d'absorption atmosphérique dues au CO₂ observables dans les données GER concordent mieux avec les simulations LOWTRAN

ayant une résolution spectrale entre 35 et 40 nm, prouvant ainsi que la résolution réelle des données était plus proche de 35, 40nm que de 16 au cours de cette mission. Par contre, le centrage des bandes semble correct, ce qui a été confirmé ultérieurement par Fr.LEHMANN du DLR (variation maximale de l'ordre de 0,01 nm). Sur le premier groupe de capteurs (domaine du visible et proche-infrarouge), cette variation atteint 0,8 nm en valeur absolue, dans le canal 3, et 1,1 nm sur le premier capteur.

CONCLUSION

Le GERIS est l'un des premiers spectro-radiomètres imageurs opérationnels, utilisé de façon expérimentale en 1989 au cours de la campagne EISAC. La qualité du capteur (calibration, notamment) a été améliorée depuis cette première mission. Nous avons du reste, pour la campagne 1991, acquis une portion d'axe commune avec le JRC d'Ispra (J.HILL) sur la bordure ardéchoise.

Sur le site des Cévennes, l'objectif était d'identifier, parmi la réponse de 63 canaux du visible au SWIR, des critères susceptibles d'orienter la reconnaissance des unités lithologiques. Le site-test, comprenant un secteur peu affleurant (Causse de Berrias) et un secteur non affleurant (roches métamorphiques sous couvert forestier), a été choisi pour évaluer l'intérêt de ce type de données en appui à la reconnaissance géologique d'une zone tempérée. Cette étude s'inscrit dans la préparation de la plate-forme orbitale d'observation de la Terre prévue pour le début du troisième millénaire.

Les résultats montrent que, compte tenu de la résolution spectrale réelle des données (#40 nm au lieu de 16 nm entre 2 et 2,5 μm), seules les aires où se concentrent des phyllosilicates peuvent être individualisées, comme au niveau des stériles d'exploitation minière, dans certains terrains marno-calcaires du Causse de Berrias, ou bien encore dans les zones d'agglomération (toits en tuile et voirie). On obtient ainsi quelques spectres caractéristiques, non pas du substrat, mais de l'altération de celui-ci. Les données de type AVIRIS, à résolution spectrale de l'ordre de 10 nm, permettent des distinctions beaucoup plus fines ; l'instrument a cependant été évalué sur des zones très favorables à l'exploration minérale (terrains affleurants en zone sub-désertique). En plus de la couverture continue du visible au SWIR, il convient donc de disposer d'une résolution spectrale très bonne ; les données ISM à 20-50 nm en cours d'évaluation par différents laboratoires (Université d'Orsay, Observatoire Midi-Pyrénées, etc.) fourniront des informations sur des résolutions intermédiaires.

Au total, cette recherche en partenariat industriel avec le DLR conclue par une mission d'étude au JPL aura permis :

- (1) la participation du BRGM au programme EISAC'89 en collaboration avec le laboratoire d'Opto-Electronique du DLR, maître d'œuvre de la partie *traitement préliminaire du signal de l'instrument GERIS*.
- (2) *l'analyse et l'interprétation en termes géologiques*, sur des cibles métropolitaines (Cévennes), de données à haute résolution spectrale, dans l'attente d'autres données de même nature telles qu'ISM (ATP-CNRS), AVIRIS ou GERIS de la campagne 1991 sur la bordure sud-orientale du Massif central français.
- (3) le *traitement numérique* des données aéroportées (lecture, compréhension du format d'enregistrement, etc.), et l'évaluation de la résolution spectrale réelle du capteur (40 nm au lieu de 16 nm). Les résultats les plus significatifs seront publiés dans une revue à comité de lecture.
- (4) la mise en œuvre de *procédures de corrections radiométriques* (calibration et corrections atmosphériques) et l'*évaluation des caractéristiques technologiques* de l'instrument GERIS.
- (5) une collaboration effective avec le Département *Earth Sciences and Planetology* du Jet Propulsion Laboratory, organisme travaillant dans le domaine du traitement d'images pour la NASA.

* * *

BIBLIOGRAPHIE

BACH H. et MAUSER P. (1990). The application of imaging-spectrometry data in agricultural and hydrology. The EISAC'89 campaign in the Freiburg test-site. *Proc. 10th Earsel Symp., Toulouse*, juin 1990, p.99.

BOARDMAN J.W. et GOETZ A.F.H. (1991). Sedimentary facies analysis using AVIRIS data: a geophysical inverse problem. Proc. of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop, 20-21 mai 1991, *JPL Publication*, 28, p.4-13.

BODECHTEL J. et SOMMER S. (1990). The European imaging spectroscopy airborne campaign - EISAC first results and outlook on future European activities in the field of imaging spectrometry. *Fifth Australasian Remote Sensing Conference*, Perth (Australie), 8-12 octobre 1990, volume des Actes, I, p.155-163.

CARRERE V. (1990). Mineral identification and hydrothermal alteration mapping using airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) data. Examples from the Goldfield mining district, Nevada. *Fifth Australasian Remote Sensing Conference*, Perth (Australie), 8-12 octobre 1990, volume des Actes, I, p.135-145.

CARRERE V. (1991). Use of high spectral resolution airborne visible/infrared imaging spectrometer data for geologic mapping: an overview. *5th International Colloquium - Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, France, 14-18 janvier 1991, ESA-SP, 319, mai 1991, p.137-143.

CARRERE V. (sous presse). Use of high spectral resolution airborne visible/infrared imaging spectrometer data for geologic mapping: an overview. *Remote Sensing of Environment*, (note acceptée pour publication).

CARRERE V. et CHADWICK O.A. (1990). An AVIRIS survey of Quaternary surfaces formed on carbonate-provenance alluvium, Mojave Desert, Southern Nevada. Proc. of the Airborne Geoscience Workshop, juin 1990. *JPL Publication*, 54, p.82-93.

CARRERE V., CONEL J.E., GREEN R., BRUEGGE C., MARGOLIS J. et ALLEY R. (1990). Analysis of atmospheric water vapor maps from AVIRIS at Salton Sea, California: Part I, Experiment, Methods, Error Budgets, and Results. Proc. of the Airborne Geoscience Workshop, juin 1990, *JPL Publication*, 54, p.107-128.

CONEL J.E., GREEN R.O., CARRERE V., MARGOLIS J., ALLEY R.E., VANE G., BRUEGGE C.J. et GARY B.L. (1988). Atmospheric water mapping with the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), Mountain Pass, California. Proc. of the AVIRIS Performance Evaluation Workshop. *JPL Publication*, 38, p.21-26.

CONEL J.E. et al. (1989). Spectrometric measurement of atmospheric water vapor and schemes for determination of evaporation from land and water surfaces using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *IGARSS'89*, 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, IEEE#89CH2768-0, p.2658-2663.

CONEL J.E. et al. (1990). Atmospheric water vapor: recovery, validation, and interpretation of measurements obtained with the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). *IGARSS'90*, Greenbelt, IEEE#90CH2825-8, p.829-830.

CROWLEY J.K., VANER G., SOLOMON J.E. et ROCK B.N. (1985). Airborne imaging spectrometer data of the Ruby Mountains, Montana: Mineral discrimination using relative absorption band-depth images. *Remote Sensing of Environment*, 29, p.121-134.

DEROIN J.-P. (1990). Méthodologie d'utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale en zone tempérée. Apport à la connaissance géomorphologique, géologique et minérale des Cévennes et du Bas-Languedoc méditerranéen (Sud de la France). Thèse de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris 6). *Mémoire des Sciences de la Terre de l'Université Curie*, 19, 293 p.

DEROIN J.-P., BECQ-GIRAUDON J.-Fr. et PROST A.E. (1990). Fracturation tardi-hercynienne et détritisme associé : chronologie des événements dans les massifs granitiques cévenols décrochés par la faille de Villefort (Mont Lozère et Borne, Massif central, France). *C. R. Acad. Sci., Paris*, 311, série II, p.865-871.

DEROIN J.-P., CHOROWICZ J. et CURNELLE R. (1992). Utilisation de l'imagerie Spot en géologie régionale. Contribution à l'analyse de la tectonique post-hercynienne du bas-Languedoc méditerranéen (Sud de la France). *C. R. Acad. Sci., Paris*, 314, série II, p.511-517.

DEROIN J.-P. et DEROIN Th. (1990). Effet d'une déficience en manganèse des sols sur la réponse spectrale des feuilles de hêtres (*Fagus sylvatica L.*). *C. R. Acad. Sci., Paris*, 311, série II, p.605-611.

DEROIN J.-P. et SCANVIC J.-Y. (1990). Recherche en partenariat industriel entre le DLR et le BRGM. Première expérimentation en France du GERIS à des fins géologiques. *Rapport BRGM*, 31932, décembre 1990, 15 p.

GOETZ A.F.H. et DAVIS C.O. (1991). High resolution imaging spectrometer (HIRIS): Science and instrument. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, vol.3, p.131-143, John Wiley & Sons, Inc.

GOETZ A.F.H., VANE G., SOLOMON J.E. et ROCK B.N. (1985). Imaging spectrometry for Earth remote sensing. *Science*, 228, p.1147-1153.

GREEN A.A et CRAIG M.D (1985). Analysis of aircraft data with logarithmic residuals. Proc. of the Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop, 8-10 avril. *JPL Publication*, 41, p.111-119.

HILL J. et KOHL H. (1990). GER-63 Band airborne scanner data from the 1989 European imaging spectroscopy aircraft campaign (EISAC'89). Quality analysis and first results. *Proc. 10th Earsel Symp.*, Toulouse, juin 1990, p.103-104.

- HUNT G.R. et SALISBURY J.W. (1970).** Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals: *Modern Geology*, 1, p.283-300.
- HUNT G.R. et SALISBURY J.W. (1971).** Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Carbonates: *Modern Geology*, 2, p.23-30.
- HUNT G.R. et SALISBURY J.W. (1976).** Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: XI. Sedimentary rocks: *Modern Geology*, 5, p.211-217.
- HUNT G.R., SALISBURY J.W. et LENHOFF C.J. (1971).** Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: IV. Sulphides and sulphates: *Modern Geology*, 3, p.1-14.
- HUNT G.R., SALISBURY J.W. et LENHOFF C.J. (1973a).** Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: VI. Additional silicates: *Modern Geology*, 4, p.85-106.
- HUNT G.R., SALISBURY J.W. et LENHOFF C.J. (1973b).** Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: VII. Acidic igneous rocks: *Modern Geology*, 4, p.217-224.
- KAUFMANN H. et RONEN S. (1990).** Processing and evaluation of GER-data acquired from Makhtesh Ramon-Negev Highlands (Israel). *Proc. 10th Earsel Symp.*, Toulouse, juin 1990, p.105.
- KAUFMANN H., WEISBRICH W., BEYTH M., BARTOV Y. et MAZOR E. (1990).** Processing and evaluation of airborne GER-II data acquired from Makhtesh Ramon/Negev, Israel. *Fifth Australasian Remote Sensing Conference*, Perth (Australie), 8-12 octobre 1990, volume des Actes, I, p.164-174.
- KRUSE F.A., KIEREIN-YOUNG K.S. et BOARDMAN J.W. (1990).** Mineral mapping at Cuprite, Nevada, with a 63-channel imaging spectrometer. *Photogramm. Engineer. & Remote Sensing*, 56, 1, p.83-92.
- LANG H.R., BARTHOLOMEW M.J., GROVE C.I. et PAYLOR E.D. (1990).** Spectral reflectance characterization (0.4 to 2.5 and 8.0 to 12.0 μm) of Phanerozoic strata, Wind River Basin and Southern Bighorn Basin areas, Wyoming. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60, 4, juillet, p.504-524.
- LEHMANN F., MACKIN S., RICHTER R., ROTHFUß H. et WALBRODT A. (1989a).** The European imaging spectrometry campaign 1989 (EISAC). Preprocessing, processing and data evaluation of the GER airborne imaging spectrometer data. *Progress Report to the European Community*, JRC (Ispra) et DLR (Oberpfaffenhofen).
- LEHMANN F., MACKIN S., RICHTER R., ROTHFUß H. et WALBRODT A. (1989b).** First results of the European imaging spectrometry campaign in May/June 1989 GER spectrometer data. *Proc. 9th Earsel Symp.*, Espoo, 27 juin-1er juillet 1989, p.459-465.
- LEHMANN F., ROTHFUß H. et WALBRODT A. (1990).** Evaluation of GER airborne scanner data for environmental applications. *Proc. 10th Earsel Symp.*, Toulouse, juin 1990, p.92.

LEHMANN F., ROTHFUß H. et WERNER K. (1991). Imaging spectroscopy data used for geological and environmental analysis in Europe. Proc. of the Third Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Workshop. *JPL Publication*, 28, p.62-71.

PETERSSON L.H., JOHANESSEN O.M., SORENSEN K. et FRETTE O. (1990). Airborne Imaging Spectrometry for Mapping of the Chlorophyll-a distribution and pollution in the Skagerrak Region. *Proc. 10th Earsel Symp., Toulouse*, juin 1990, p.106.

VAN DEN BOSCH J. et ALLEY R.E. (1990). Application of LOWTRAN 7 as an atmospheric correction to Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) data. *IGARSS'90, IEEE#89CH2768-0, Greenbelt*, p.175-178.

VANE G. et GOETZ A.F.H. (1988). Terrestrial imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment*, numéro spécial "Imaging Spectrometry", 24, p.1-29.

WERNER K. et LEHMANN F. (1990a). EISAC 1989. Field spectrometry campaign in the Almaden testsite (Spain). *Report to the European Community, JRC (Ispra) et DLR (Oberpfaffenhofen)*.

WERNER K. et LEHMANN F. (1990b). EISAC'89. Evaluation of GER airborne scanner data in the Almaden testsite (Spain). *Proc. 10th Earsel Symp., Toulouse*, juin 1990, poster.

A N N E X E S

Spectres des données du GERIS

(disponible à SGN/TED)

1.Données brutes/données calibrées (cible 27)

2-38.Cibles calibrées en radiance

39-75.Cibles calibrées, corrigées LR

76-83.Estimation de la largeur de bande (16-50 nm)

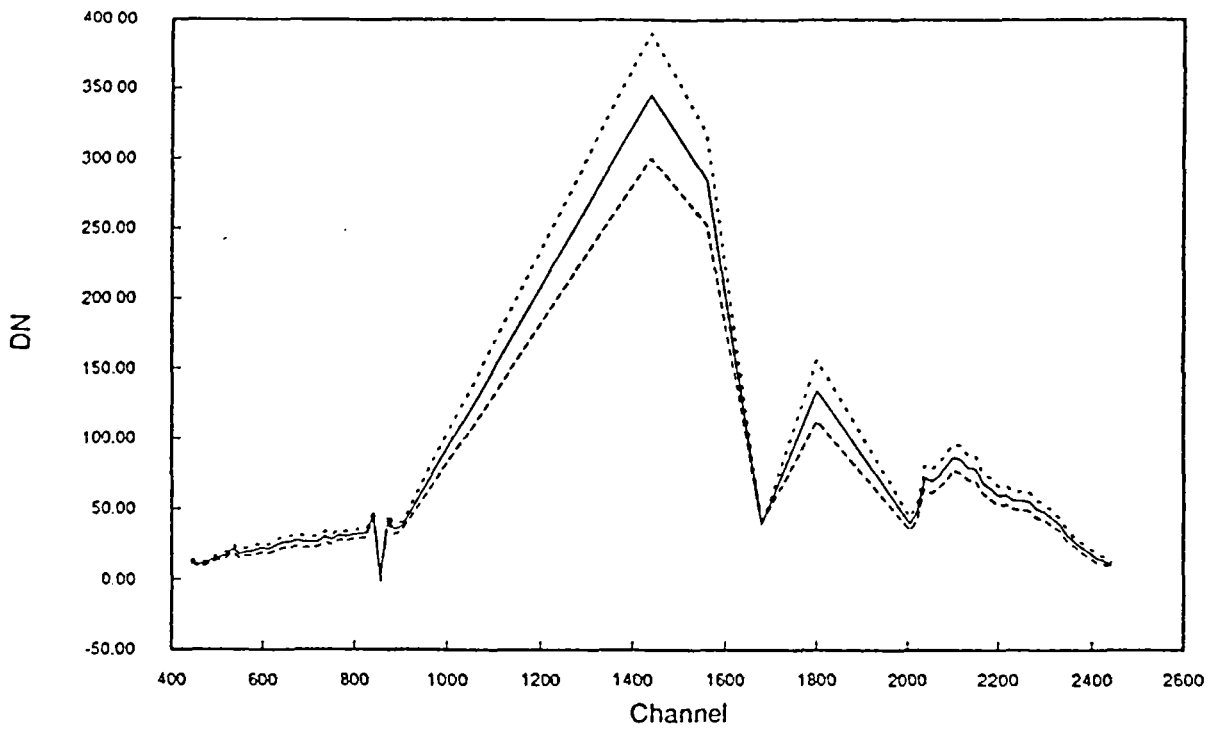
84-91.Ecart spectre réel/LOWTRAN (16-50nm)

92-93.Filtres utilisés pour 16 et 35 nm

94-130.Cibles calibrées, corrigées LOWTRAN

131-167.Cibles LOWTRAN, *hull quotient*

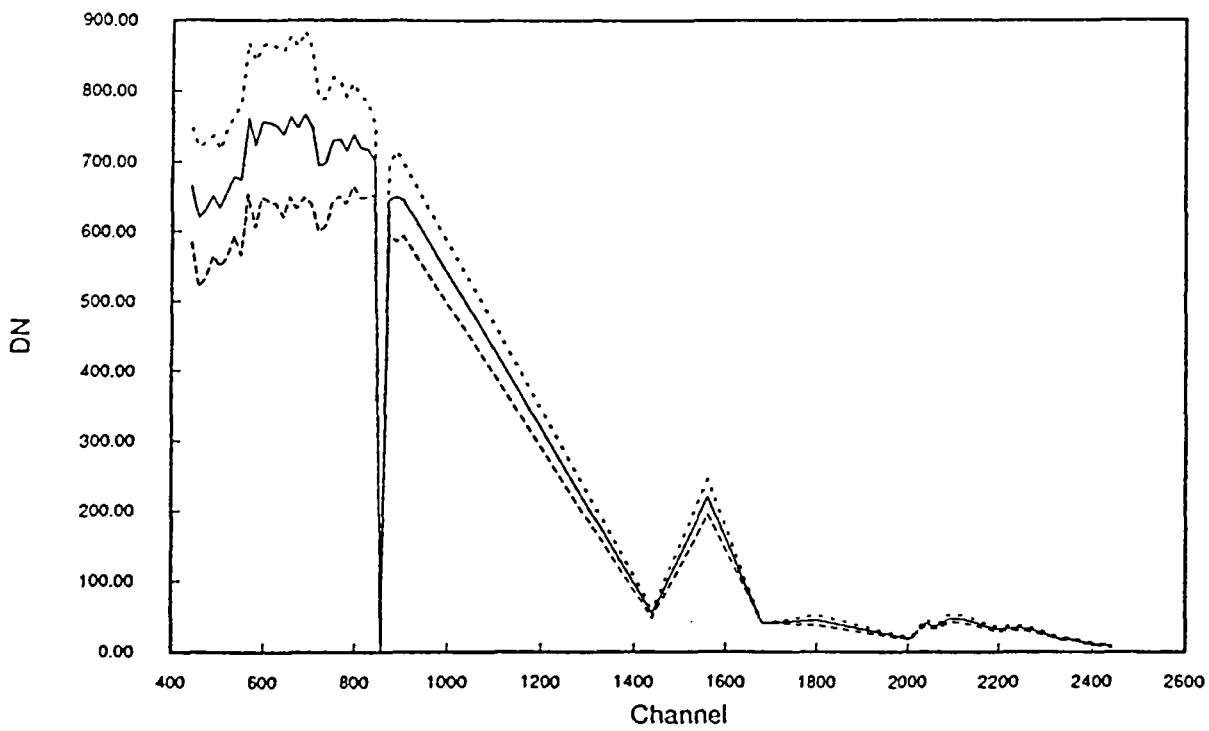
Pour des raisons d'encombrement, seuls sont présentés quelques profils significatifs. A titre d'illustrations, nous présentons ici la comparaison données brutes/données calibrées en radiance sur l'exemple du stérile de mine Sb (n°27) ; les spectres calibrés, corrigés en log. résiduels, en lowtran et sous la forme hull quotient sont donnés sur 3 exemples : la cible mine à antimoine (n°9), une forêt de feuillus sur grès (n°20) et une surface d'eau (n°37). On donne aussi l'estimation de la largeur de bande de 16 à 50 nm (7 profils).



FILE NAME = ger.raw

(872, 121, 10, 10)

Tue Feb 4 09:33:04 1992

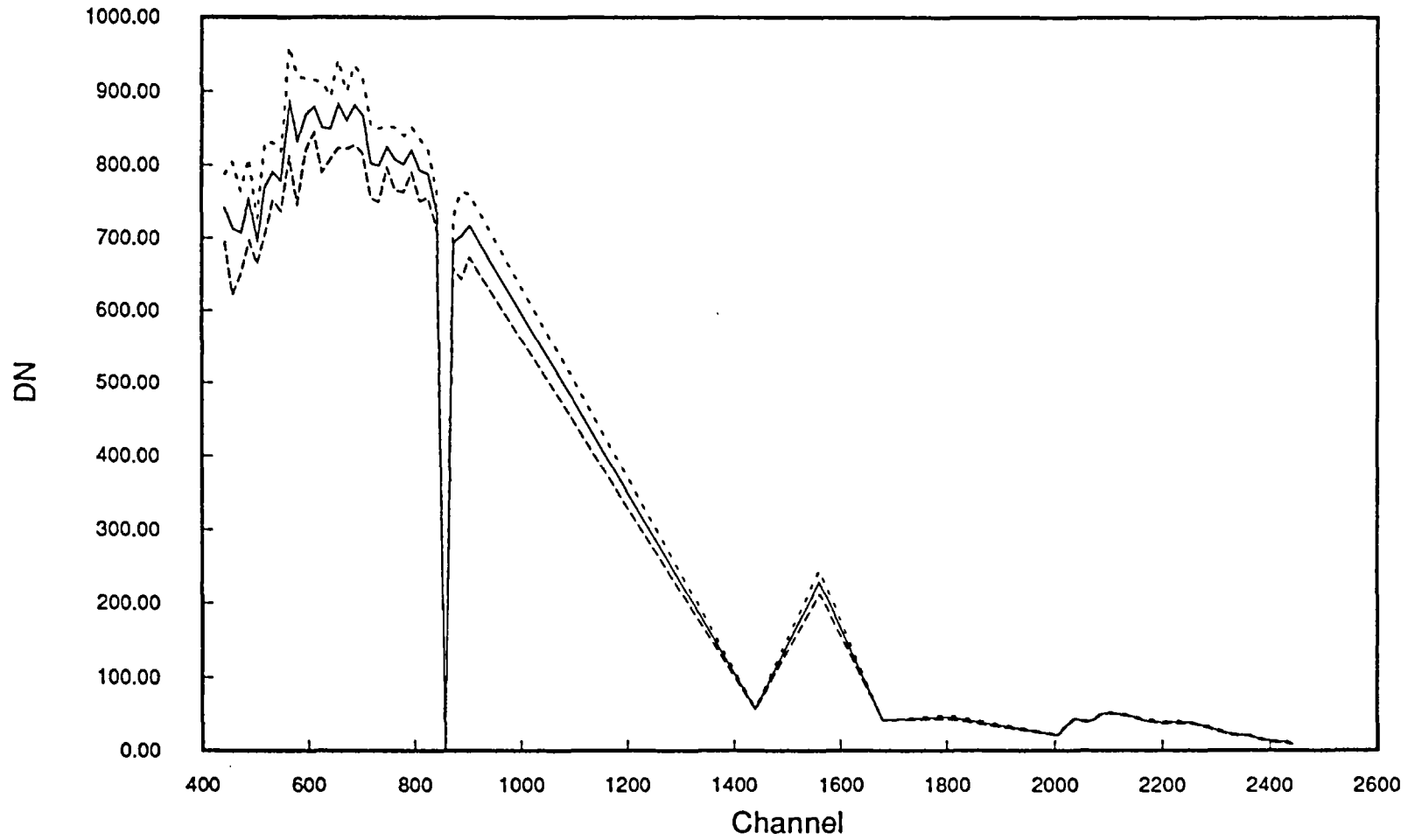


FILE NAME = reo:ger.clb

(872, 121, 10, 10)

Tue Feb 4 15:50:32 1992

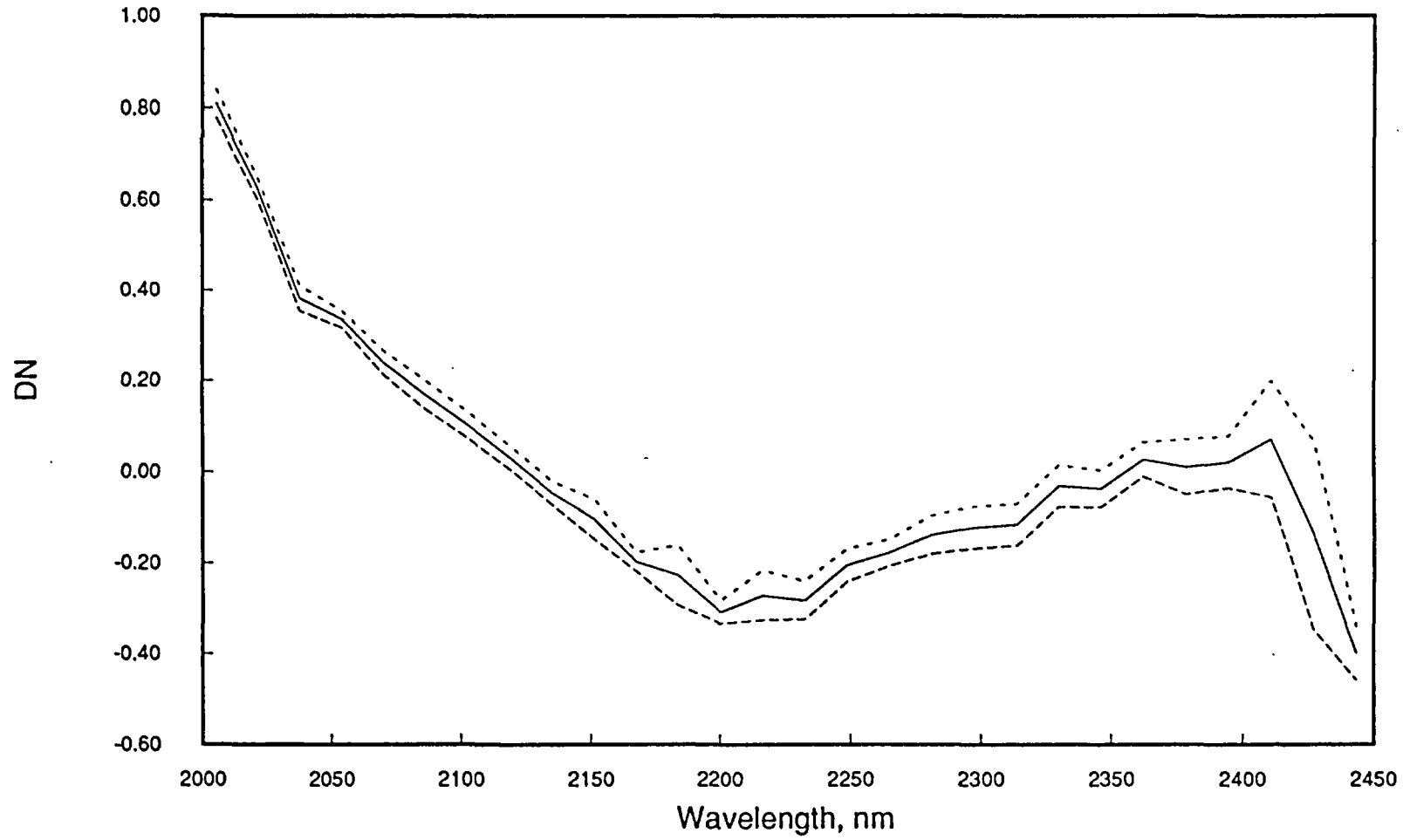
site 9



FILE NAME = reo:ger.clb

(883, 126, 3, 3)

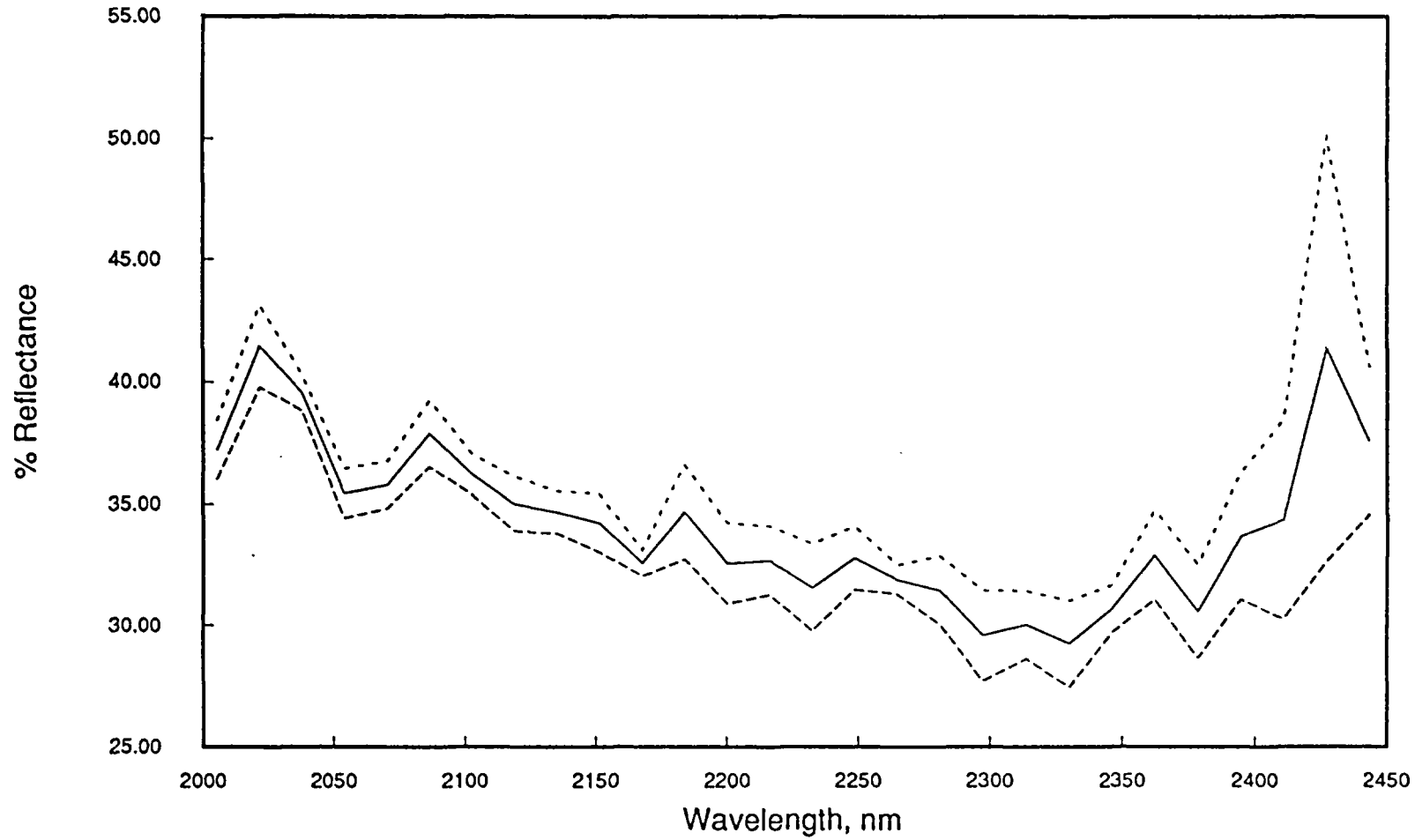
site 9, lr



FILE NAME = ger.swirlr

(.883, 126, 3, 3)

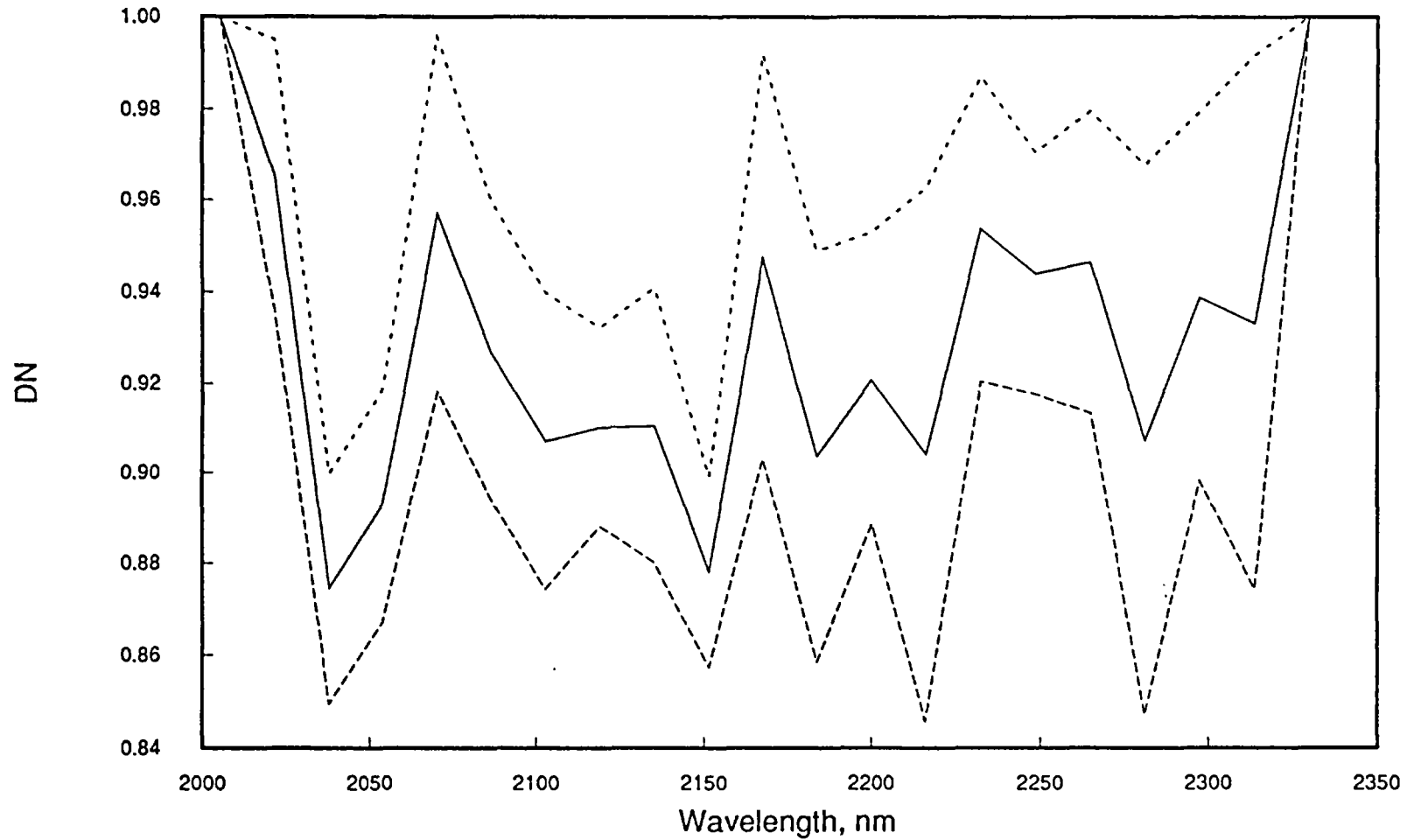
site 9, lowtran



FILE NAME = ger.swirref

(883, 126, 3, 3)

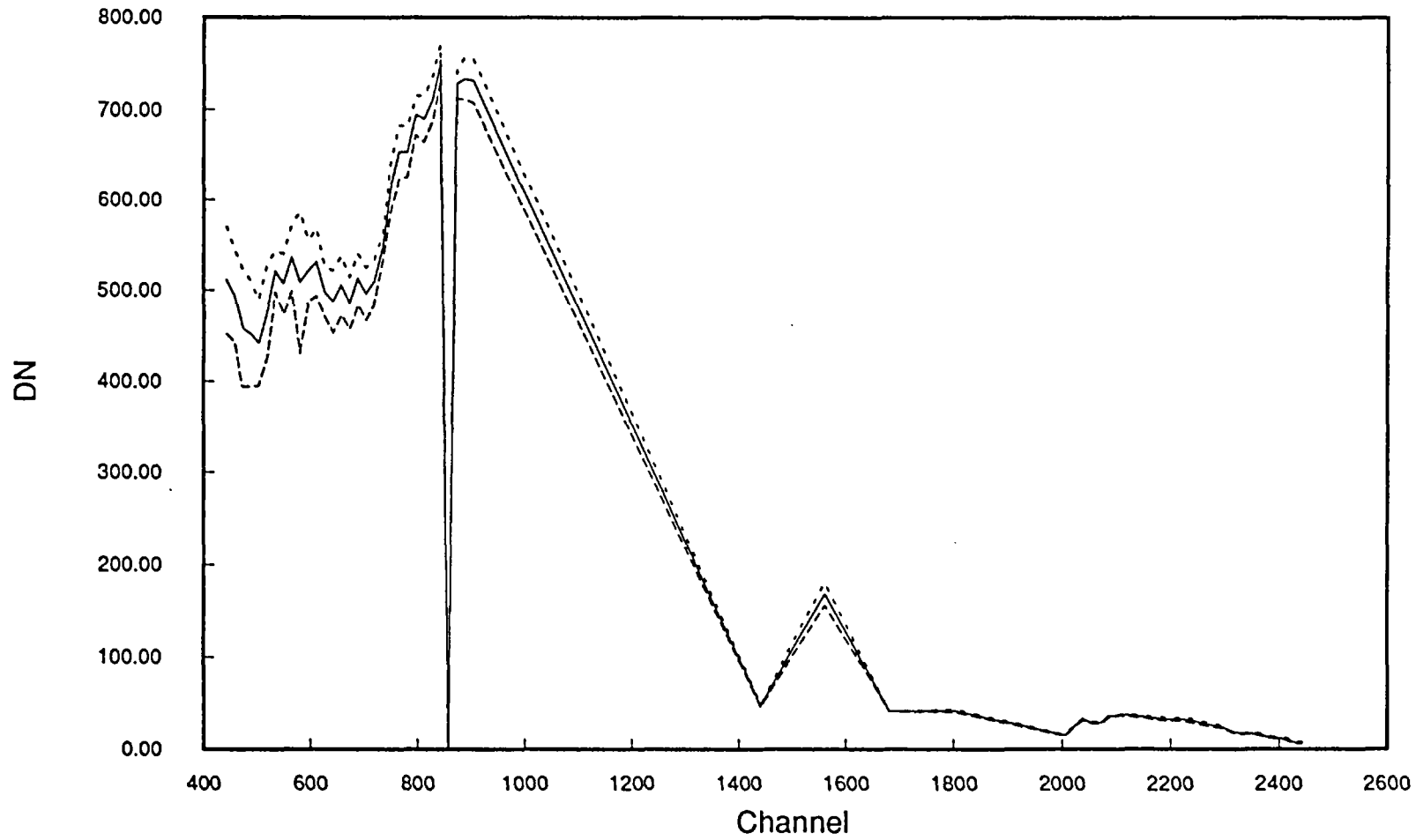
site 9, hull quotient



FILE NAME = ger.swhq

(883, 126, 3, 3)

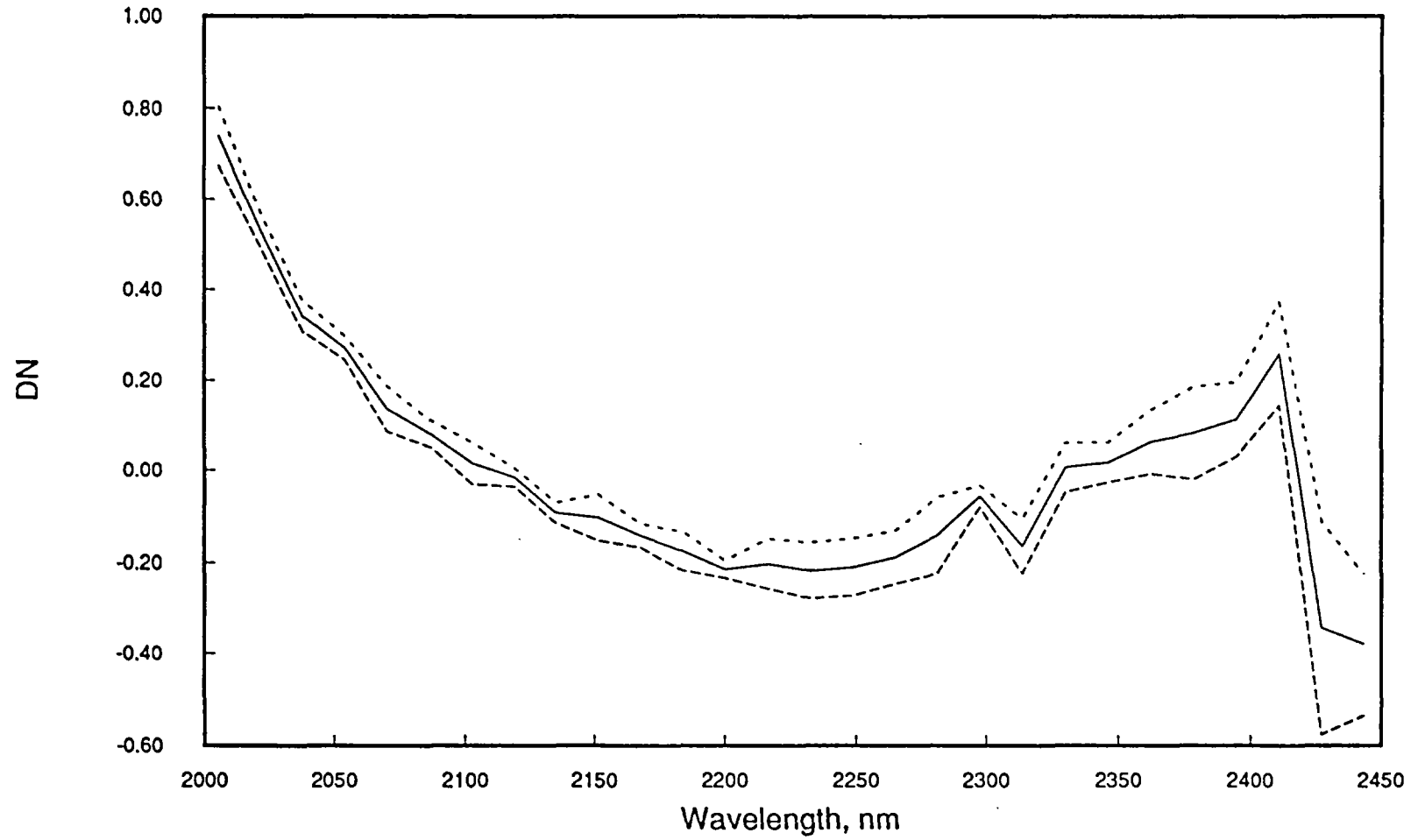
site 20



FILE NAME = reo:ger.clb

(361, 279, 3, 3)

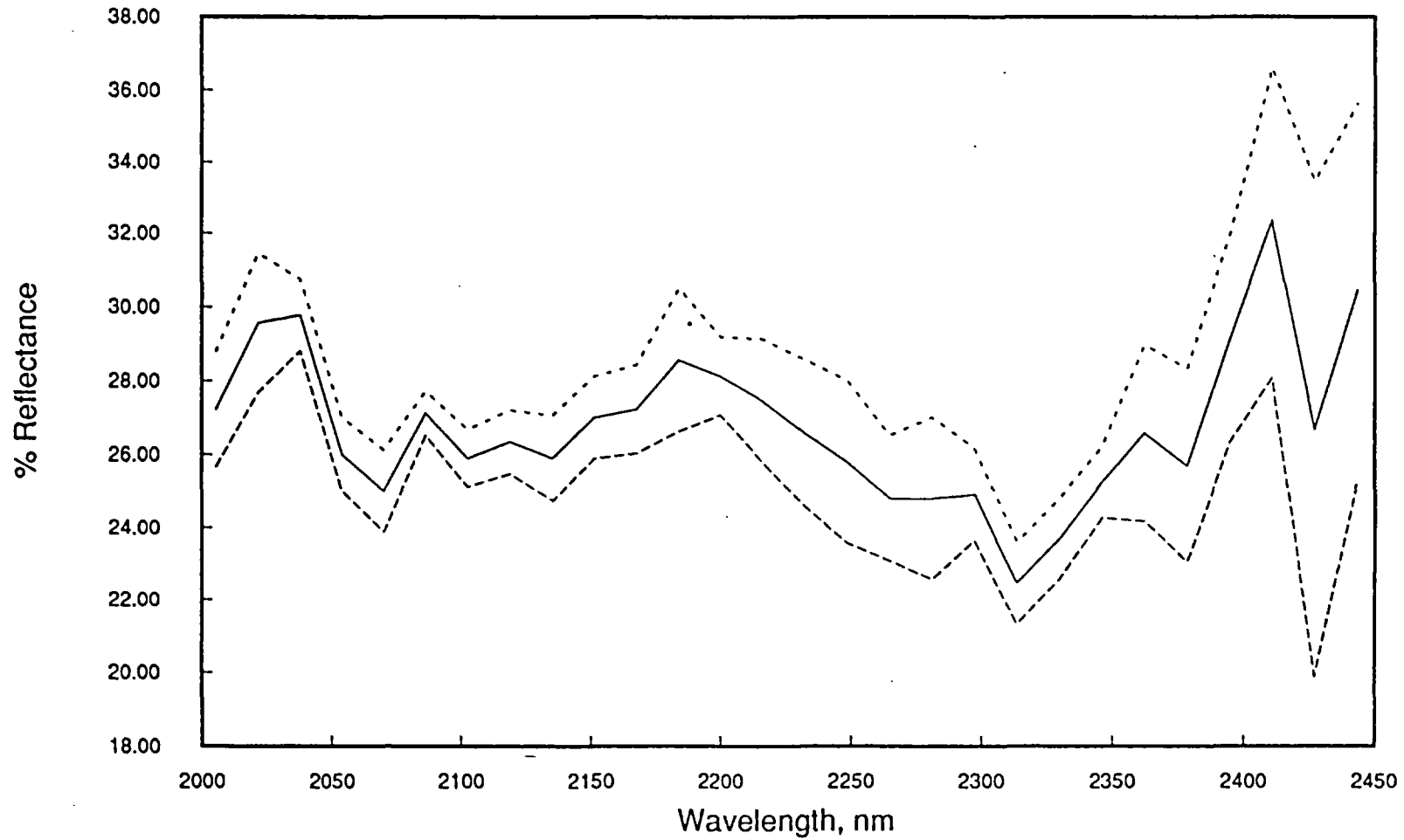
site 20, lr



FILE NAME = ger.swirlr

(361, 279, 3, 3)

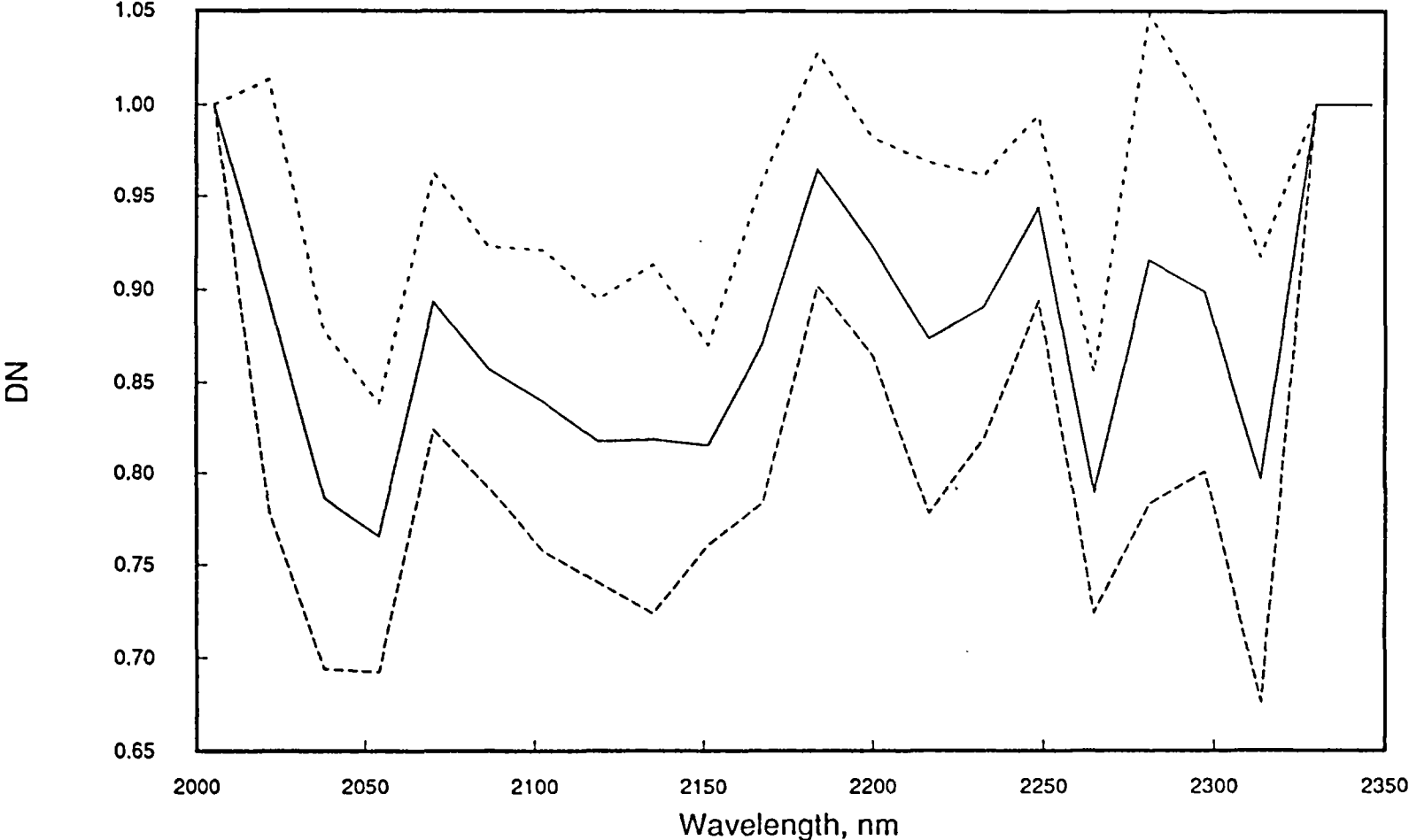
site 20, lowtran



FILE NAME = ger.swirref

(361, 279, 3, 3)

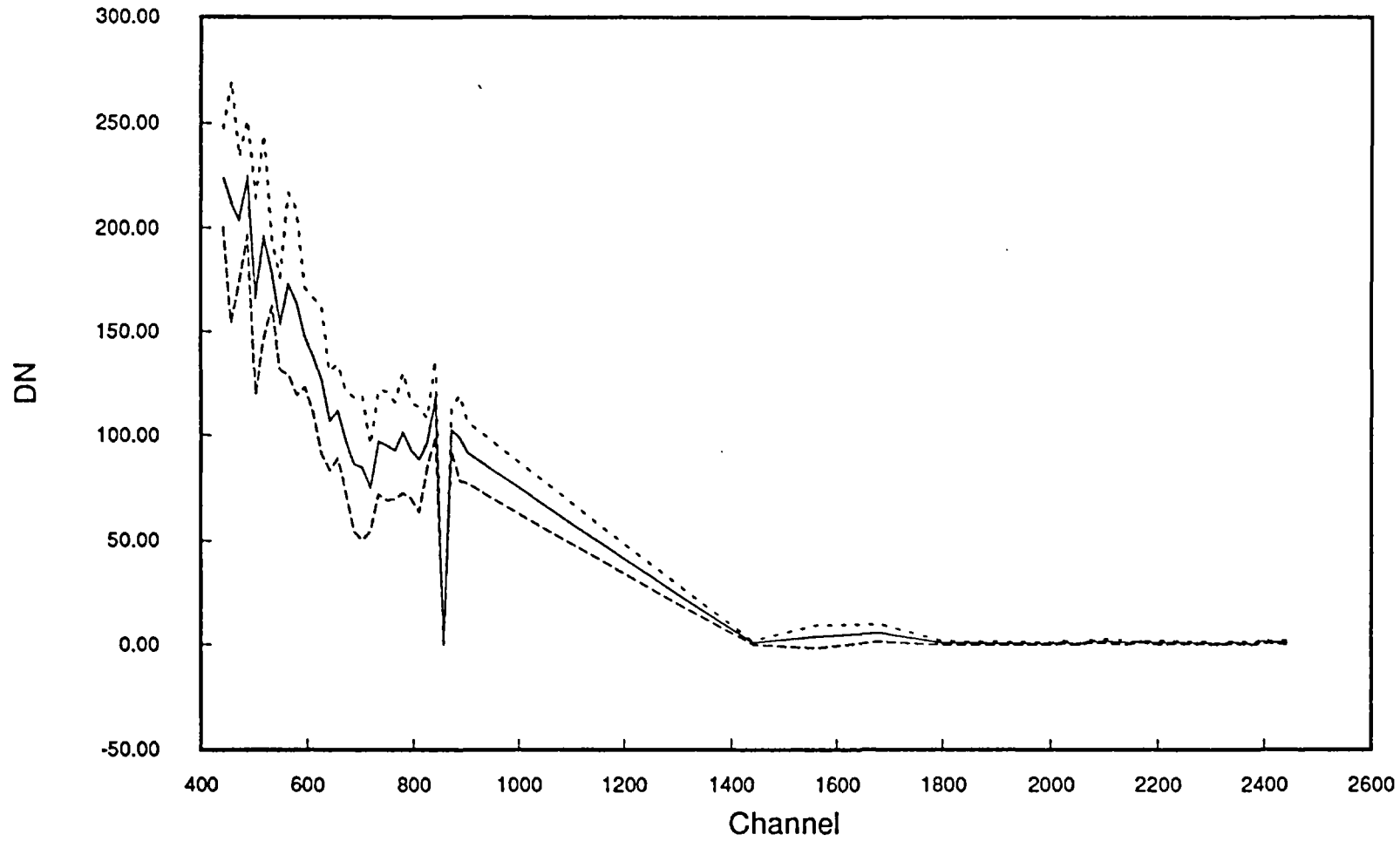
site 20, hull quotient



FILE NAME = ger.swhq

(371, 279, 3, 3)

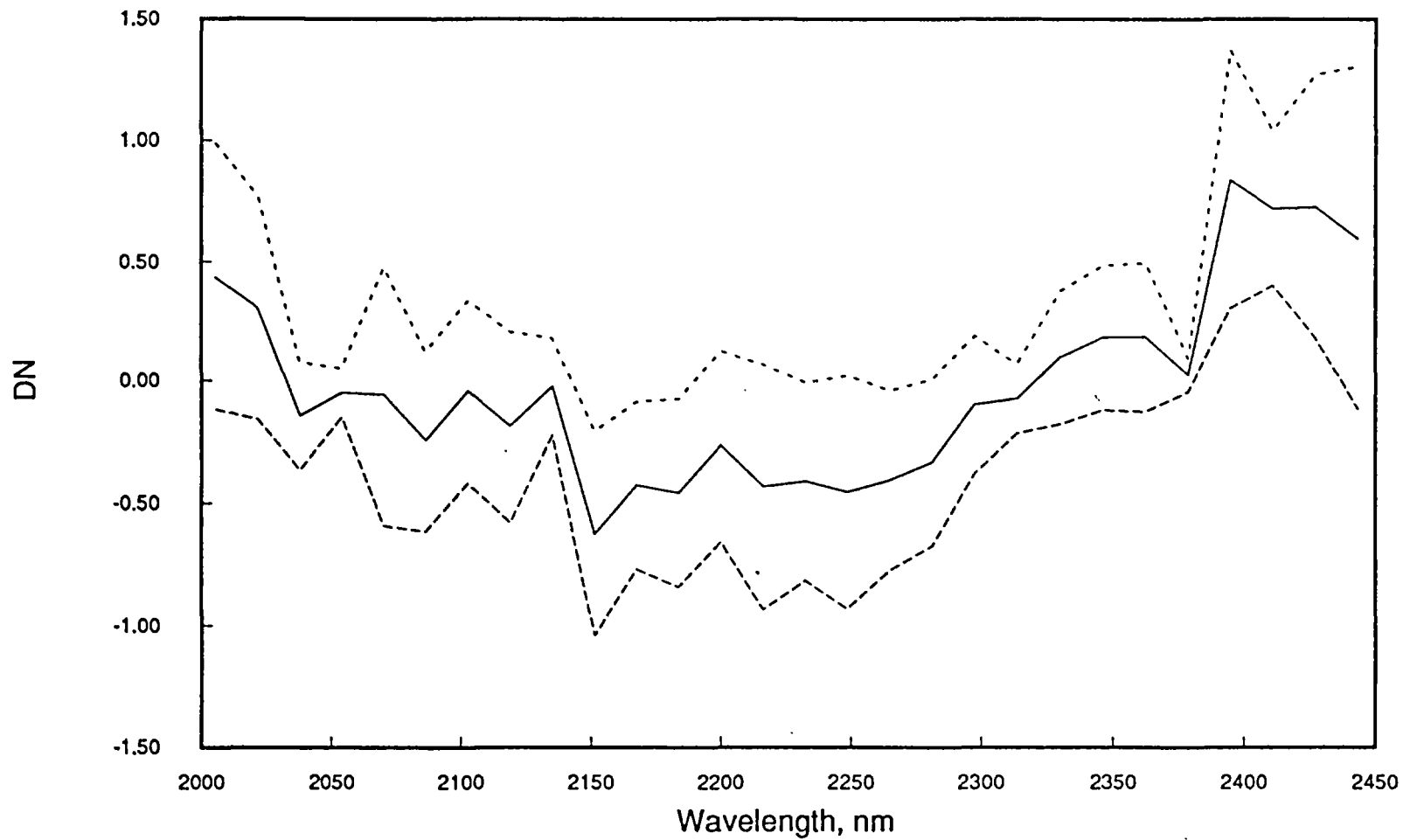
site 37



FILE NAME = reo:ger.clb

(1079, 320, 3, 3)

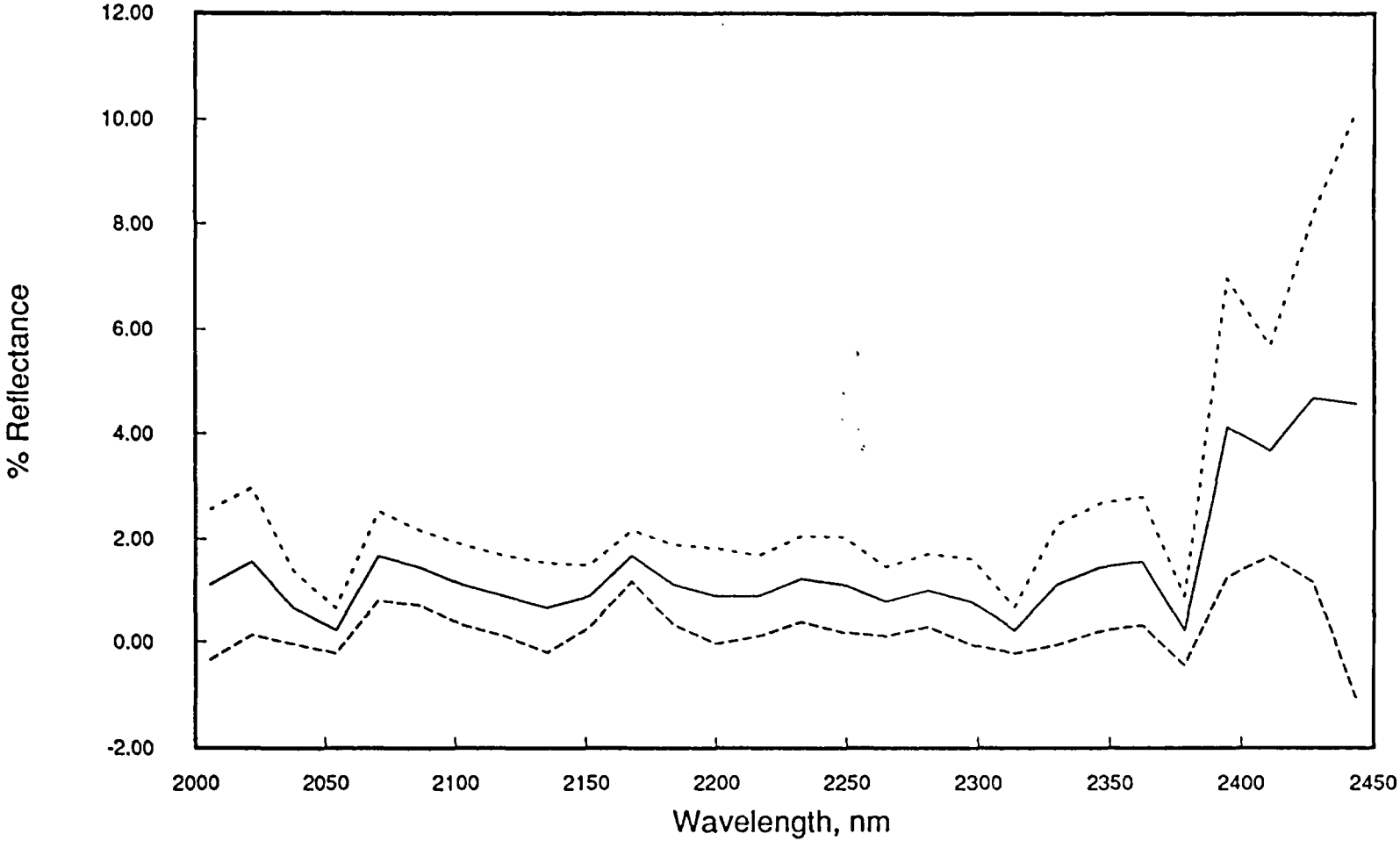
site 37, lr



FILE NAME = ger.swirlr

(1079, 320, 3, 3)

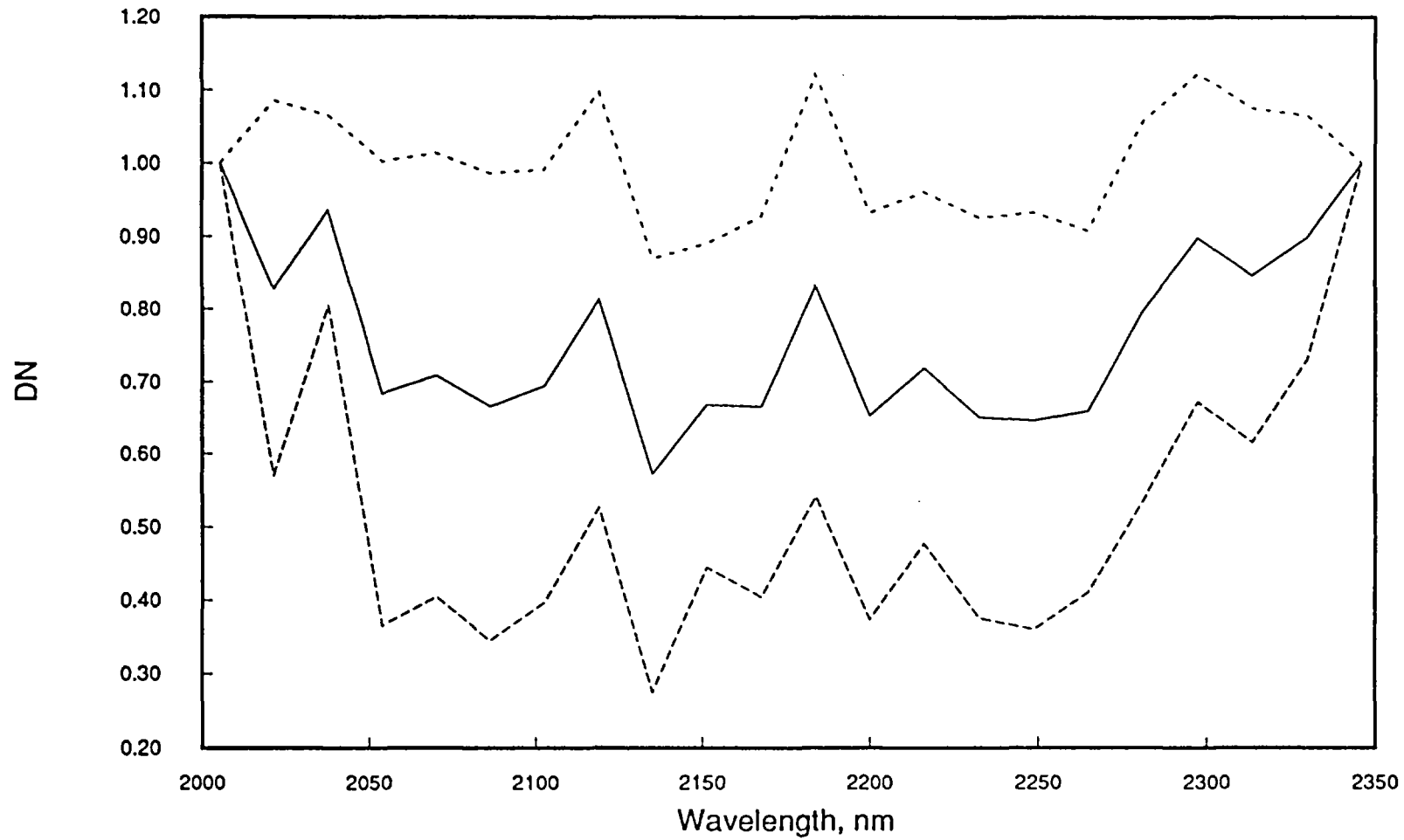
site 37, lowtran



FILE NAME = ger.swirref

(1079, 320, 3, 3)

site 37, hull quotient



FILE NAME = ger.swhq

(1079, 320, 3, 3)

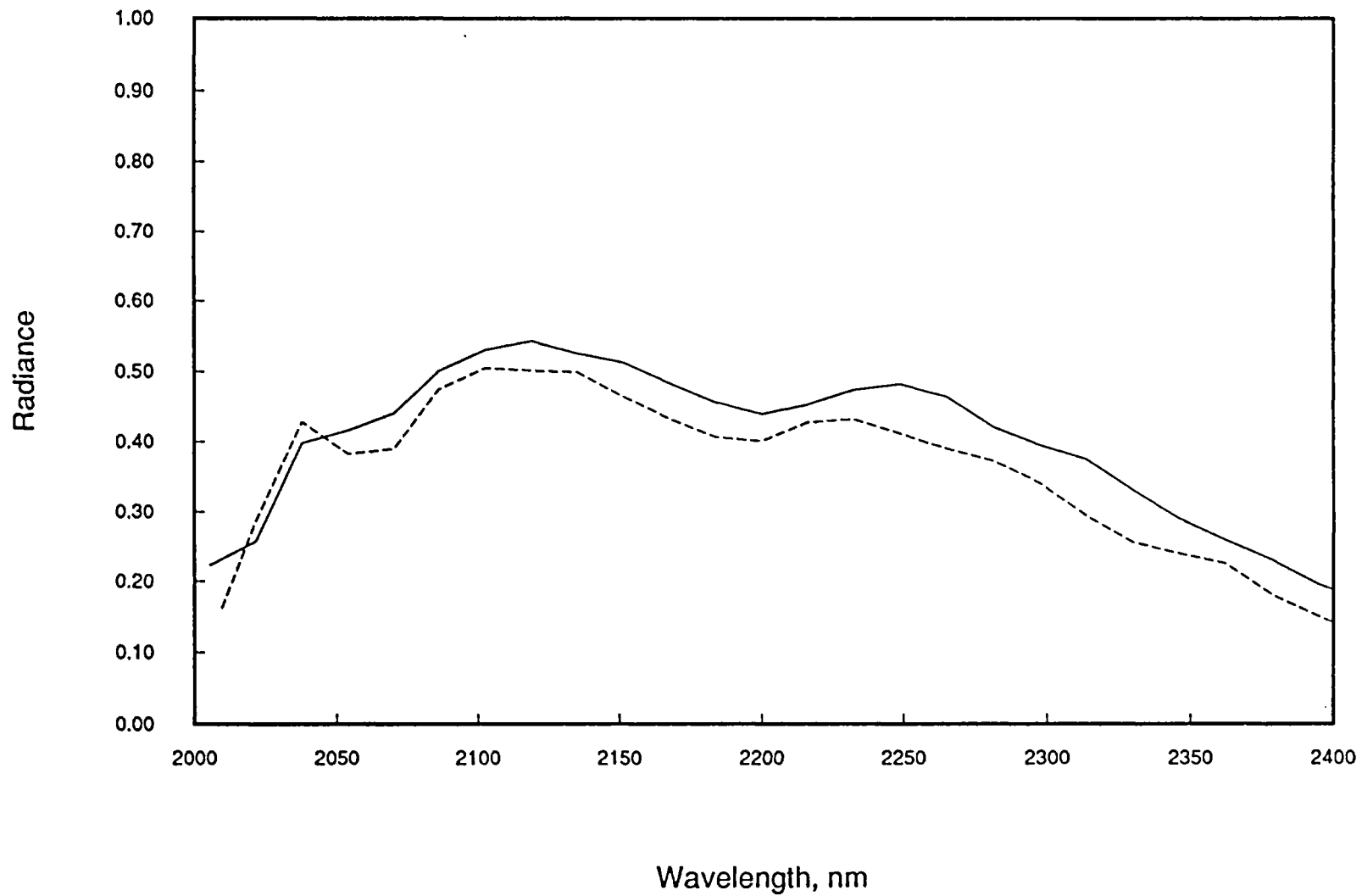
Estimation de la largeur de bande - 16nm



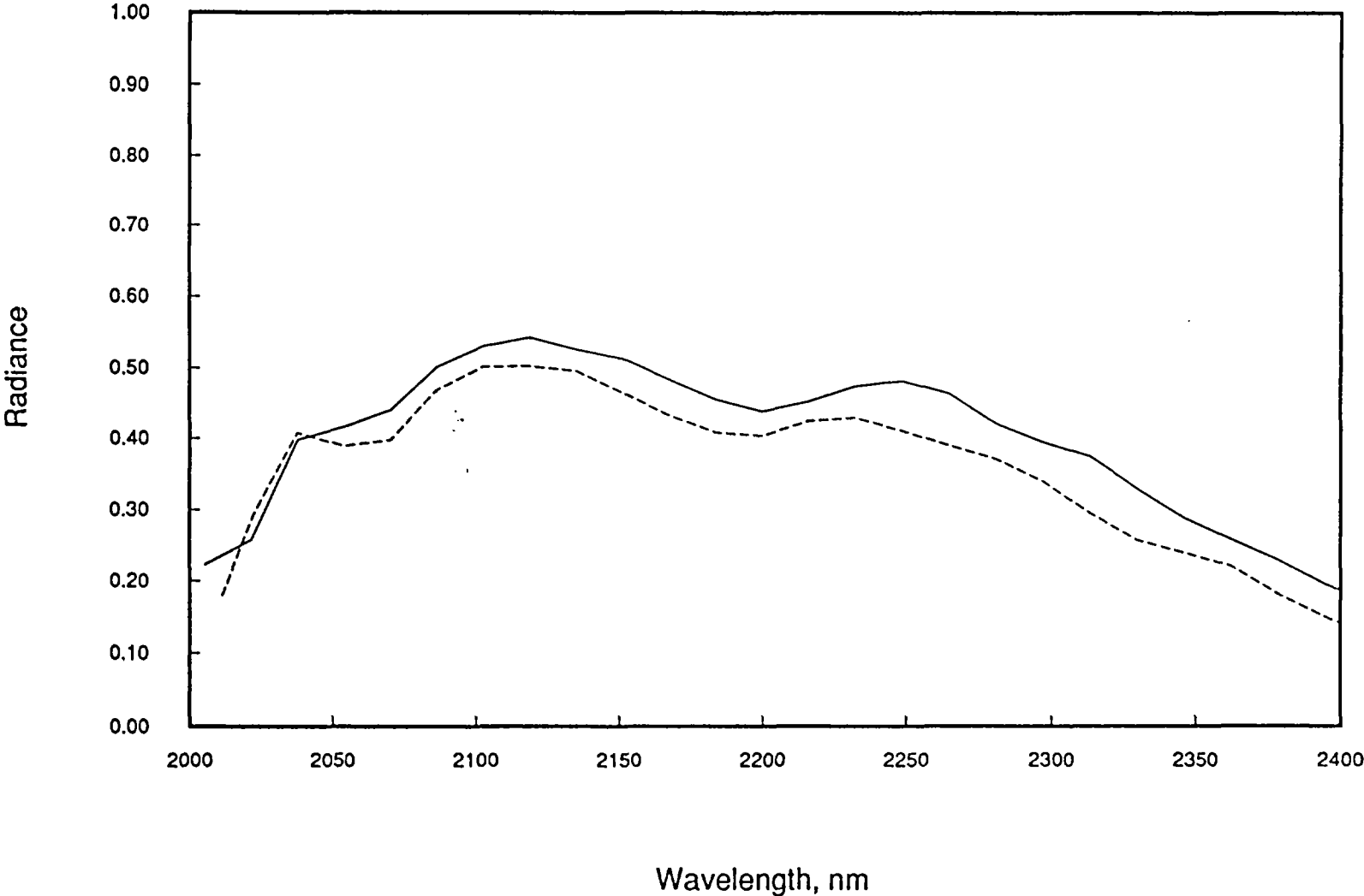
Estimation de la largeur de bande - 20nm



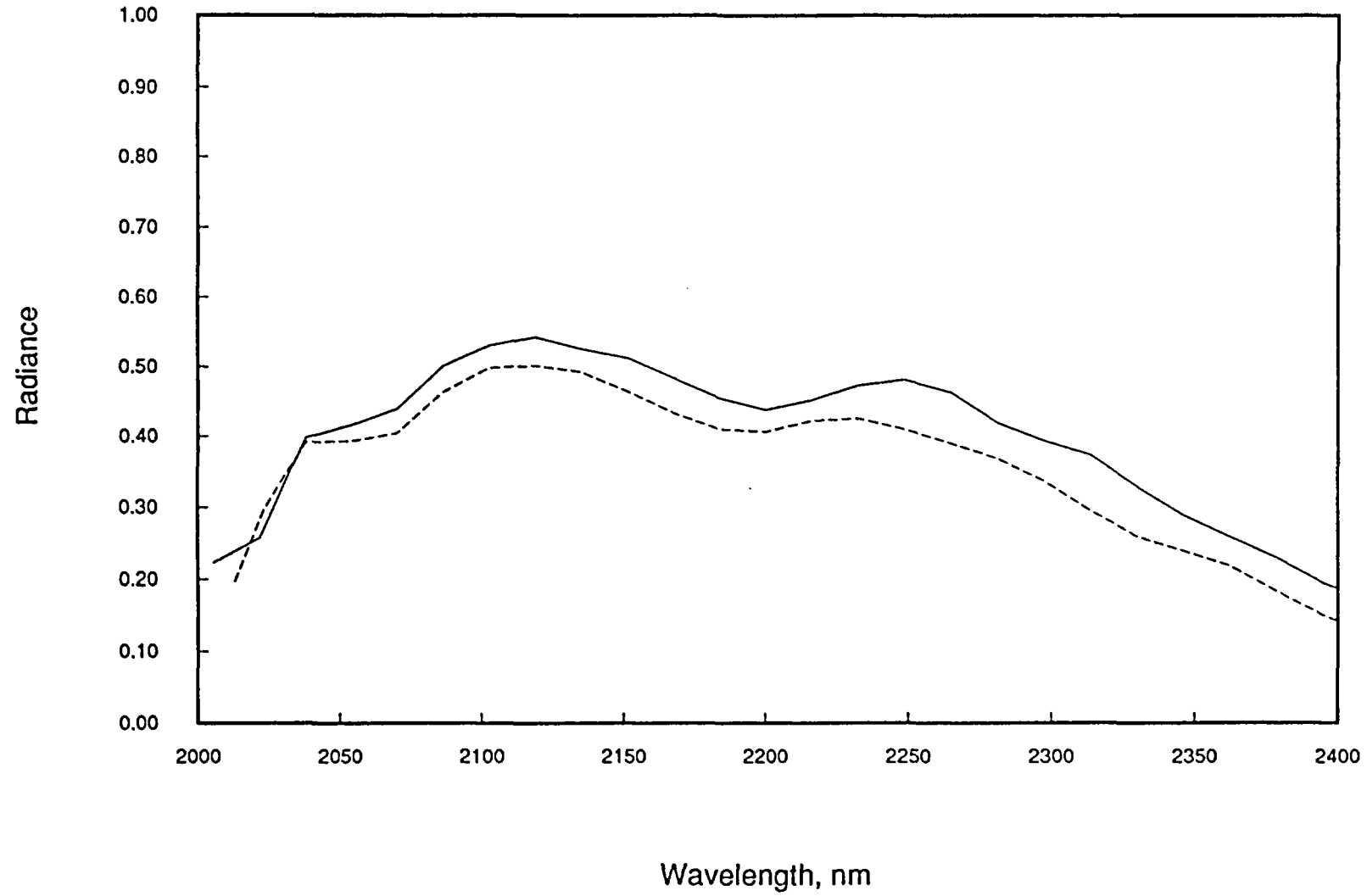
Estimation de la largeur de bande - 25nm



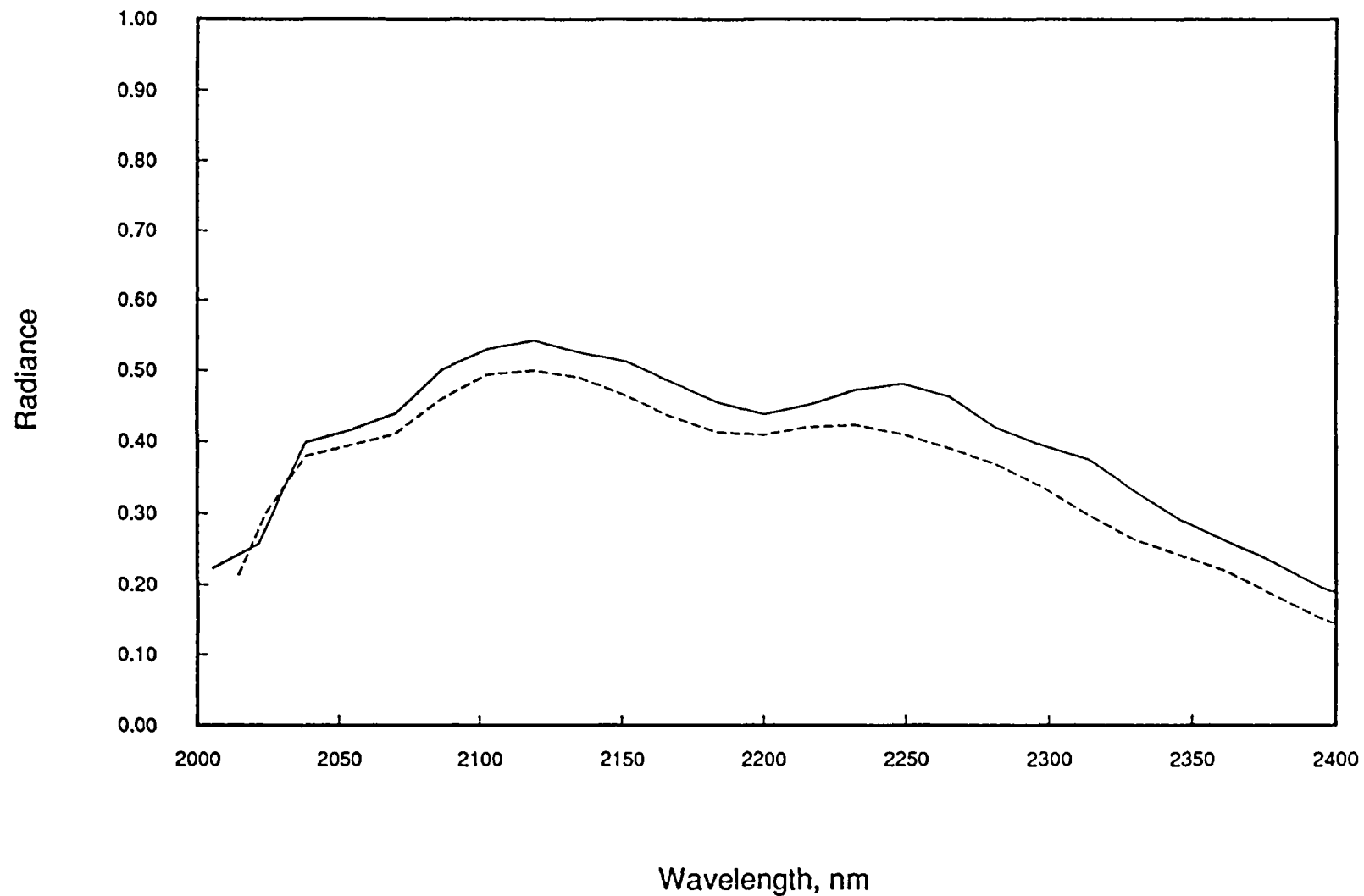
Estimation de la largeur de bande - 30nm



Estimation de la largeur de bande - 35nm



Estimation de la largeur de bande - 40nm



Estimation de la largeur de bande - 45nm



Estimation de la largeur de bande - 50nm

