

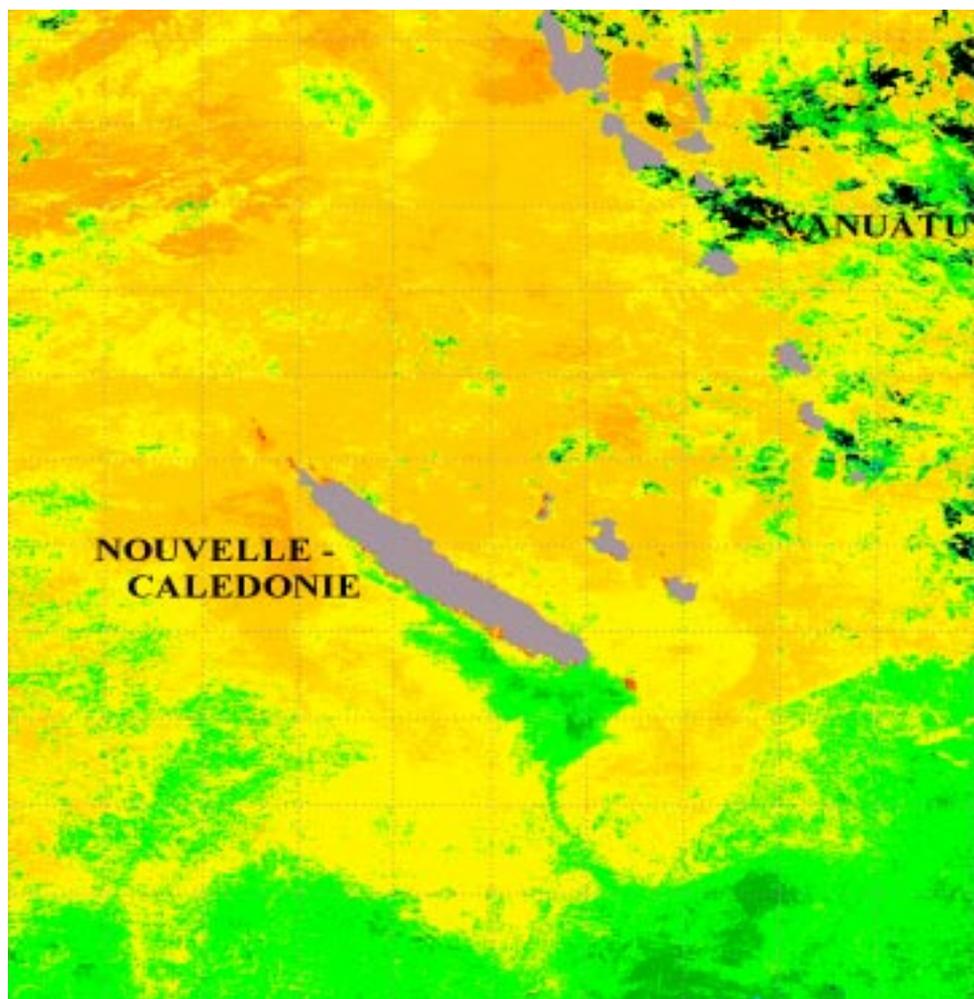
ZONECO

PROGRAMME D'ÉVALUATION DES RESSOURCES MARINES
DE LA ZONE ÉCONOMIQUE DE NOUVELLE-CALÉDONIE

**Partenaires : ETAT, TERRITOIRE ET PROVINCES DE NOUVELLE-CALEDONIE,
IFREMER, Météo-France, IRD, SHOM, UFP**

VALIDATION DE LA CHAÎNE DE TRAITEMENT NOAA/HRPT-SST

Sophie Baudel - Avril 1999





Ce travail a été réalisé au LATICAL, laboratoire de télédétection de l'IRD, dans le cadre d'un contrat IRD financé par le programme ZoNéCo.

Réalisation Sophie BAUDEL

Responsable : Didier LILLE, Directeur du LATICAL - IRD

Encadrement scientifique et technique : Michel PETIT, Océanographe, coordinateur des stations HRPT de l'IRD - IRD

Avec la participation de :

Frédéric GUILLARD, coordinateur NOAA/AVHRR pour le programme ZoNéCo - SMAI
Christian HENIN, Océanographe Physicien (programme ECOP : Etudes Climatiques de l'Océan Pacifique) - IRD

Yann FUSELIER, ingénieur informatique - IRD

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	4
2. ALGORITHME DE CALCUL DE LA SST	4
3. CALCUL DES COEFFICIENTS DU SPLIT-WINDOW	5
3.1. PRINCIPE	5
3.1.1. <i>Les mesures des stations côtières</i>	5
3.1.2. <i>Les XBT</i>	5
3.1.3. <i>Les points</i>	5
3.2. MÉTHODE DE RÉGRESSION	7
3.3. RÉSULTATS	8
4. DÉTECTION DES NUAGES	9
5. SYNTHÈSE TEMPORELLE ET CORRECTION JOUR/NUIT	10
6. VALIDATION	11
6.1. REJEU DES ARCHIVES 1998	11
6.2. RÉSULTATS	12
6.2.1. <i>Cartes de SST</i>	12
6.2.2. <i>Comparaison avec les mesures</i>	13
7. CONCLUSION	15
RÉFÉRENCES	17
ANNEXE	18
ARBORESCENCE DES PROGRAMMES ET DONNÉES	18

1. Introduction

Ce document rend compte d'un travail effectué sur la validation d'une chaîne de traitement des images NOAA/HRPT conduisant à la production de cartes quotidiennes de températures de surface de la mer (SST) de la zone économique de Nouvelle-Calédonie. Cette étude se place dans le cadre du programme ZoNéCo (Programme d'évaluation des ressources marines de la zone économique de Nouvelle-Calédonie). Elle s'est déroulée dans les locaux de l'IRD/Latical, le laboratoire de télédétection de l'IRD à Nouméa, qui héberge la station de réception NOAA. Cette station contribue au réseau SEAS de l'IRD (Surveillance de l'Environnement Assisté par Satellite). Les autres stations incluses dans ce réseau sont celles de la Réunion et de Cayenne. Deux autres stations sont associées au réseau : une aux Canaries et une à Dakar.

Le travail a porté sur 4 aspects :

- 1) La calibration des coefficients de la formule permettant le calcul de la SST à partir de l'observation satellitaire.
- 2) L'amélioration du filtre nuageux.
- 3) La mise au point d'une synthèse temporelle et d'une correction jour/nuit.
- 4) enfin la validation proprement dite c'est-à-dire la comparaison des résultats avec des mesures in situ.

2. Algorithme de calcul de la SST

Le choix de l'algorithme "Split-window" de type MCSST (Multi-Channel-SST) fut fait dès la conception de la chaîne de traitement. Il ne fut pas remis en cause dans le cadre de ce travail car c'est l'algorithme le plus communément utilisé de façon opérationnelle. Il est utilisé opérationnellement à la station SEAS-Réunion ainsi qu'au Centre de Météorologie Spatiale (CMS) à Lannion. Il était également utilisé par la NOAA qui l'a remplacé ensuite par un algorithme de type NLSST (Non-linear-SST).

Cet algorithme est linéaire, c'est-à-dire que la SST est une fonction linéaire des températures de brillance (les coefficients sont des constantes). Il a également comme caractéristique de dépendre de l'angle de vue du satellite sur le pixel concerné (angle zénithal).

La SST est calculée en fonction de la température des canaux 4 et 5 (10.8 μm et 11.9 μm) et de θ , l'angle zénithal du satellite. La relation utilisée est celle opérationnelle au CMS :

$$SST = A_0 + A_1 T_4 + A_2 (T_4 - T_5) + A_3 (\sec\theta - 1)^2 + A_4 (\sec\theta - 1) \quad (1)$$

Où T_4 et T_5 sont respectivement les températures de brillance des canaux 4 et 5 en Kelvin et θ l'angle zénithal du satellite en radians ($\sec\theta = 1/\cos\theta$).

Les coefficients A_0, \dots, A_4 peuvent être issus de la littérature (Le Borgne et. al, 1998) cependant certaines études (Wick et al., 1992, Yu et Barton, 1994, Barton, 1995) recommandent une calibration des coefficients lorsqu'on applique l'algorithme Split-Window.

La détermination des coefficients A_0, \dots, A_4 se fait par une analyse en régression entre les températures de brillance du satellite et des mesures de températures de surface faites en mer coïncidant aux passages du satellite.

Ceci pose le problème de la différence entre la température mesurée en mer (bulk temperature) et la température mesurée par le satellite (skin temperature). Cette question a été étudiée en détail par Wick et al. (1992).

D'après Barton (1995), on peut attendre de cet algorithme une précision de 0.7K. Ce chiffre correspond à la valeur du rms (root mean square, c'est-à-dire la racine carrée de la moyenne de la somme des écarts au carré entre valeur réelle et valeur calculée).

3. Calcul des coefficients du Split-Window

3.1. Principe

Le principe de la calibration est l'ajustement des coefficients du split-window par une méthode de régression à des valeurs de référence qui sont les mesures in situ. On doit trouver un jeu suffisant de points qui reflètent simultanément et au même endroit la mesure du capteur infra-rouge sur le pixel correspondant à la station et la mesure in situ.

Le pixel doit remplir 2 conditions : pas de nuage et spatialement stable. Ainsi pour chaque satellite, on élabore une série de points caractérisés par 4 paramètres :

- T_4 , T_5 , θ qui sont les 3 paramètres nécessaires au calcul de la SST (SST_{noa})
- SST_{mes} , la valeur de la mesure in situ

La calibration doit être faite sur les 2 satellites actuellement pris en compte : NOAA12 et NOAA14.

Les mesures in situ sont mises à disposition par le programme ECOP (Etudes climatiques de l'Océan Pacifique). Les mesures ayant été utilisées pour la calibration sont de deux types :

3.1.1. Les mesures des stations côtières

Le laboratoire d'océanographie physique dispose depuis quelques années d'un réseau de stations côtières autour de la Grande-Terre qui enregistrent en continu (tous les 1/4h) la température de la mer entre 10m et 12m de profondeur. Dans des conditions de brassage suffisant (vents > 15 kt), ces températures sont considérées comme représentant la température de surface de la mer (SST). Elles ont été placées généralement au voisinage des passes à l'extérieur du récif afin de représenter le signal océanique et non celui du lagon. La précision des mesures est de l'ordre de 0.2 °C.

3.1.2. Les XBT

Les XBT (Expandable Bathy Thermograph) sont des mesures ponctuelles faites à partir de navires faisant route. Seule la mesure de surface nous intéresse (les XBT vont généralement jusqu'à 700m de profondeur). La précision des mesures est de l'ordre de 0.2 °C.

3.1.3. Les points

Le tableau ci-dessous présente les 41 points sélectionnés pour NOAA 12.

Mesure				
(°C)	T4 (K)	T5 (K)	teta (rd)	

Programme ZoNéCo

26.1	296.2	294.5	0.25
26.6	296.5	294.7	0.24
26.5	296.5	294.7	0.23
28.6	296.8	294.5	0.20
23.6	292.5	290.4	0.47
28.3	297.4	295.6	0.08
25.9	294.7	292.5	0.09
26.0	294.9	292.7	0.12
26.5	296.0	294.3	0.20
27.6	296.4	294.7	0.45
26.0	293.2	290.5	0.87
24.4	292.5	290.6	0.90
22.3	292.5	291.0	0.62
22.5	292.0	290.5	0.60
22.9	292.7	291.5	0.47
22.3	292.1	290.6	0.59
23.8	293.5	291.7	0.81
23.4	293.2	291.5	0.82
27.3	296.0	294.0	0.55
27.2	295.9	294.1	0.59
25.5	295.4	293.6	0.01
26.1	295.9	294.4	0.03
26.2	295.7	294.2	0.04
26.1	294.5	292.5	0.32
26.7	295.1	293.0	0.35
26.0	295.0	292.9	0.36
25.1	294.4	292.7	0.68
26.2	295.3	293.6	0.62
26.9	295.9	294.0	0.61
26.8	296.2	294.3	0.60
26.4	295.5	293.7	0.13
26.9	296.0	294.3	0.15
26.6	295.7	294.0	0.16
26.2	295.4	293.4	0.32
26.5	295.6	293.7	0.29
26.8	294.9	292.6	0.13
26.1	295.7	293.9	0.28
23.1	292.0	290.4	0.11
20.5	289.2	287.4	0.88
18.6	286.9	285.3	1.07
19.5	287.6	285.6	1.03

Le tableau ci-dessous présente les 30 points sélectionnés pour NOAA 14.

Mesure				
(°C)	T4 (K)	T5 (K)	teta (rd)	

Programme ZoNéCo

25.2	296.0	294.6	0.14
28.3	298.2	296.7	0.20
27.7	296.0	294.0	0.76
23.9	292.4	290.2	0.65
23.2	292.3	290.0	0.66
24.5	293.3	291.7	1.00
23.1	293.0	291.3	0.89
22.6	292.8	291.3	0.08
24.0	294.2	292.9	0.33
24.1	293.3	291.7	0.90
26.2	294.6	292.2	0.02
27.3	295.1	292.6	0.05
26.6	293.7	290.6	0.44
27.5	293.8	290.5	0.43
27.2	293.9	290.7	0.42
23.9	294.8	293.7	0.14
24.3	294.9	293.5	0.03
27.1	296.3	294.4	0.08
23.5	294.8	293.8	0.13
26.8	296.4	294.8	0.35
26.8	295.5	293.6	0.33
26.4	294.5	292.2	0.88
26.9	296.2	294.1	0.87
27.3	294.7	291.9	0.82
26.9	295.8	293.9	0.87
21.9	292.5	291.3	0.12
22.4	291.7	289.8	0.36
30.3	295.7	292.3	0.38
29.7	294.2	290.1	0.29
18.6	289.7	288.5	0.03

3.2. Méthode de régression

La méthode choisie est une méthode "quasi-Newton". C'est une méthode itérative. On cherche à minimiser la fonction F qui représente la variance des écarts entre SST calculées et SST mesurées en faisant évoluer les valeurs des coefficients A0,...,A4 le long d'une direction de descente qui est fonction du gradient.

La fonction F à minimiser s'écrit :

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(a_0 + a_1 T_4 + a_2 (T_4 - T_5) + a_3 (\sec \theta - 1)^2 + a_4 (\sec \theta - 1) - T_{obs} \right)^2$$

Les températures T₄ et T₅ sont celles des points sélectionnés. T_{obs} est la température mesurée correspondant au pixel pour lequel ont été mesurées les températures de brillance T₄ et T₅.

On calcule ensuite les 5 composantes du gradient de F : dérivées partielles selon les 5 coefficients.

A l'itération i :

$$X_i^+ = X_i + \alpha_i d_i$$

Avec :

$$g_i^+ = g(X_i^+)$$

On cherche α qui minimise F le long de d_i .

La variation du gradient est linéaire selon d_i (vrai si quadratique) :

$$g_{i+1} = g_i + \frac{\alpha_i}{\alpha_i'} (g_i^+ - g_i)$$

Soit en multipliant par d_i :

$$\alpha_i = \alpha_i' \frac{g_i \cdot d_i}{g_i \cdot d_i - g_i^+ \cdot d_i}$$

Et :

$$g_{i+1} = g(X_{i+1})$$

Nouvelle direction de descente :

$$\gamma_i = \frac{g_{i+1} \cdot g_{i+1}}{g_i \cdot g_i}$$

$$\gamma_i = \frac{\|g_{i+1}\|}{\|g_i\|}$$

Et :

$$d_{i+1} = \gamma_i \cdot d_i - g_{i+1}$$

Et :

$$\alpha_{i+1}' = \alpha_i' \frac{\|d_i\|}{\|d_{i+1}\|}$$

On connaît donc X_{i+1} , g_{i+1} , α_{i+1}' et d_{i+1}

Au démarrage :

$G_0 = g(X_0)$, où X_0 représente le vecteur des coefficients initiaux (ceux publiés par le CMS).

$d_0 = -g_0$

$$\alpha_0' = \frac{1}{\|d_0\|} = \gamma_0$$

3.3. Résultats

	NOAA 12	NOAA 14
Nombre de points sélectionnés	41	30
Ecart-type des écarts avant minimisation (°C)	0.48	0.38
Ecart-type des écarts après minimisation (°C)	0.39	0.34
Moyenne des écarts avant minimisation (°C)	-0.23	-0.03

Programme ZoNéCo

Moyenne des écarts après minimisation (°C)	0.00	0.00
Coefficients avant minimisation	A0=-0.05 A1=1.00 A2=2.00 A3=0.97 A4=-0.24	A0=-0.05 A1=1.00 A2=2.00 A3=0.97 A4=-0.24
Coefficients après minimisation	A0=12.59 A1=0.96 A2=1.70 A3=0.88 A4=-0.12	A0=-18.25 A1=1.06 A2=2.16 A3=2.68 A4=-1.17

- Tableau 1 -
Résultats de la minimisation

La calibration annule le biais qui existait entre mesures et calculs. Ce biais était déjà nul avec NOAA 14, il était de 0.2°C avec NOAA 12.

Par contre, elle n'a que très peu d'effet sur la valeur de l'écart-type des écarts : elle diminue l'écart-type de 0.09°C sur NOAA 12 et de 0.04°C sur NOAA 14.

4. Détection des nuages

Plusieurs filtres nuageux ont été appliqués au cours des développements sur la chaîne de traitement. A l'origine, les filtres préconisés par le CMS (Derrien et al., 1993) ont été appliqués. Cette série de filtres présentait l'inconvénient de distinguer les images jour et les images nuit et les valeurs seuil de l'article n'étaient pas adaptées à la zone.

A la station SEAS de la Réunion, le filtre consiste à considérer comme nuageux les pixels dont la différence entre T4 et T5 (soit le contenu en vapeur d'eau) est supérieure à une droite fonction de la valeur de la SST. Ce filtre est associé à un filtre climatologique. Dans notre zone d'étude, ce filtre s'est révélé mal adapté pour filtrer les nuages chauds, c'est-à-dire la plage de températures au-delà de 15°C qui est la limite inférieure des valeurs que l'on prend en compte dans notre zone. Trois conclusions ont été tirées de l'utilisation de ce filtre :

- la différence entre T4 et T5 doit être faible dans les basses températures : de l'ordre de 1K à 2K.
- la droite doit être énormément redressée dans la zone des 295K (22°C)
- la différence entre T4 et T5 doit être élevée dans les températures élevées : > 4K.

De plus il nous semblait intéressant de s'affranchir d'un filtre climatologique toujours arbitraire et pouvant masquer des événements froids transitoires tels que des upwelling dont on connaît l'existence sur la côte ouest de la Nouvelle-Calédonie.

La courbe mathématique s'approchant de cette description est une forme en arctangente (figure 1) dont on fait varier 4 paramètres : les coordonnées x et y du point d'inflexion de la courbe, un coefficient d'amplification et de pente de la courbe. L'équation de la courbe s'écrit :

$$T4-T5 = Y_{\text{inflexion}} + \text{CoeffA} \times \text{atan}(\text{coeffP} \times \text{SST} - X_{\text{inflexion}}), \text{ où :}$$

Y_inflexion représente la valeur de T4-T5 au point d'inflexion

X_inflexion représente la valeur de la SST au point d'inflexion

CoeffA représente un coefficient d'amplitude de la courbe i.e. la "largeur" de la partie raide de la courbe.

CoeffP représente un coefficient de pente i.e. la hauteur de la partie raide de la courbe.

Les valeurs des paramètres appliquées actuellement sont :

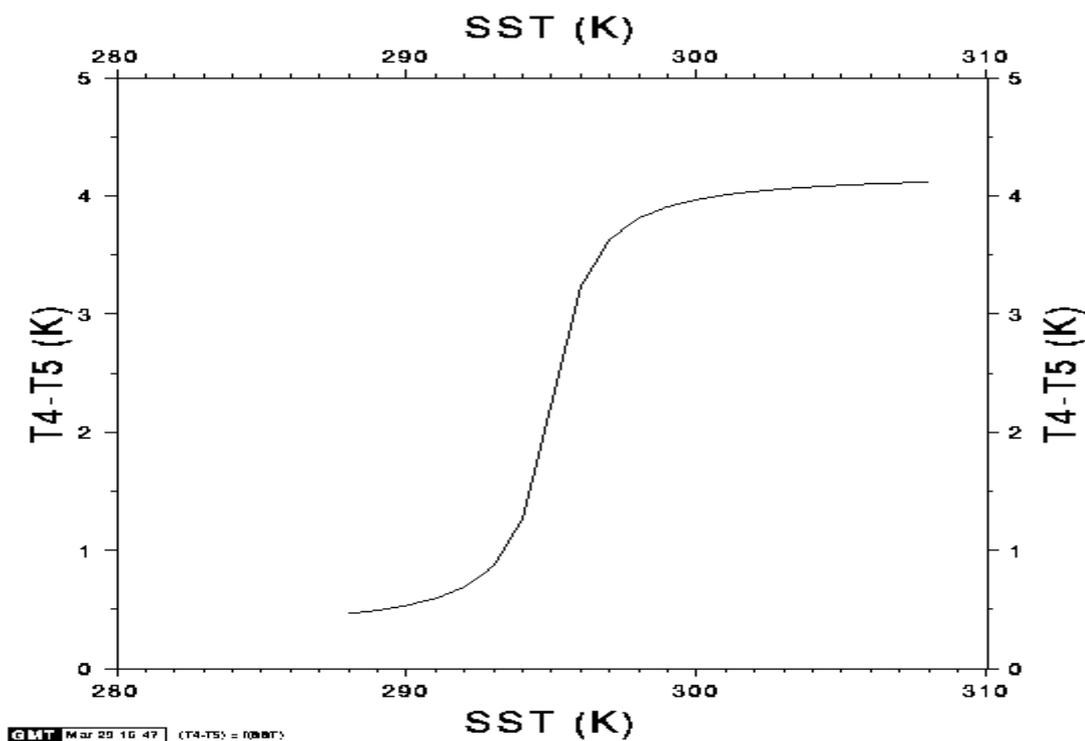
$$Y_{\text{inflexion}} = 2.25K$$

$$X_{\text{inflexion}} = 295K$$

$$\text{CoeffA} = 1.25$$

$$\text{CoeffP} = 1$$

La mise au point des paramètres s'est effectuée durant le mois de décembre 1998. La suite de l'étude montrera qu'il n'y a pas lieu de modifier ces paramètres en fonction de la saison.



- Figure 1 -

Filtre nuageux : $T4-T5 = f(SST)$. Les points situés en-dessus la courbe sont considérés comme des nuages. Les points situés en-dessous de la courbe sont considérés comme de l'eau de mer. Les températures sont exprimées en degrés Kelvin.

5. Synthèse temporelle et correction jour/nuit

Le but de la chaîne de traitement SST est la production d'une carte quotidienne de SST sur la région. Afin d'obtenir une couverture complète de la zone, on effectue une synthèse temporelle des images.

Ce problème est l'un des aspects fondamentaux d'une chaîne de traitement SST car si la littérature est abondante pour proposer filtres nuageux et algorithmes de calcul de la SST, elle est quasiment inexistante sur les solutions qui mènent à la production de cartes quotidiennes exploitables de SST.

En suivant l'exemple de ce qui se fait dans la chaîne de traitement de la Réunion, la synthèse temporelle est glissante sur 5 jours et prend en compte à la fois les images de jour et les images de nuit. Si l'on prend une moyenne de 6 images par 24h (NOAA12 et NOAA14), la synthèse se fait sur une trentaine d'images, ce qui est

suffisant pour éliminer à peu près tous les nuages. Cette carte reflète la meilleure estimation possible de la SST que l'on ait sur la région pour un jour donné.

La valeur choisie pour la SST est, pour un pixel donné, la valeur maximale de tous les pixels sur les 5 jours, c'est-à-dire la valeur la moins perturbée par l'atmosphère (nuages non détectés, vapeur d'eau, etc.).

De plus et afin de corriger les écarts de température entre les images de jour et les images de nuit, dus aux surchauffes qui peuvent avoir lieu durant les journées particulièrement ensoleillées et calmes, une correction jour/nuit est appliquée aux images de jour.

Par 24h, une première compilation est faite sur les images de nuit puis une deuxième compilation est faite sur les images de jour. La limite entre le jour et la nuit est fixée à : 20h-9h (heure locale de Nouméa) pour les images de nuit et 9h-20h (heure locale de Nouméa) pour les images de jour, ceci afin de prendre en compte l'inertie thermique du rayonnement. La zone est ensuite découpée en "pavés" et on calcule la moyenne des valeurs nuit par pavé et la moyenne des valeurs jour par pavé. La différence entre les deux "alimente" une matrice dite de rectification qui est ensuite appliquée à l'image de jour : l'écart moyen par pavé est retiré à chaque pixel du pavé de l'image jour. Cette matrice de rectification est "vivante", c'est-à-dire que les pavés sont mis à jour au fur et à mesure que l'on a des données sur ce pavé. En effet, la correction doit être appliquée de façon continue et pas seulement lorsqu'il y a des données dans le pavé. La zone a une dimension de 2000 pixels en longitude sur 1300 pixels en latitude, ce qui correspond à un rectangle d'environ 2000 km sur 1300 km. Les pavés sont au nombre de 10 dans l'axe longitudinal et de 13 dans l'axe latitudinal, soit une taille de 200 km sur 100 km.

Pour avoir une image compilée sur la journée, on doit avoir au minimum 2 images de nuit et 2 images de jour.

Pour avoir une image compilée sur 5 jours, on doit disposer d'au moins 4 images. Par exemple si l'on n'a pas d'image le jour J-2, on compile sur J-1, J, J+1, J+2 pour l'image du jour J.

6. Validation

6.1. Rejeu des archives 1998

Les algorithmes décrits dans les paragraphes précédents (Split-Window avec les coefficients issus de la calibration, filtre nuageux, synthèse temporelle et correction jour/nuit) sont actuellement implantés dans la chaîne opérationnelle. Les dernières modifications datent de début janvier 1999. La validation de ces algorithmes a été effectuée sur l'année 1998. Le rejeu consiste en :

- L'extraction des images archivées brutes NOAA (environ 2000 images).
- La navigation des images sur le rectangle englobant la zone économique de taille 2000x1300 pixels : production des 3 fichiers canal 4, canal 5 et angle d'élévation ($90^\circ - \theta$)
- Le calcul SST à partir de ces 3 fichiers (le calcul SST est simultané au calcul du filtre nuageux).
- La synthèse temporelle et la correction jour/nuit.

Il est intéressant de souligner les problèmes soulevés par ce rejeu :

- Problèmes de place disque : les images des canaux 4 et 5 et d'angles d'élévation sont des images 16 bits de 5,2 MO chacune. Même compressées, la place nécessaire au stockage en ligne de tous ces fichiers est trop importante pour la capacité des disques dont on dispose, aussi fut-il nécessaire de sauvegarder au fur et à mesure les images naviguées et les SST et de les ré-extraire au moment de la synthèse temporelle.

- Le temps nécessaire à l'extraction : 20 minutes de traitement par image NOAA. Les extractions étaient lancées la nuit. Extraction, navigation et calcul SST des 2000 images NOAA de 1998 furent commencés fin novembre 98 et terminés mi février 99.

- Les développements nécessaires pour les synthèses temporelles et les corrections jour/nuit. En effet, les développements implantés sur la chaîne opérationnelle n'étaient pas exploitables tels quels. De plus, le traitement d'images historiques permet une synthèse centrée sur les 5 jours : le jour J est une synthèse des valeurs des jours J-2, J-1, J, J+1, J+2 (traitement de type "hindcast" par rapport au traitement de type "nowcast")

de la chaîne opérationnelle). De cette façon on est éloigné au maximum de 2 jours de la mesure (on peut l'être de 4 dans la chaîne opérationnelle).

- Certaines images sont mal naviguées (erreurs dans le logiciel de navigation xprnavigate) et ont dû être éliminées des compilations. Ceci a nécessité une pré-visualisation des "Quick-looks".

6.2. Résultats

6.2.1. Cartes de SST

Au total, 320 images SST compilées sur les 365 jours de l'année ont pu être produites après traitement des images de 1998. Ces images 16 bits ont été transformées en images 8 bits visualisables au format raster.

Toutes les cartes furent visualisées. Certaines font apparaître les limites entre les "pavés" de correction jour/nuit ou bien du noir (absence de données) dû à des problèmes de réception. Il est important de noter que les cartes sans "défaut" de ce type sont celles que l'on calcule sur des périodes de bonne réception : pas de "bandes" de mauvaise réception, pas d'images éliminées.

Les jours suivants ne sont pas représentés :

- 1 et 2 janvier (compilation sur 5 jours : première image le 3 janvier)
- 6, 7, 9, 10 février : erreur de navigation : images naviguées "buggées"
- du 21 au 23 mars : 4 images le 21, pas d'images le 22, 3 images le 23.
- du 18 mai au 26 mai : pas d'images entre le 21 et le 24 mai, d'où pas d'images compilées entre le 18 et le 26
- du 24 juin au 15 juillet : gros problèmes de réception : pas d'images exploitables.
- du 2 août au 6 août : pas d'images les 1, 4 et 6 août.
- 16 et 19 novembre : mauvaise réception
- 30 et 31 décembre (compilation sur 5 jours : dernière image le 29 décembre)

Les structures thermiques de l'océan et leur évolution peuvent être étudiées, de même que les caractéristiques régionales. Citons :

- les vortex,
- la dynamique des fronts thermiques,
- la supériorité des température de la côte est par rapport à la côte ouest de la Grande-Terre,
- l'upwelling côtier sur la côte ouest de la Grande-Terre,
- la structure froide au sud-est de la Grande Terre,
- l'évolution saisonnière avec le refroidissement de l'été qui culmine au mois d'août et le réchauffement progressif qui culmine au mois de mars.

Nous présentons en annexe, 6 cartes représentatives de tous ces phénomènes :

- la carte du 13 janvier 1998 représentative de l'upwelling côtier qui est présent dès les premières images de janvier (il apparaît probablement fin décembre). Sur cette carte est nettement représentée la barrière thermique que constitue le récif qui sépare le lagon du grand océan : le lagon est plus chaud en été. On peut également voir sur cette carte une zone plus froide qui s'étend sur quelques centaines de km² dans le Sud-Est de la zone étudiée, approximativement entre les parallèles 22.5S et 25.5S et les méridiens 168E et 172E. Une zone plus chaude s'intercale entre le Sud de la Grande-Terre et cette structure froide.
- la carte du 29 mai : le refroidissement saisonnier arrive par le sud (températures < 25°C). On remarque des ondulations méso-échelles (quelques centaines de km) le long du front thermique. Un nouvel upwelling est présent au sud-ouest de la Grande-Terre.

- la carte du 20 août 1998 : Le gradient nord-sud est plus important. Dans le Nord existent toujours des températures supérieures à 26°C alors que dans le Sud de la carte, les températures descendent en-dessous de 21°C. Nous sommes dans la période la plus froide. La côte Est de la Grande-Terre reste à une température supérieure à 25°C alors que la côte Ouest est à 24°C et peut descendre à 23°C dans l'extrême Sud, entre la Grande-Terre et l'île des Pins (le lagon est plus froid que le large en hiver).
- la carte du 30 septembre : L'isotherme 26°C regagne le nord de la côte Est. La côte Ouest de la Grande-Terre reste à 24°C.
- la carte du 21 novembre : presque toute la côte Est de la Grande-Terre est baignée par des températures de 27°C alors que la côte Ouest est à 25°C.
- la carte du 29 décembre : un upwelling est présent dans la partie Sud-Ouest de la Grande-Terre. Le contraste entre la côte Est et la côte Ouest atteint ici 3 à 4°C. Cette carte montre également les problèmes liés aux corrections jour/nuit qui font apparaître les frontières entre les pavés de correction dans lesquels sont calculées les moyennes des images de jour et des images de nuit.

6.2.2. Comparaison avec les mesures

Résultats globaux

La base pour la validation des résultats est la comparaison des SST obtenues à l'issue du traitement des données satellitaires avec des mesures in situ.

On utilise deux types de mesures in situ:

- XBT : 302 mesures ont été sélectionnées sur la zone pour l'année 1998
- Thermo-salinomètres embarqués à bord des navires marchand : 20000 points au total en 1998.

On calcule le biais (moyenne des écarts) puis l'écart-type des écarts pour chaque type de données.

Le tableau suivant présente les résultats des comparaisons effectuées sur les XBT et les mesures de thermo-salinomètres (TS).

	N	Avr	Std
XBT	302	0.4	1.0
TS	38003	0.6	1.2

- Tableau 2 -

Résultats des comparaisons entre mesures in situ et calculs SST

N : nombre de valeurs, Avr : moyenne des écarts, Std : écart-type des écarts,

La première constatation est que **le biais global est non nul et positif : les températures calculées sont trop basses en moyenne de 0.6 °C.**

D'où provient ce biais?

On sait qu'il ne vient pas du calcul de la SST proprement dit : la calibration des coefficients du Split-window avait pour but d'ajuster les calculs aux mesures.

L'existence de ce biais est donc générée en aval du calcul de la SST.

Deux facteurs peuvent diminuer la température calculée :

- une mauvaise détection des nuages
- une mauvaise correction jour/nuit qui diminue de façon excessive les températures moyennées sur les images jour.

Programme ZoNéCo

La deuxième constatation est que l'écart-type est relativement important (1.2°C sur les mesures de thermosalinomètre, 1°C sur les XBT). Un résultat satisfaisant aurait été voisin de 0.5°C.

Si l'on examine la distribution des écarts, on s'aperçoit qu'il existe des valeurs aberrantes dans les SST. En effet une mauvaise détection des nuages peut générer des valeurs extrêmement froides. De même la correction jour/nuit peut être aberrante sur certains pavés. Ceci peut se produire lorsque la correction (le "delta-T" appliqué sur les images de jour sur un pavé donné) est calculée sur trop peu d'images.

Si ces valeurs aberrantes sont peu nombreuses, elles ont tout de même une influence sur la valeur de l'écart-type.

Examinons de plus près la distribution de l'erreur : le tableau suivant présente par classe d'erreur le nombre de données concernées ainsi que le biais et l'écart-type correspondant :

Ecart (°C)	% des données représentées	Avr	Std
< 5	99.3	0.6	1.1
< 4	98.1	0.6	1.0
< 3	95.8	0.5	0.8
< 2	89.0	0.4	0.7
< 1	67.6	0.2	0.4

- Tableau 3 -
Répartition de la valeur de l'erreur

On s'aperçoit que environ 90% des écarts sont inférieurs à 2°C et que l'écart-type correspondant est de 0.7°C (rms : 0.8°C), ce qui correspond à des résultats beaucoup plus acceptables et proches de ceux que l'on peut trouver dans la littérature.

Variabilité temporelle de l'erreur

La moyenne et l'écart-type des erreurs ont été calculés pour chaque mois sur les données de thermosalinomètres, les XBT étant trop peu nombreux pour un découpage temporel.

	N	Avr	Std
Janvier	3712	0.7	1.4
Février	3202	0.9	1.2
Mars	3501	0.9	1.0
Avril	2844	0.7	1.2
Mai	1342	0.8	1.1
Juin	4758	0.6	1.0
Juillet	748	0.7	1.3
Août	3225	0.0	0.7
Septembre	3710	0.3	1.1
Octobre	3499	0.4	1.0
Novembre	3490	0.6	1.2
Décembre	3972	1.2	1.1

- Tableau 4 -
Variabilité mensuelle de l'erreur

Les erreurs ne sont pas constantes dans le temps. Le biais est toujours positif. Le faible nombre de valeurs en juillet est expliqué par l'absence de cartes entre le 1er et le 15 juillet.

Il semble que les résultats soient meilleurs en hiver (juin, août, septembre, octobre, à l'exception du mois de juillet non significatif car représenté par beaucoup moins de données que les autres mois) qu'en été (novembre à mai). Les meilleurs résultats sont obtenus en août : biais nul et écart-type de 0.7°C.

Cependant il est prudent de ne tirer aucune règle générale sur l'évolution saisonnière de ces résultats car :

- il existe une variabilité interannuelle forte dans la région : l'année 1998 est particulière du point de vue climatologique : événements El Nino puis La Nina. Les températures entourant la Nouvelle-Calédonie ne sont pas descendues en dessous de 24°C au mois d'Août, ce qui est chaud dans une région où les températures peuvent atteindre 20°C en hiver.
- la qualité de réception des images est aléatoire dans le temps. Malheureusement, le nombre moyens d'images traitées par mois ne fut pas gardé en mémoire mais il est sans doute un paramètre important dont il faut tenir compte pour expliquer la qualité des résultats.

Variabilité spatiale de l'écart

On étudie la variabilité zonale et méridienne de l'erreur par bandes et colonnes de 5° (4 colonnes en longitude et 3 colonnes en latitude).

	N	Avr	Std
14°S-19°S	4056	1.0	1.0
19°S-23°S	32586	0.6	1.2
23°S-27°S	1353	0.2	0.8

- Tableau 5 -
Variabilité zonale de l'erreur

	N	Avr	Std
155E-160E	2299	0.5	1.0
160E-165E	4594	1.0	0.9
165E-170E	25992	1.2	1.4
170E-175E	5126	0.5	0.8

- Tableau 6 -
Variabilité méridienne de l'erreur

La conclusion de ces résultats est que l'erreur ne dépend pas de la zone géographique concernée.

7. Conclusion

Ce travail avait pour but de figer dans une première version puis de valider un algorithme de traitement d'images NOAA/HRPT pour la production quotidienne de cartes de SST sur la zone économique de Nouvelle-Calédonie. Une calibration des coefficients du Split-Window fut d'abord effectuée puis un rejeu des images de l'année 1998 a permis de mettre en évidence les qualités et les défauts de l'algorithme, d'estimer quantitativement et qualitativement l'erreur de calcul.

Les conclusions positives que l'on peut tirer de cette étude sont les suivantes.

- L'algorithme Split-Window utilisé a été validé : la précision de la SST restituée (hors synthèse temporelle et correction jour/nuit) est de 0.3°C. La calibration a annulé le biais qui existait sur les valeurs SST de NOAA 12, elle a eu très peu d'effet en revanche sur la valeur de l'écart-type.
- Le filtre nuageux mis au point s'applique aux images de jour comme de nuit et s'affranchit d'une climatologie. Comme tous les filtres nuageux, il n'est pas parfait et sur une zone qui reste nuageuse pendant la durée de la synthèse, le filtre peut laisser passer des valeurs. Il est réglé sur 4 paramètres. Les valeurs de ces paramètres sont restées inchangées sur la durée du rejeu (année 1998). Il ne semble pas nécessaire de les adapter selon la saison.
- La synthèse temporelle sur 5 jours incluant les images de jour et de nuit est suffisante pour couvrir toute la zone dans des conditions météorologiques normales.

Programme ZoNéCo

- Le rejeu des images archivées de l'année 1998 permettra une analyse océanographique sur la structure thermique de l'océan superficiel de la région. Elle permettra entre autres de mettre en évidence l'évolution saisonnière, la dynamique des fronts thermiques et des tourbillons méso-échelles, l'apparition puis la disparition des upwellings le long de la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie, la présence d'une zone froide liée à une gyre dans la partie Sud-Est de la zone, etc.

Les résultats numériques des comparaisons entre le calcul et les mesures mettent peu en valeur ces résultats : il existe un biais positif de 0.5°C entre calculs et mesures, c'est-à-dire que la température calculée est en moyenne trop basse. L'écart-type des erreurs est de 1.2°C. Mais la répartition des erreurs révèle que 90% des erreurs correspondent à un écart-type de 0.7°C. Cette précision est tout à fait comparable à celle présentée dans la littérature.

L'erreur de calcul provient de 2 facteurs : d'une part l'efficacité du filtre nuageux, d'autre part la qualité de réception des images pour des corrections jour/nuit fiables. Ces deux facteurs sont la cause essentielle de l'existence de valeurs aberrantes et de l'existence d'un biais positif entre mesures et calculs. Un autre facteur intervient également dans la qualité des résultats de la chaîne opérationnelle : les "bogues" intervenant dans le logiciel de navigation. Ces "bogues" se manifestent par le "dérappage" de certaines images qui ont été éliminées lors du rejeu mais qui ne le sont pas dans la chaîne opérationnelle.

Les améliorations doivent porter sur les points suivants.

- La correction jour/nuit. L'algorithme de correction jour/nuit constitue le point faible de l'algorithme. Le problème posé n'est en effet pas simple et un travail est nécessaire sur ce point.

- L'élimination des points aberrants dus à une mauvaise détection nuageuse ou à une mauvaise correction jour/nuit par comparaison avec la valeur du jour précédent : gradient maximum (augmentation ou diminution) à ne pas dépasser (problème du seuil à définir).

- Le suivi quotidien de la qualité des images et éventuellement l'élimination des images présentant trop de défauts de réception ou bien mal naviguées.

- L'amélioration de la réception des images.

- L'intégration de NOAA15.

- Le logiciel de navigation comporte des « bogues » et n'est pas fiable. Certaines images sont mal naviguées. Ce logiciel devra à court terme être remplacé.

- La prise en compte des corrections atmosphériques.

Références

Barton, I.J., *Satellite-derived sea surface temperatures : Current status*, J. Geophys. Res., 100, C5, 8777-8790, 1995.

Yu, Y. and Barton, I.J., *A non-regression-coefficients method of sea surface temperature retrieval from space*, Int. J. Remote Sensing, 15, 6, 1189-1206, 1994.

Brisson, A., Le Borgne, P., Marsoin, A., *Development of algorithms for SST retrieval at O&SI SAF Low and Mid Latitudes*, Document Météo-France disponible par ftp anonymous (ftp.meteo.fr, pub/safo/algosst2.doc), Février 1998.

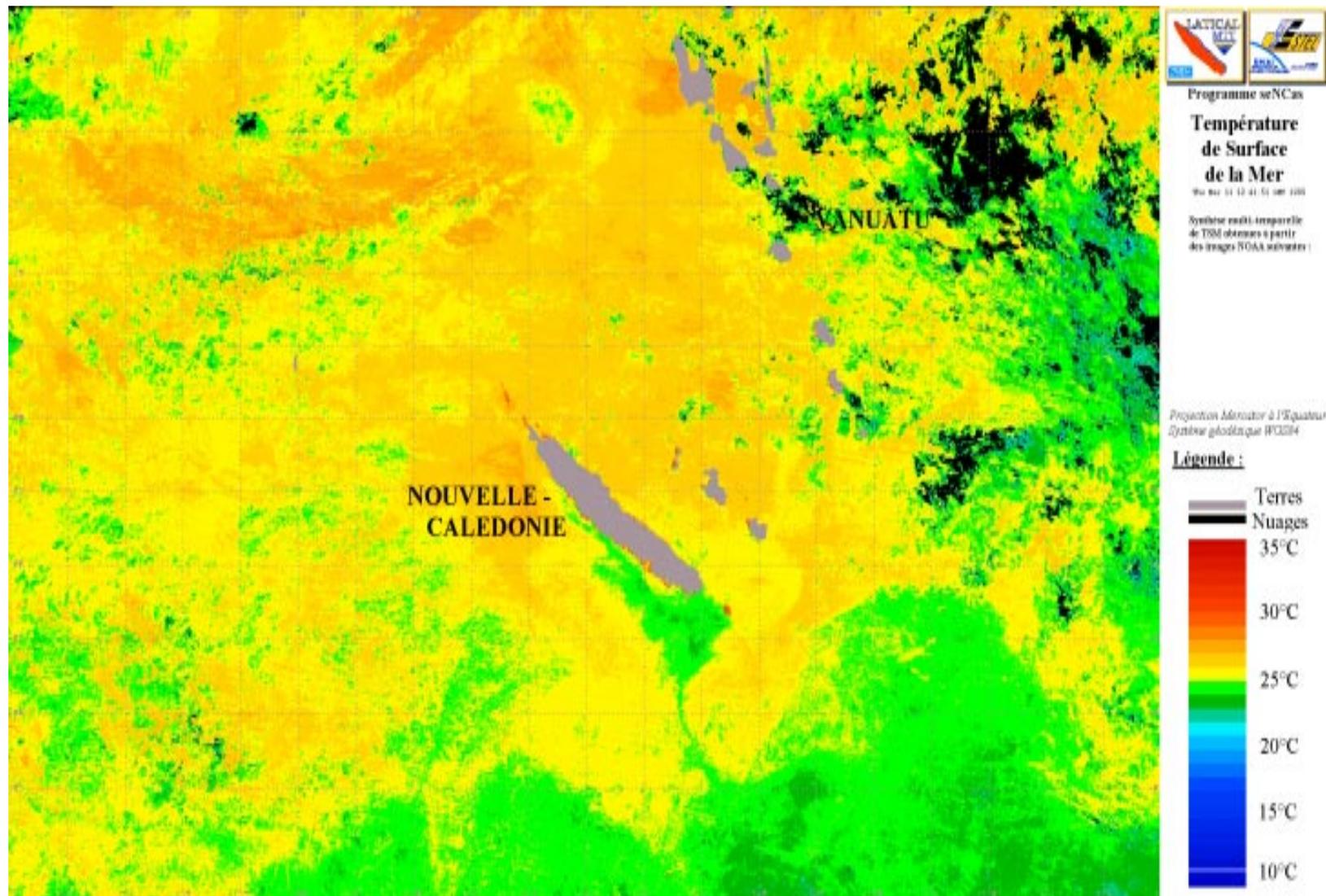
Antoine, J.Y., Derrien, M., Harang L., Le Borgne, P., Le Gléau, H., Le Goas, C., *Errors at large satellite zenith angles on AVHRR derived sea surface temperatures*, Int. J. Remote Sensing, 13, 9, 1797-1804, 1992.

Derrien, M., Harang, L., Le Gléau, H., Noyalet, A., Pochic, D., Sairouni, A., *Automatic cloud detection applied to NOAA-11/AVHRR Imagery*, Remote Sens. Environ. 46:246-267, 1993.

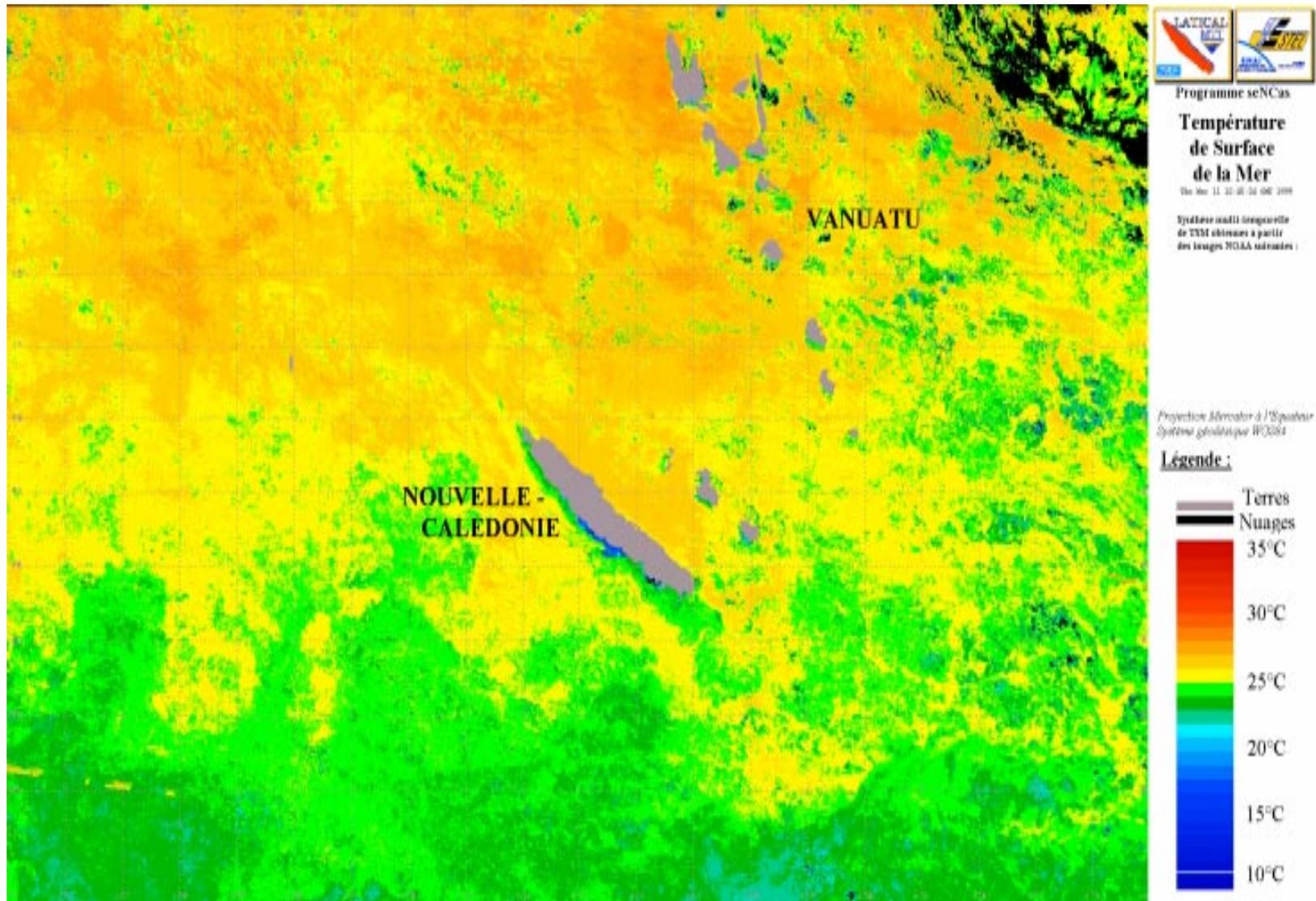
Wick, G.A., Emery, W.J., Schluessel, P., *A comprehensive comparison between satellite-measured skin and multichannel sea surface temperature*, J. Geophys. Res., 97, C4, 5569-5595, 1992.

Annexe

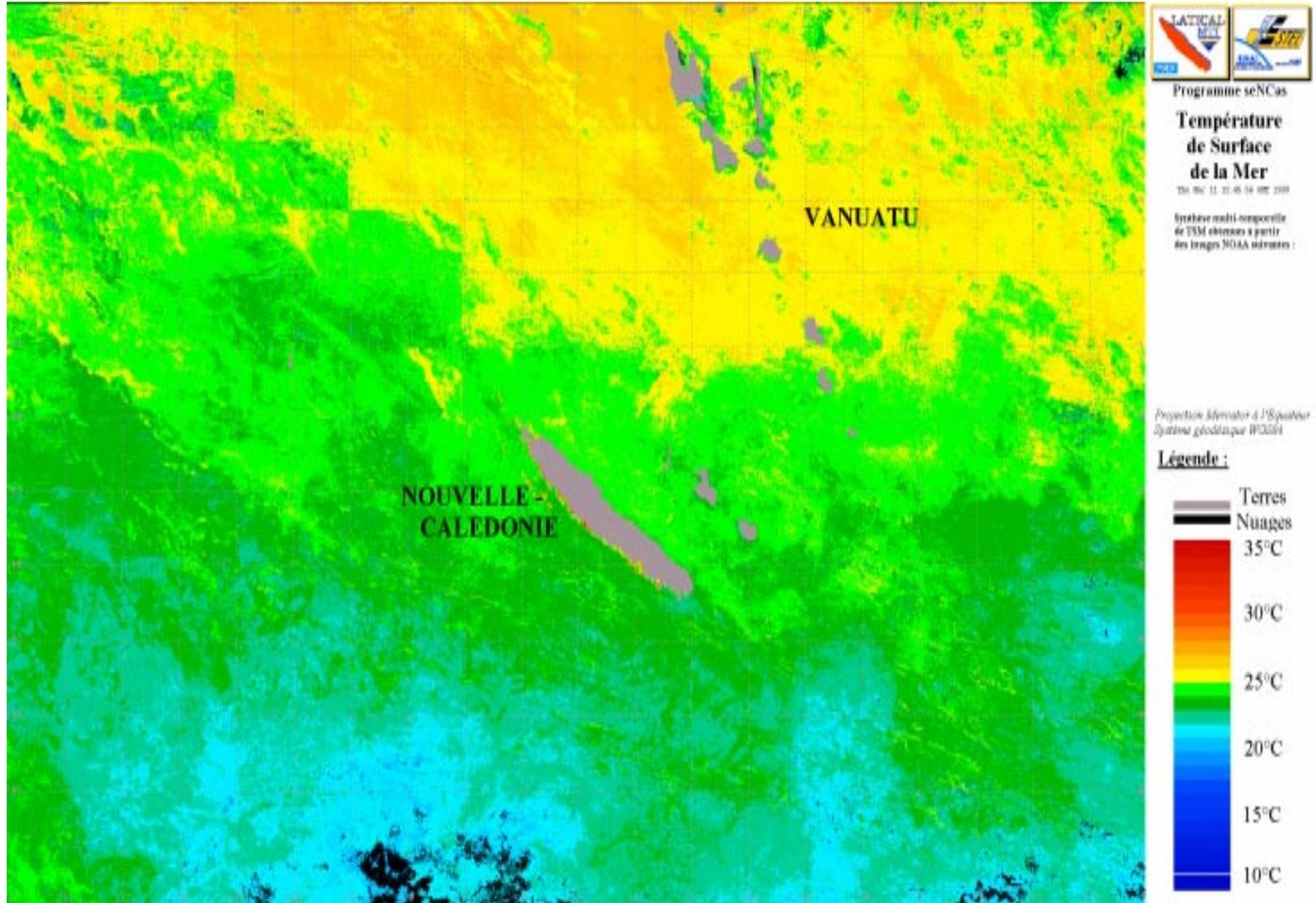
Arborescence des programmes et données



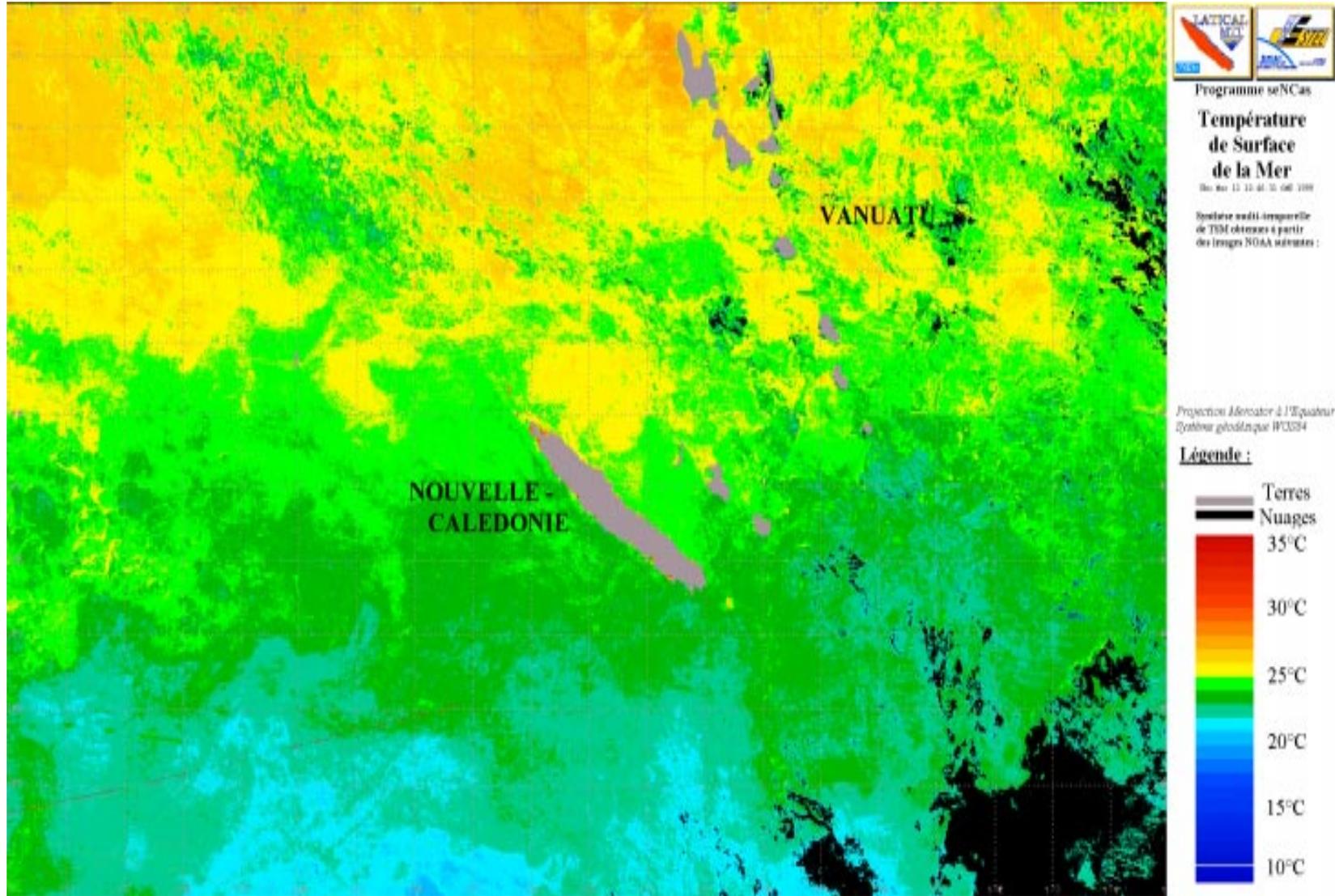
13-jan-1998.ras



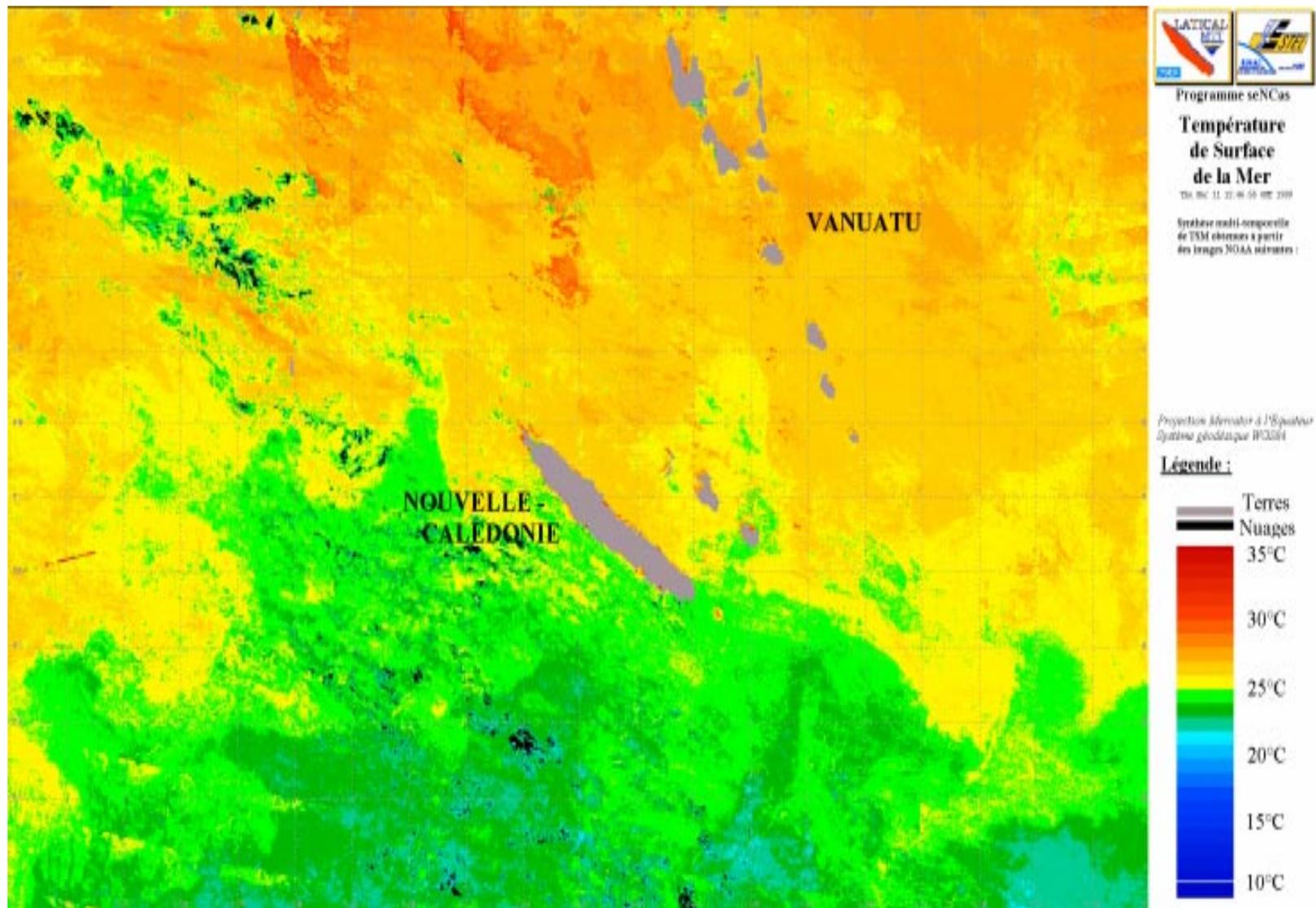
29-mai-1998.ras



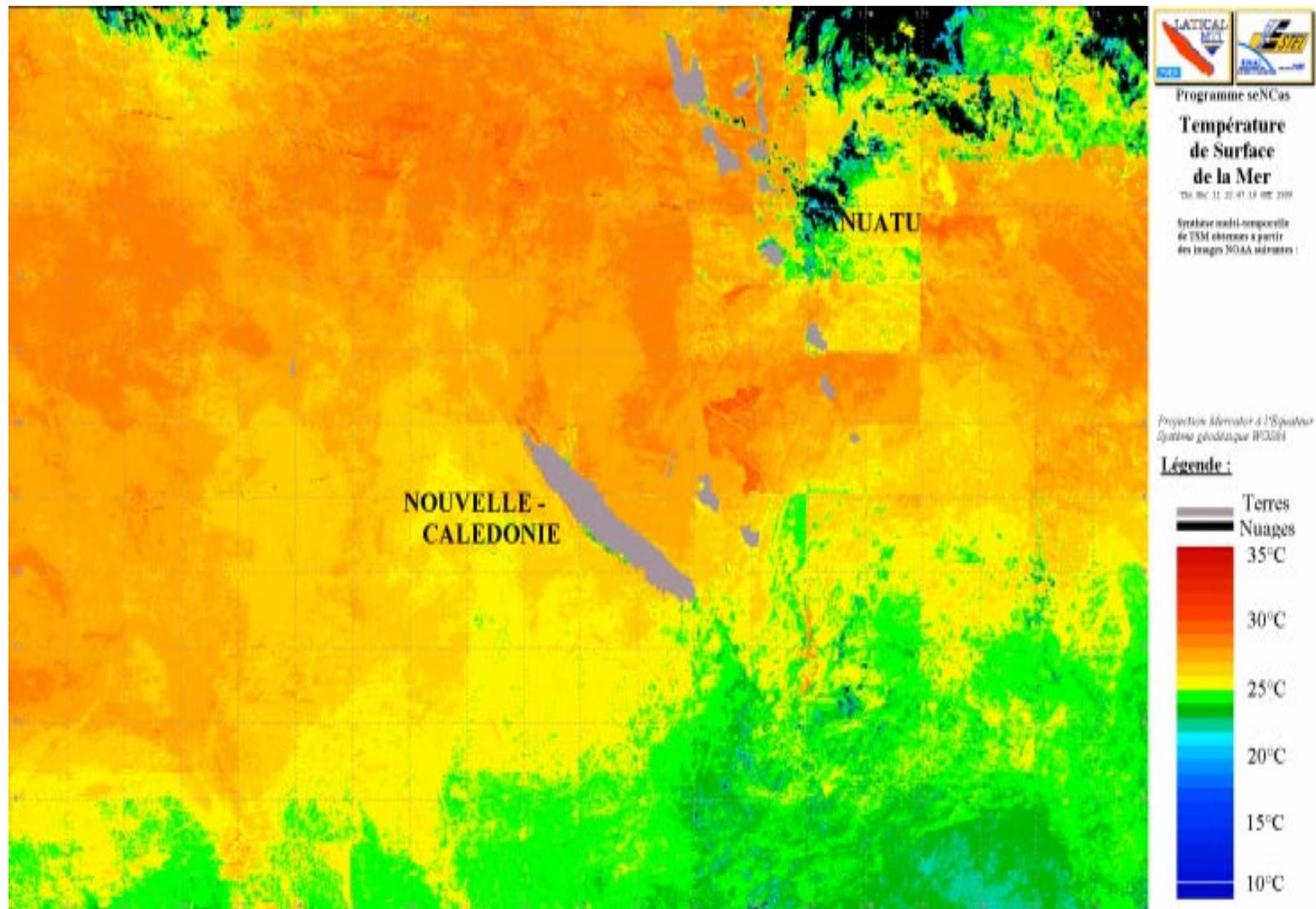
20-aou-1998.ras



30-sep-1998-ras



21-nov-1998.ras



29-dec-1998.ras