

B.1 MicMac, un logiciel pour la mise en correspondance automatique d'images dans le contexte géographique

Marc Pierrot Deseilligny

Introduction

Le calcul automatique de correspondances à l'intérieur d'un ensemble d'images semblables est un problème qui intervient, sous de nombreuses modalités, dans le traitement géométrique des images. C'est notamment le cas dans le domaine de la cartographie où l'image n'a de valeur qu'à partir du moment où l'on peut géo-référencer les informations qu'elle contient.

Pour chaque typologie de mise en correspondance rencontrée en cartographie, la littérature propose, en général, de nombreuses solutions. À l'Institut Géographique National (IGN), des solutions opérationnelles *ad hoc*, différentes pour chaque catégorie de problème, ont été mises en œuvre dans les Services de production. Cependant, compte tenu de la diversité apparente des problèmes, il n'existait pas d'approche unique.

Dans le contexte de soutien à la recherche en traitement d'images à l'IGN, a émergé le besoin d'un outil fournissant une solution générale aux principales applications cartographiques de mise en correspondance.

Cet article présente les principales caractéristiques de *MicMac* (Multi-Images Correspondances, Méthodes Automatiques de Corrélation), un logiciel développé à l'IGN dans l'objectif de fournir une solution unifiée permettant de répondre à la majorité des problèmes de calcul de correspondance rencontrés en cartographie.

Ce logiciel, développé initialement pour les besoins internes du laboratoire MATIS, a été depuis, utilisé dans plusieurs Projets de développement. Depuis juin 2007, il est diffusé en tant que logiciel libre (open source).

Le calcul des correspondances en cartographie

Grille d'analyse

Ce paragraphe fait un rappel des principaux problèmes de mise en correspondance rencontrés concrètement dans la production de données géo-référencées. Ces problèmes sont analysés en fonction de leurs spécificités intrinsèques et non en fonction des solutions habituellement déployées pour les résoudre. On pourra, par exemple, consulter [SCHARSTEIN 02] pour trouver une taxonomie des principales approches proposées par la littérature.

Les principales caractéristiques intrinsèques permettant de spécifier une application de mise en correspondance sont :

- connaissance *a priori* sur le « terrain » : est-il raisonnablement continu, dérivable, conduit-il à générer des parties cachées ?
- connaissance *a priori* sur la géométrie : notamment, est-ce un problème monodimensionnel (la projection-image d'un point-objet est recherché sur une courbe) ou bidimensionnel ?
- connaissance *a priori* sur la solution : l'incertitude sur la position de chaque point est-elle de 1, 10, 100 ... pixels ?
- connaissance *a priori* sur la radiométrie : notamment, doit-t-on s'attendre à des variations de luminosité, de contraste entre objets homologues ?
- type de prise de vue : chaque point est-il vu sur 2, 3, ... N images (stéréo simple ou multi stéréo) ? Quel est le rapport base sur hauteur (B/H) ?
- exigence sur la solution : a-t-on besoin d'une précision de 1, 1/2, 1/10 ... de pixel ?

Calcul de MNT en zone rurale

Il s'agit de l'archétype du problème de mise en correspondance à des fins cartographiques, illustré en figure B.1.1, page suivante, voir [MASSON 84], [JULIEN 90]. On dispose d'un couple d'images à moyenne résolution (deux à dix mètres), en zone rurale, mis en géométrie épipolaire et l'on désire calculer un modèle numérique de terrain.

Il s'agit d'un problème monodimensionnel de stéréo simple. On fait généralement l'hypothèse que le terrain est continu. La précision recherchée est typiquement du demi pixel, l'incertitude initiale est de quelques centaines de pixels. La luminosité et le contraste sont susceptibles de varier. Le B/H est, si possible, élevé (supérieur à 0,5).

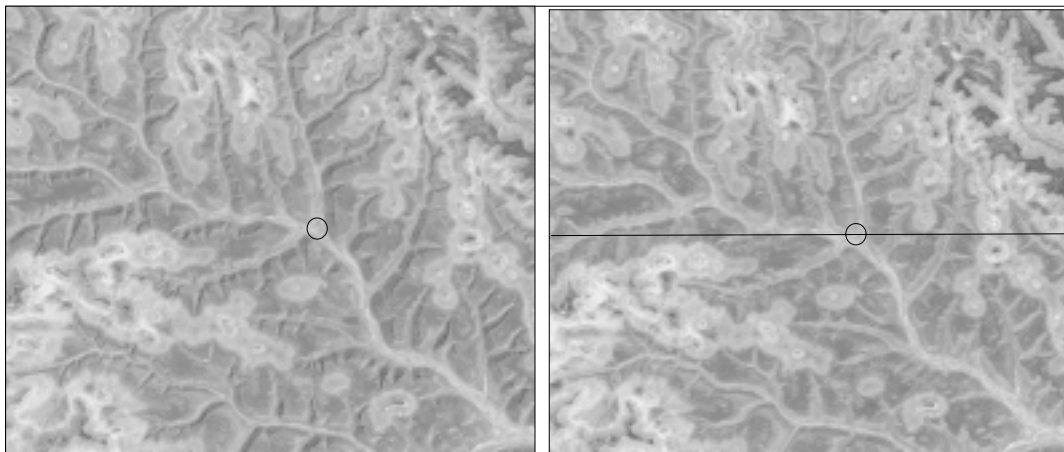


figure B.1.1

Calcul de MNT en zone rurale sur un couple d'images en géométrie épipolaire, l'homologue d'un point de l'image gauche (en rouge) est recherché sur la ligne homologue dans l'image droite.

Calcul de MNE en zone urbaine

C'est un problème qui a pris une importance croissante, ces dernières années, avec l'émergence des modèles 3D urbains haute résolution où le calcul d'un modèle numérique d'élévation sous forme de grille régulière est souvent un préalable au calcul des modèles **vecteur**, voir [FLAMANC 05], [BREDIF 07], [LAFARGE 07].

Par rapport au problème précédent, pour une mission typique, les principales différences sont :

- le terrain n'est plus que continu par morceaux ;
- il s'agit de missions « hautement » **multi-stéréoscopiques**, chaque point est vu sur au moins quatre images (exemple sur la **figure B.1.2**, ci-dessous) ;
- le B/H est souvent faible (entre 0,1 et 0,2) ;
- la précision visée est de l'ordre du 1/4 de pixel (en tirant bénéfice de l'aspect **multi-stéréoscopique** et pour compenser le B/H faible).

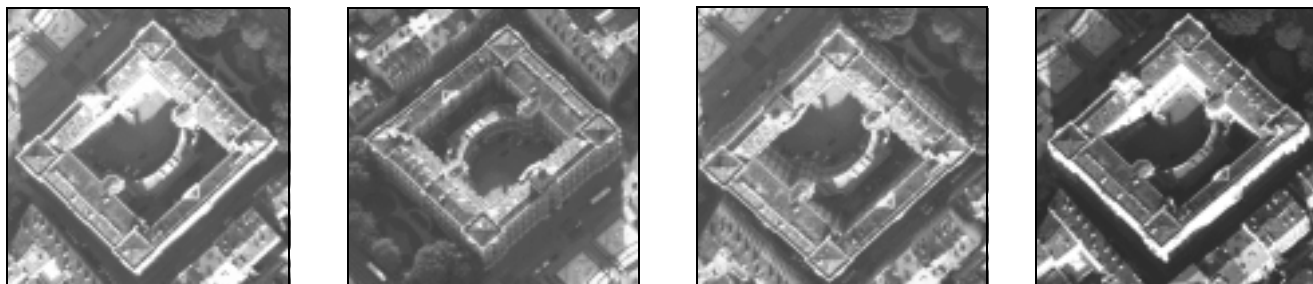


figure B.1.2

*Mission **multi-stéréoscopiques** sur la ville de Marseille.
Quatre des douze images **montrant** la Préfecture sous différents angles.*

Superposition d'images **multi canaux**

On dispose de N images de la même scène correspondant à différentes parties du spectre électromagnétique. Leur exploitation nécessite une superposition meilleure que ce que fournit la localisation instrumentale. C'est un problème qui existe depuis plusieurs dizaines d'années en imagerie spatiale et qui est apparu en imagerie aérienne avec le développement des caméras numériques, par exemple : [PAPARODITIS 06].

Les caractéristiques de ce type de problème sont :

- précision cible très grande (inférieure au 1/10 de pixel) et incertitude initiale faible (quelques pixels) ;
- problème bidimensionnel, modèle de déformation très régulier C^1 à C^∞ , **voir modèle analytique** [ref CamNum] utilise des homographies) ;
- très forte variation de luminosité et de contrastes entre bandes spectrales.



figure B.1.3

Extrait des différents canaux de la **quadri-caméra** du laboratoire OEMI sur une même scène.

Calcul de points de liaisons

C'est un problème très courant en imagerie spatiale (spatio-triangulation) et aérienne (aéro-triangulation). On dispose de plusieurs images qui sont imparfaitement localisées et on recherche des points homologues entre les images pour consolider leur géo-référencement. Généralement, on cherche quelques centaines de points disposés de manière plus ou moins aléatoire et ce problème n'est alors pas vu comme un problème d'appariement dense. Cependant, au prix d'un éventuel accroissement du temps de calcul, rien n'empêche de calculer des points homologues sur une grille régulière.

Les spécificités de ce problème d'appariement sont alors :

- il s'agit d'un appariement bidimensionnel fortement asymétrique. En effet, on suppose que l'on dispose d'une orientation approchée et les directions épipolaires directes jouent un rôle très différent des directions épipolaires transverses (les lignes orthogonales aux épipolaires directes) ;
- dans la direction épipolaire directe, la connaissance *a priori* est liée au terrain. La solution recherchée est continue ou continue par morceaux, l'incertitude initiale est de quelques centaines de pixels et la précision cible du 1/2 pixel ;
- dans la direction épipolaire transverse, la connaissance *a priori* est liée à l'erreur sur la localisation *a priori*. La solution recherchée est dérivable, l'incertitude initiale est de quelques pixels et la précision cible du 1/10 pixel.



figure B.1.4

Quelques points de liaison extraits d'un couple stéréoscopique.

De nombreux autres problèmes et variantes

Les exemples précédents correspondent aux problèmes les plus fréquemment traités à l'IGN, ces dernières années. Sans prétendre être exhaustif, on peut citer rapidement comme autre type de problèmes de mise en correspondance :

- détection de mouvement sur des ouvrages d'art à partir d'images d'une caméra fixe : la difficulté de ce problème vient des variations d'éclairement ;
- mise en correspondance d'images d'une scène plane prise de différents points de vue pour la calibration d'une caméra. Ce problème s'apparente à la superposition d'images **multi-canaux** (déformation « molle »). On cherche une précision plus grande mais il y a moins de problèmes de variabilité radiométrique ;
- de nombreuses variantes sur les problèmes précédents, notamment : calcul de points de liaison et cartes de profondeur à partir d'**images prises** de capteurs divers : véhicule terrestre, drone basse altitude ..., la résolution et le type de scènes pouvant poser des problèmes spécifiques (par exemple : objets mobiles sur les scènes terrestres).

Le **tableau B.1.1**, ci-dessous, dresse un récapitulatif des caractéristiques intrinsèques de ces problèmes.

tableau B.1.1

Récapitulatif des caractéristiques intrinsèques des principaux problèmes de mises en correspondance rencontrés en cartographie.

*De haut en bas : Modèles Numériques de Terrain, Modèles Numériques d'Élévation, superposition **multi-canaux**, points de liaisons (épipolaires directs et transverses), détection de mouvement, auto-calibration.*

	Dimension	Régularité	Incertitude(pixel)	Précision (pixel)	Var Radiom	Nb Images
MNT	1	C0	> 100	½	Oui	2
MNE	1	C0 / morceaux	> 100	¼	Oui	N
Superposition	2	C2	1 à 10	1/10	Oui, très forte	2
PL direct	2	C0	> 100	½	Oui	2
PL transverse	2	C2	1 à 10	1/10	Oui	2
Détec. mvt.	2	??	??	1/10	Oui, très forte	2
Auto-calib.	1	C2	1 à 10	1/10	Oui, faible	2

Description

Choix d'une approche unifiée paramétrable

La mise en correspondance d'images homologues joue un rôle essentiel dans la production d'images géo-référencées. Le paragraphe précédent a rappelé les principaux problèmes couramment rencontrés. Malgré leur diversité, de nombreuses caractéristiques se retrouvent dans plusieurs des problèmes décrits et justifient, au moins dans le contexte d'un laboratoire de recherche, le choix d'une approche unifiée par rapport à l'utilisation de quatre ou cinq solutions spécifiques.

Citons les principales caractéristiques partagées :

- MNT et MNE ne diffèrent principalement que par le nombre d'images et l'*a priori* sur le terrain ;
- superposition **multi-canal** et superposition d'images planes ne diffèrent essentiellement que par la variabilité radiométrique ;
- le problème des points de liaison qui est en partie un mélange des deux classes de problèmes précédents ;
- l'ensemble de problèmes qui doivent prendre en compte des variabilités radiométriques dans les mesures de ressemblance.

Inversement, le plus petit dénominateur commun aux problèmes du **tableau B.1.1** se limite à deux aspects : existence de variation radiométrique et solution continue par morceaux. Pour tenir compte des synergies potentielles tout en couvrant l'étendue des problèmes rencontrés, le logiciel *MicMac* est donc conçu comme une boîte à outils fournissant un ensemble d'algorithmes que l'utilisateur peut enchaîner *via* un fichier texte de paramètres (suivant la syntaxe XML). Cet aspect « boîte à outils hautement paramétrable » vise à apporter la souplesse et la **généricité** nécessaire à un outil de recherche. La contrepartie est une relative complexité (il faut maîtriser les spécifications des briques élémentaires), ce qui n'est pas trop pénalisant dans le cadre de l'utilisation en laboratoire.

Tronc commun algorithmique

Cette partie décrit les principes qui sont communs à toutes les utilisations de *MicMac*.

Quantification et discrétisation

Les méthodes de mise en correspondance d'images peuvent être classées en deux grandes catégories :

- les approches discrètes dans lesquelles les espaces objets sont discrétisés et les espaces de parallaxes sont quantifiés. Ces approches utilisent généralement des méthodes d'optimisation combinatoire. Elles sont capables de trouver un optimum global exact de la solution et elles sont bien adaptées aux cas où l'on ne dispose pas d'une initialisation proche de la solution (incertitude forte) ;
- les approches continues dans lesquelles les espaces de parallaxes ne sont pas quantifiés : elles utilisent généralement des méthodes variationnelles de type descente de gradient. Ces méthodes sont bien adaptées aux

cas où les solutions recherchées sont différentiables, l'incertitude initiale est faible et la précision recherchée est grande.

La majorité des problèmes rencontrés en **cartographie** recherchent des solutions non différentiables. Par ailleurs, même lorsque les solutions sont différentiables, on ne dispose pas toujours d'une solution initiale suffisamment précise pour utiliser directement des méthodes variationnelles et il faut préalablement **s'approcher** de la solution par une **approche** combinatoire. C'est pourquoi, actuellement, *MicMac* utilise uniquement des approches discrètes. À chaque étape est donc défini un pas de discrétisation de l'espace objet et de quantification de l'espace des parallaxes.

Approche **multi-résolution**

MicMac utilise une stratégie **multi-résolution** qui permet de limiter la combinatoire et rend, en général, l'appariement plus robuste.

Cette stratégie, assez classique, est la suivante :

- on calcule une pyramide de N images de résolution 2^K $K \in [1; N]$;
- à la plus basse résolution, on recherche une solution en explorant tout l'intervalle d'incertitude (cet intervalle initial est un paramètre utilisateur) ;
- à l'étape courante, de résolution 2^K , on utilise l'étape précédente, de résolution 2^{K+1} , comme un prédictor permettant de limiter la combinatoire de la manière suivante : on met la solution de résolution 2^{K+1} à l'échelle de celle de résolution 2^K , puis à partir de paramètre utilisateur de dilatation planimétrique et altimétrique, on calcule deux nappes englobantes qui encadrent la recherche.

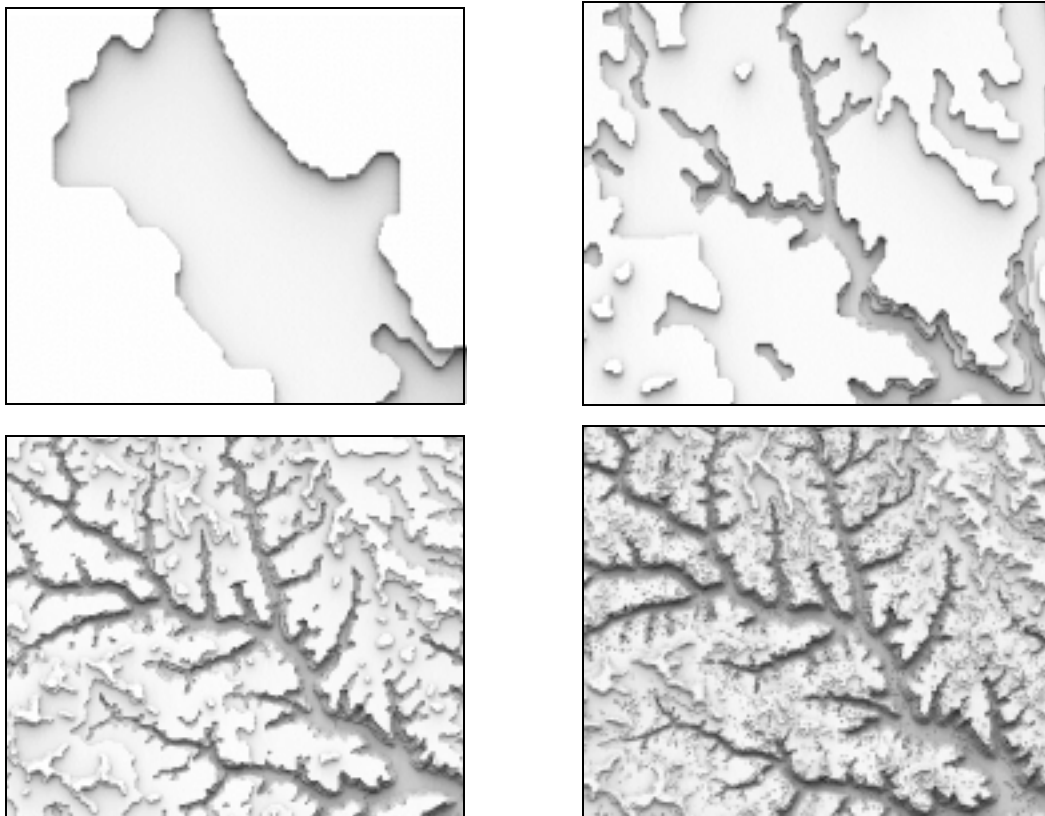


figure B.1.5

Comportement **multi-résolution** de MicMac.
MNT obtenus sur les images de la **figure B.1.x** (page XX) à résolutions 8, 4, 2 et 1.

Approche énergétique

Pour rechercher une surface qui satisfasse aux connaissances *a priori* de régularité tout en étant cohérente avec l'attache aux données (c'est-à-dire qui apparie des points qui se ressemblent), *MicMac* utilise une approche énergétique.

On recherche un champs de parallaxe P_x qui soit le minimum d'une fonction d'énergie définie par :

- $E(P_x) = \sum A(x, y, P_x(x, y)) + \alpha * F(G(P_x))$

où :

- P_x est la fonction de parallaxe inconnue recherchée ;
- $A(x, y, P_x(x, y))$ est le terme d'attache aux données représentant la dissemblance entre les images au point de projection (x, y, P_x) ;
- $F(G(P_x))$ est une fonction positive qui dépend des variations de P_x . C'est le terme de régularisation qui permet d'exprimer la connaissance *a priori* sur la régularité du relief ;
- α est un paramètre permettant de pondérer l'importance relative de l'attache aux données et de la régularisation.

Pour minimiser cette fonctionnelle, plusieurs algorithmes sont proposés par *MicMac*. Un algorithme de coupe minimale est proposé : il calcule le minimum exact mais a l'inconvénient d'être assez lent et non utilisable sur les problèmes bidimensionnels. Il est aussi proposé un algorithme de programmation dynamique qui ne calcule qu'un pseudo optimum mais a l'avantage d'être plus rapide, généralisable aux problèmes bidimensionnels et plus souple sur les fonctions d'énergie.

Terme de régularisation

Le terme $F(G(P_x))$ est essentiellement un schéma de discrétisation de la norme du gradient. D'une part, il est bien adapté aux fonctions continues par morceaux (ce qui est le plus petit dénominateur commun des problèmes traités) et, d'autre part, c'est le seul facilement utilisable avec les algorithmes de coupe. Lorsque l'optimisation se fait par programmation dynamique, d'autres possibilités sont offertes : norme quadratique, solutions contraintes à être K-lipschitzienne. Il est prévu de rajouter, en post-traitement, des approches variationnelles permettant de calculer des énergies faisant intervenir des normes L2 sur les dérivées partielles.

Attache aux données

Comme critère d'attache aux données, *MicMac* utilise le coefficient de corrélation centré-normalisé entre imagerie. Cette mesure est bien adaptée au contexte cartographique (variation de luminosité et de contraste) car elle **invariante aux translation et homothétie** sur les radiométries locales. La définition de $Corr(I_1, I_2)$ est très classique lorsqu'il n'y a que deux images.

En **multi stéréoscopie**, avec N images, deux options sont offertes :

$$\begin{aligned} \bullet \quad Corr(I_1, \dots, I_N) &= \frac{\sum_{K=2, N} Corr(I_1, I_K)}{N-1} \quad Corr(I_1, \dots, I_N) = \\ \bullet \quad Corr(I_1, \dots, I_N) &= \frac{2 * \sum_{1 \leq k < l \leq N} Corr(I_k, I_l)}{N(N-1)} \quad Corr(I_1, \dots, I_N) = \end{aligned}$$

La première formule privilégie l'image B.1.???????? et est adaptée aux géométries où une image « maîtresse » joue un rôle privilégié. La deuxième formule fait jouer un rôle symétrique à toutes les images et est celle la plus généralement utilisée. *MicMac* utilise un algorithme permettant de la calculer en temps linéaire, en fonction du nombre d'images.

Principales options

En plus d'un certain nombre de paramètres globaux relatifs au terrain (emprise, incertitude ...) et à la prise de vue (géométries des images), *MicMac* permet, à chaque étape de l'approche **multi résolution**, de spécifier de nombreux paramètres dont, en particulier :

- la taille de la fenêtre de corrélation ;
- un type d'algorithme et les paramètres de régularisation ;
- les paramètres de dilatation fixant l'intervalle qui doit être exploré à partir de la prédiction de l'étape précédente ;
- un paramètre permettant de séparer la résolution des algorithmes de la résolution image (lorsque la solution attendue est très régulière, ce paramètre permet, à la fois, de gagner du temps et de forcer la régularisation) ;
- la possibilité de n'utiliser à une étape qu'un sous-ensemble des images disponibles.

Utilisation pratique

Le **chapitre précédent** a décrit les principales caractéristiques algorithmiques de *MicMac*, celui-ci décrit certaines caractéristiques de *MicMac* utiles dans le cadre d'une utilisation opérationnelle.

Gestion de la géométrie

Afin de traiter, de manière générique, toutes les géométries de prise de vue, celles-ci sont décrites sous forme de classes abstraites pures (selon la terminologie C++). Un objet de la classe abstraite « géométrie » doit décrire deux fonctions : localisation et localisation inverse.

La fonction de localisation $\pi^1(x, y, p_x)$ indique en quel point, un point terrain de coordonnées (x, y) et de parallaxe p_x , se projette dans l'image I.

Pour un couple d'images en géométrie épipolaire, avec parallaxe transverse, on a par exemple :

- $\pi^1(x, y, p_1, p_2) = (x, y)$, pour l'image « maitresse » ;
- $\pi^2(x, y, p_1, p_2) = (x + p_1 y + p_2)$, pour l'image « secondaire ».

Pour une image en géométrie conique, avec une focale F, un point principal (PP_x, PP_y) , un point de coordonnées terrain (x, y, z) et de coordonnées (x', y', z') dans le repère caméra, on aura : $\pi(x, y, z) = F * \frac{(x', y')}{z'}$

$$\pi(x, y, z) = F * \frac{(x', y')}{z'} + (pp_x, pp_y)$$

MicMac propose un certain nombre de classes prédéfinies correspondant aux modèles les plus courants. On peut rajouter de nouveaux modèles de capteurs en rajoutant dans le code source des nouvelles classes héritant de la classe abstraite « géométrie ». Il est aussi possible de rajouter en ligne un modèle de capteur en chargeant une librairie dynamique.

Aperçu d'un fichier de paramètres

Pour assurer une portée générale, le nombre de paramètres qu'est susceptible de prendre en compte MicMac est relativement important. Inversement un utilisateur n'utilise couramment que quelques un des paramètres existants et peut laisser à leur valeur par défaut la majorité des paramètres possibles. Un format de type fichier texte étiqueté est bien adapté à cette situation et, pour s'appuyer sur les standards, MicMac utilise le format XML.

La figure B.1.6, ci-dessous, est un extrait des principales sections d'un fichier de paramètres MicMac. Après différents chapitres décrivant le terrain et la prise de vue, on trouve une section *Section_MEC* décrivant la mise en correspondance. Cette section est essentiellement constituée d'une liste d'*EtapeMEC* fixant les différents étapes de la mise en correspondance, chacune se fait à une résolution fixée par *DeZoom* (la première étape, avec *DeZoom*=-1, fixe des valeurs par défaut commune aux suivantes et n'est pas exécutée).

<pre><ParamMICMAC> <Section_Terrain> <IntervAltimetrie> <ZIncCalc> 200 </ZIncCalc> <ZIncZonage> 0 </ZIncZonage> </IntervAltimetrie> <Planimetrie> <BoxTerrain> -200 -200 4300 4300 </BoxTerrain> </Planimetrie> </Section_Terrain> <Section_PriseDeVue > <Images > <ImPat> e.*.tif </ImPat> </Images> </Section_PriseDeVue></pre>	<pre> <Section_MEC > <EtapeMEC> <DeZoom > -1 </DeZoom> <SzW > 1 </SzW> <AlgoRegul > eAlgoCoxRoy </AlgoRegul> <ZRegul > 0.1 </ZRegul> <ZDilatAlti> 4 </ZDilatAlti> <ZDilatPlani> 4 </ZDilatPlani> </EtapeMEC> <EtapeMEC><DeZoom > 32 </DeZoom></EtapeMEC> <EtapeMEC><DeZoom > 16 </DeZoom></EtapeMEC> <EtapeMEC><DeZoom > 8 </DeZoom></EtapeMEC> <EtapeMEC><DeZoom > 4 </DeZoom></EtapeMEC> <EtapeMEC><DeZoom > 2 </DeZoom></EtapeMEC> <EtapeMEC><DeZoom > 1 </DeZoom></EtapeMEC> </Section_MEC> </ParamMICMAC></pre>
--	---

figure B.1.6

Un extrait de fichier de paramètres MicMac.

Gestion mémoire, découpage et calcul distribué

Les algorithmes utilisés par *MicMac* peuvent être assez gourmands en occupation mémoire, notamment les algorithmes de coupe. Dès que le chantier est important, il n'est donc pas possible de le traiter en un seul bloc. Pour traiter un chantier, *MicMac* utilise une technique classique de dallage : le chantier est découpé en dalles de taille raisonnable et chaque dalle est traitée l'une après l'autre, des marges sont ajoutées à chaque dalle pour éviter les effets de bords.

Un effet collatéral positif de ce système de dallage est que, à une résolution donnée, les calculs effectués sur chaque dalle sont indépendants les uns des autres et ils peuvent être effectués en parallèle. Par exemple : en utilisant le logiciel de calcul distribué *Condor*, *MicMac* a été utilisé sur un parc de vingt machines du laboratoire MATIS pour calculer, en quelques heures, un MNE de plusieurs GigaPixels.

Exemples d'utilisation

Cette partie d'article présente, sur quelques cas réels, comment le paramétrage de *MicMac* permet en pratique de traiter des problèmes variés de mise en correspondance.

Modèle numérique de Terrain

Le modèle numérique de terrain de la [figure B.1.6](#) a été calculé avec *MicMac*, à partir du couple stéréoscopique de la [figure B.1.1](#) (voir [page xx](#)), en utilisant le paramétrage de la [figure B.1.7](#) ([page suivante](#)). Le calcul de MNT en zone rurale à partir d'un couple en épipolaire **est un problème qui peut se faire** avec un jeu de paramètres assez simple. En effet, en première approximation, on peut considérer, en zone rurale, que le terrain naturel et l'image sont des objets invariants à l'intérieur d'une large plage d'échelles et les paramètres algorithmiques peuvent donc être laissés constants à tous les niveaux de résolution.

Le fichier de paramètres de la [figure B.1.7](#) commence donc par fixer un certain nombre de valeurs par défaut : taille de la fenêtre de corrélation, facteur de régularisation, type d'algorithme, largeur des dilatations altimétriques et planimétriques définissant les intervalles de recherche à partir du prédicteur de l'étape précédente. Ensuite, ce fichier de **paramètres** enchaîne une série d'étapes de résolutions croissantes qui reprennent l'ensemble des paramètres par défaut. Une description détaillée peut être trouvée dans [PIERROT 06].

Modèle numérique d'élévation Bâti-3D

Les images de la [figure B.1.2](#) ([page xx](#)) sont extraites d'une prise de vue **multi-stéréoscopique**, haute résolution (20 cm), sur la ville de Marseille, effectuée à une date très proche du solstice d'hiver dans le cadre du Projet Bati-3D. Le système de caméras Bati-3D utilisé est composé, d'une part, d'une **quadri-caméra** couleurs longue focale (100 mm), orientée verticalement, qui permet, **entre autres**, de générer une ortho-photo et, d'autre part, d'une paire de caméras panchromatiques longues focales à visée oblique permettant de voir les façades et d'obtenir un B/H donnant la précision en Z.

Le fait d'avoir des ruelles très étroites pose les difficultés suivantes :

- les fonds de rues sont très sombres, conduisant à un rapport « signal sur bruit défavorable », cet aspect est fortement amplifié par la date de prise de vue ;
- aux basses résolutions, les fenêtres **de corrélations**, même de taille faible (3x3) ont une largeur suffisante pour « faire le pont » entre deux gouttières opposées ;
- la fonctionnelle d'énergie décrite en 0 peut facilement boucher les rues étroites qui, à variation d'altitude donnée, génèrent une surface d'intégration faible pour le critère d'attache aux données ;
- enfin, les caméras obliques génèrent souvent des parties cachées et augmentent ainsi le rapport signal sur bruit dans l'appariement.

Compte tenu de ces difficultés, si l'on utilise, sur ces prises de vue, un paramétrage équivalent à celui de la génération de MNT, on obtient des résultats tels que ceux de l'image de gauche de la [figure B.1.7](#). En effet, dans des canyons urbains étroits et sombres, le gain en terme d'attaches aux données à passer par les fonds de rues est faible et *MicMac* préférera les boucher pour économiser le coût fixe sur l'*a priori* de régularité. Inversement, si l'on diminue trop la régularisation, les erreurs d'appariement génèrent un bruit haute fréquence.

Pour exploiter les caractéristiques de ces prises de vues, *MicMac* a été paramétré de la manière suivante dans le cadre de Bati-3D :

- aux basses résolutions, on ne met aucune régularisation et on n'utilise que les images verticales car ce sont celles qui voient les fonds de rues ;
- aux résolutions moyennes (ici à partir de 80 cm), une fois la solution « bloquée » en fond de rue, on rajoute très progressivement de la régularisation ;

- enfin, on termine par une étape à haute résolution dans laquelle on rajoute les caméras obliques pour donner une meilleure précision sur les toits.

L'image de droite de la **figure B.1.7** montre les résultats obtenus avec un tel paramétrage. Ces résultats sont ensuite utilisés comme entrée des algorithmes de reconnaissance de formes permettant de générer les modèles urbains du Projet Bâti-3D. D. Flamanc [FLAMANC 05] décrit les recherches ayant précédé le Projet Bâti-3D avec des prises de vues comparables à celle exposées ici.

Avec des paramétrages différents, *MicMac* a été utilisé pour produire des MNE urbains dans de nombreuses conditions. M. Bredif [BREDIF 07] utilise des MNE produits par *MicMac* sur des images à très grande échelle (10 cm) pour l'extraction de super structures (cheminées, lucarne...). F. Lafarge [LAFARGE 07] utilise des MNE produits par *MicMac* pour extraire des modèles urbains à partir de simulation d'images pléiades (50 à 70 cm de résolution, stéréoscopie limitée à trois images).

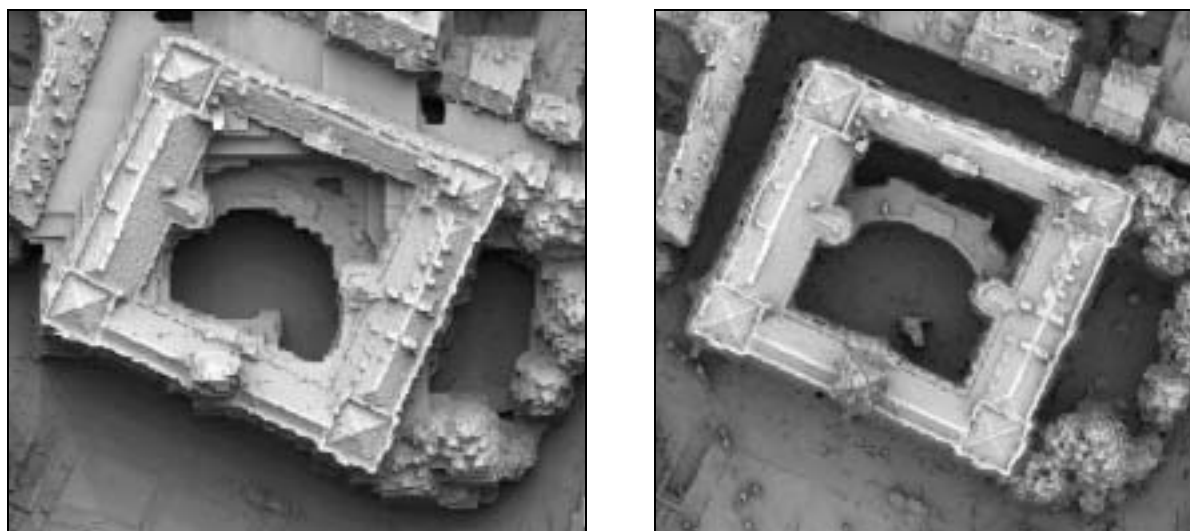


figure B.1.7

MNE sur mission **multi-stéréoscopique**.

À gauche avec un paramétrage standard, à droite, en ne régularisant et n'ajoutant les images obliques qu'à la fin.

Correction de mise en place et points de liaison

Le couple d'images de la **figure B.1.4 (page xx)** est extrait d'une mission expérimentale acquise à partir d'un drone hélicoptère. Les images sont centimétriques (1,5 cm). En plus de la caméra, le porteur a embarqué un système INS/GPS permettant d'obtenir un géo-référencement approché. La précision de ce géo-référencement instrumental est de quelques dizaines de centimètres, ce qui est un bon prédicteur mais ne permet pas une exploitation directe pour la mise en correspondance à la résolution des images.

Pour exploiter ce type de prise de vue, *MicMac* propose une géométrie permettant de calculer et corriger les défauts de mise en place. Plus précisément dans cette géométrie :

- la première image est une image maîtresse ;
- la « parallaxe » est constitué de deux valeurs : une parallaxe « normale » représentant un Z terrain et une parallaxe transverse, exprimée en pixel et représentant dans l'image secondaire un décalage dans la direction orthogonale à la droite de projection des rayons issu de l'image maîtresse.

On peut alors utiliser *MicMac* pour optimiser simultanément ces deux parallaxes et obtenir une mise en correspondance qui corrige les défauts de mise en place.

Une façon courante de procéder est de faire, à chaque résolution, deux étapes :

- une étape où seule la parallaxe transverse est libre. La régularisation est forte car les défaut de mise en place sont très basse fréquence ;
- une étape où seule la parallaxe directe (le Z) est libre, les paramètres y sont calculés en fonction de l'a priori sur le terrain.

La première ligne de la **figure B.1.8**, ci-dessous, représente les parallaxes directes et transverses obtenues de cette manière avec les images de la **figure B.1.4** (page xx) L'image de gauche représente le relief (en ombrage) et permet de confirmer la robustesse de la mise en correspondance, l'image de droite représente la parallaxe transverse et est effectivement basse fréquence.

Cette utilisation de *MicMac* permet d'exploiter directement un couple d'image, même lorsque le géo-référencement est imprécis, pour faire une carte de profondeur « en l'air » (au sens où par définition elle n'est pas géo-référencée). Ces résultats peuvent être aussi utilisés tels quels pour fournir des points de liaison « dense » en aéro-triangulation (ou spatio-triangulation). L'inconvénient de procéder serait d'avoir des calculs relativement lourds alors que seuls une toute petite proportion des points sont réellement utiles.

Pour alléger ce calcul, *MicMac* offre une option où des points d'intérêt sont sélectionnés automatiquement sur une grille régulière. L'image du bas de la **figure B.1.8** est un extrait de ces points d'intérêts (ici un point par carré **15*15**). La ligne du milieu de la **figure B.1.8** représente les parallaxes directes et transverses obtenues avec cette option. On voit que si la parallaxe directe est sensiblement de moins bonne qualité, la parallaxe est elle très comparable (à la résolution près) à celle obtenue en mise en correspondance dense.

Cette solution est actuellement celle utilisée pour la mise en place des images obliques par le Projet Bati-3D.

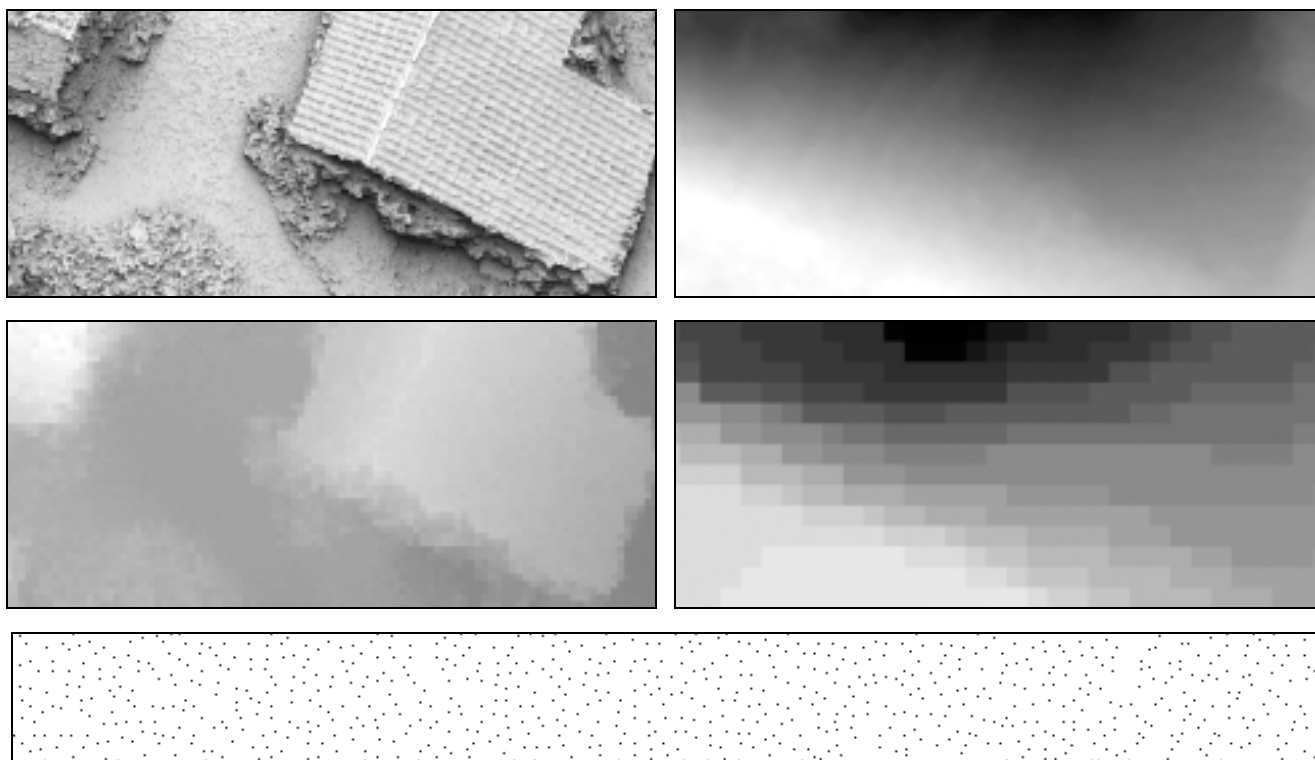


figure B.1.8

Utilisation de *MicMac* dans un contexte où le géo-référencement est imprécis sur les images de la **figure B.1.4** (page xx).

Première ligne : calcul de MNE, parallaxe directe (en ombrage) et transverse.

Deuxième ligne : points de liaisons, parallaxe directe et transverse.

Troisième ligne : extrait de masque des points de liaisons.

Superposition multi canal

Pour superposer avec *MicMac* des images issues de différents canaux, comme celle de la **figure B.1.3** (page xx), on peut utiliser la géométrie suivante :

- $\pi(x, y, p_x, p_y) = (x, y)$ pour l'image maîtresse (donc l'identité) ;
- $\pi(x, y, p_x, p_y) = \varphi(x, y) + (p_1, p_2)$ pour l'image secondaire où φ est un prédicteur (on choisit souvent une homographie, corrigée éventuellement de la distorsion).

Ensuite on peut, comme pour les points de liaisons, alterner des étapes pour optimiser l'une puis l'autre des parallaxes, la différence essentielle est que les deux parallaxes jouent un rôle symétrique avec une régularisation forte. Si le modèle général recherché est un modèle analytique, on peut, comme pour les points de liaisons, sélectionner un sous-ensemble de points d'intérêts pour accélérer les calculs.

La **figure B.1.9** (ci-dessous) illustre les résultats obtenus avec cette utilisation de *MicMac*.

Les résultats obtenus sur quelques dizaines d'images semblent satisfaisants. Cependant, contrairement aux exemples précédents, les tests n'ont pas dépassés le stade de la faisabilité.



figure B.1.9

Superposition entre deux canaux.

De gauche à droite : carte discrète de déformation (en X), modélisation analytique de la déformation, superposition rouge-vert-bleu, superposition avec l'infrarouge en fausses couleurs.

Conclusion

Cet article a présenté *MicMac*, un logiciel dont l'objet est de fournir une solution unifiée aux principaux problèmes de mise en correspondance rencontrés en cartographie. Ce logiciel a été testé pour le calcul de modèle numérique d'élévation, de modèle numérique de terrain, de points de liaisons et de superposition chromatique.

Sur ces différents points, avec le bon paramétrage, les solutions obtenues sont comparables aux solutions développées « *ad hoc* ». Les limitations attendues de cet outil sont qu'il est assez complexe à manipuler et que, pour certains problèmes, les temps de calculs peuvent être sensiblement plus longs que les solutions *ad-hoc*.

Compte tenu de ces avantages et inconvénients, nous pensons qu'il s'agit d'un outil bien adapté aux besoins des chercheurs. C'est aussi un outil qui peut être intégré dans une chaîne de production par des développeurs qui, sur un problème spécifique, bâtiront une sur-couche permettant d'en masquer le complexité. Il ne s'agit probablement pas d'un outil devant être utilisé directement dans une chaîne de production.

L'IGN a décidé de le déposer en logiciel libre, il peut être télécharger sur www.micmac.ign.fr.

Références

[MASSON 84] G. de Masson d'Autume : *Corrélation numérique d'images quelconque selon les lignes quasi-épipolaires, par approximations successives*, in *Bull SFPT* n° 95, 1984-3, 1984.

[SCHARSTEIN 02] D. Scharstein and R. Szeliski : *A Taxonomy and Evaluation of Dense Two Frame Stereo Correspondence Algorithms*, in *International Journal of Computer Vision*, IJCV 47(1):7-42, avril 2002.

Publications

[BREDIF et al 07] [M. Brédif](#), [D. Boldo](#), [M. Pierrot-Deseilligny](#) and H. Maître : *3D building reconstruction with parametric roof superstructures*, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing*, San Antonio (États-Unis), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-07-002-C-COM-DB, septembre 2007.

[FLAMANC 05] D. Flamanc and G. Maillot : *Evaluation of 3D city model production from Pleiades-HR images and 2D ground maps*, 3rd International symposium remote sensing and data fusion over urban areas (URBAN'05), Tempe, Arizona (États-Unis), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-05-008-C-COM-DF, 2005.

[JULIEN et al 90] P. Julien, M.-C. Perret and C. Wagner : *Production of Digital Elevation Models by Automatic Correlation of SPOT Stereoscopic Pairs*, International Symposium of ISPRS Commission IV, Tsukuba (Japon), 15-18 mai 1990, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-90-001-C-COM-PJ, 1990.

[LAFARGE et al 07] [F. Lafarge](#), X. Descombes, J. Zerubia and M. Pierrot Deseilligny : *3D city modeling based on Hidden Markov Model*, in *Proc. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, San Antonio (États-Unis), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-07-007-C-COM-DB, septembre 2007.

[PAPARODITIS et al 06] N Paparodits, J-P. Souchon, G. Martinoty and M Pierrot Deseilligny : *High-end aerial digital cameras and their impact on the automation and quality of the production workflow*, in ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (IJPRS), vol. 60, pp. 400-412, IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-06-033-C-ART-NP, septembre 2006.

[PIERROT et al 06] M Pierrot Deseilligny and N Paparodits : *A multiresolution and optimization-based image matching approach : an application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery*, in Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites), ISPRS, Ankara (Turquie), IGN, Service de la Recherche, laboratoire MATIS, IGN-SR-06-034-C-COM-MPD, 2006.