



HAL
open science

Étude de la valeur juridique des images de télédétection. Application à la délimitation virtuelle

André Gouyer

► **To cite this version:**

André Gouyer. Étude de la valeur juridique des images de télédétection. Application à la délimitation virtuelle. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-01702879

HAL Id: dumas-01702879

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01702879>

Submitted on 7 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE
présenté en vue d'obtenir
le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

André GOUYER

« Étude de la valeur juridique des images de télédétection.
Application à la délimitation virtuelle. »

Soutenu le 04 Juillet 2016

JURY

Président : M. Jean-Marie SEÏTÉ

Membres : M. Benoît HOUDRY, maître de stage
Mme. Élisabeth BOTREL, professeur référent
M. Laurent POLIDORI
Mme. Élisabeth SIMONETTO
M. Jean-Christophe MICHELIN
M. Jean SOMPAYRAC
M. Hervé YESOU

« Il faut toujours viser la lune, car même en cas d'échec,
on atterrit dans les étoiles »

Les mystères de l'Incompris

Oscar WILDE

Remerciements

Je tiens à remercier mon maître de stage M. Benoît HOUDRY de m'avoir accepté au sein de son cabinet pour la réalisation de ce Travail de Fin d'Étude (TFE). Je suis également reconnaissant pour son implication et pour les moyens de grande qualité mis à ma disposition. Je remercie également l'ensemble de son équipe pour l'accueil qu'ils m'ont réservé.

Je souhaite remercier mon professeur référent Mme Élisabeth BOTREL ainsi que M. Laurent POLIDORI qui m'ont accompagné tout au long de l'élaboration de cette étude. Leurs conseils, corrections, recadrages et avis m'ont permis d'aboutir à un résultat que je n'imaginais pas atteindre.

Je remercie l'ensemble des professeurs de ma formation à l'ESGT. La qualité de l'enseignement fourni et la facilité des échanges m'ont été d'un réel bénéfice.

Je tiens aussi à remercier les professeurs de mon cursus de BTS au lycée LE CAOUSOU et plus particulièrement Mme Magali BARRET-CASTAN qui s'implique fortement pour la réussite de ses étudiants.

Je souhaite enfin remercier l'ensemble de ma famille et de mes proches sans qui rien n'aurait été possible. Je leur serai toujours reconnaissant pour leurs soutiens et encouragements.

Liste des abréviations

3D : Trois dimensions.

ARB : Assistant Recherche Bénévole.

CCD : Charge Coupled Device.

CMOS : Complementary Metal Oxide Semi-conductor.

COP21 : 21ème COnférence des Parties.

C. Cass. : Cour de cassation.

C. Civ. : Code civil.

CIJ : Cour Internationale de Justice.

CNIL : Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés.

ESGT : École Supérieure des Géomètres et Topographes.

EXIF : EXchangeable Image file Format.

GNSS : Global Navigation Satellite Système.

GPS : Global Positioning Système.

IGN : Institut National de l'information Géographique et forestière

LIDAR : Light Detection And Ranging.

MNE : Modèle Numérique d'Élévation.

MNS : Modèle Numérique de Surface.

MNT : Modèle Numérique de Terrain.

OGE : Ordre des Géomètres-Experts.

PPP : Projet Préprofessionnel

PVBN : Procès-Verbal de Bornage Normalisé.

TFE : Travail de Fin d'Étude

RADAR : RAdio Detection And Ranging.

RFU : Référentiel Foncier Unifier.

RTK : Real Time Kinematic.

SPOT : Satellite Pour l'Observation de la Terre.

TIN : Triangulated Irregular Network.

Tps : Taille d'un pixel au sol.

Glossaire

Acte juridique : Acte volontaire entraînant des conséquences juridiques spécialement recherchées.

Aérotriangulation : Ensemble des étapes qui permettent de géoréférencer toutes les images d'un bloc photogrammétrique pour lequel on dispose d'un nombre réduit de point d'appui.

Attitude : Ensemble composé du lacet, du roulis et du tangage.

Bornage : Opération par laquelle est recherchée, déterminée et fixée par des marques extérieures apparentes appelées bornes, la ligne séparative, le plus souvent incertaine, entre deux fonds contigus, non déjà bornés et faisant l'objet d'un droit de propriété privée¹.

Couple stéréoscopique : Deux images prises dans des conditions semblables à celles de la vision humaine.

Exactitude : Qualité d'une observation d'être proche de la valeur vraie de l'observable².

Fait juridique : Évènement volontaire ou involontaire entraînant des conséquences juridiques non voulues.

Horodaté : Qui comporte l'indication de la date et de l'heure.

ISO : Unité de mesure de la sensibilité d'un capteur photographique numérique.

Parallaxe : Écart entre la position connue et la position calculée.

Photosite : Nom des cellules photoélectriques qui composent le capteur de l'appareil photo numérique. Elles correspondent au plus petit élément qui réagit à l'intensité lumineuse³.

Point d'appui : Points connus en coordonnées terrain, visible sur plusieurs photographies et pris en compte dans le calcul photogrammétrique.

Point de contrôle : Points connus en coordonnées terrain, visible sur plusieurs photographies et non pris en compte dans le calcul photogrammétrique.

Point de liaison : Point visible sur deux photographies et non connus en coordonnées terrain.

Précision : Capacité d'un appareil à réaliser des observations répétées proches les unes des autres⁴.

Résolution radiométrique : Pouvoir de séparation entre différents niveaux de luminance reçue⁵.

Résolution spatiale ou résolution géométrique : Capacité d'un capteur à séparer deux objets. C'est le pouvoir séparateur permettant de compter des objets rapprochés⁶.

Résolution spectrale : Pouvoir de séparation spectrale du capteur : sa capacité à reconnaître des différences dans le spectre électromagnétique⁷.

Résolution temporelle : Temps nécessaire à l'accès à l'image au-dessus d'un même lieu de la terre⁸.

¹ Lexis Nexis (auteur non précisé), JurisClasseur encyclopédie des huissiers de justice. Fascicule 10 : « Bornage ». Page 4 paragraphe 1.

² Stéphane DURAND. Cours de Topométrie de précision ESGT. Page 14.

³ Définition disponible sur le cours en ligne : www.cours-de-photo.com/definition-photosite-m68.html.

⁴ Stéphane DURAND. Cours de Topométrie de précision ESGT. Page 14.

⁵ Laurent POLIDORI, Cours de télédétection ESGT, 2015.

⁶ Laurent POLIDORI, Cours de télédétection ESGT, 2015.

⁷ Laurent POLIDORI, Cours de télédétection ESGT, 2015.

⁸ Laurent POLIDORI, Cours de télédétection ESGT, 2015.

Table des matières

Remerciements.....	2
Liste des abréviations	3
Glossaire	4
Table des matières	5
Introduction.....	7
1. L'image et la délimitation, état actuel des utilisations juridiques et techniques.....	9
1.1. Règles juridiques relatives à l'image en tant que mode de preuve.....	9
1.1.1. Les images issues de sources hétérogènes comme modes de preuve.....	9
1.1.1.1. Utilisation des images comme mode de preuve en justice	9
1.1.1.2. Utilisation non judiciaire des images comme mode de preuve	11
1.1.2. Les images issues de la télédétection comme mode de preuve	12
1.1.2.1. Cas général.....	12
1.1.2.2. Cas particulier de la délimitation entre deux États	15
1.1.3. Conclusion sur les conditions de l'utilisation de l'image en tant que mode de preuve	16
1.2. État de l'art de l'image comme outil de délimitation.....	17
1.2.1. Les opérations cadastrales et le bornage à l'étranger.....	17
1.2.2. L'image au service du géomètre-expert en France	19
1.2.3. Le domaine agricole	20
1.3. Les images de télédétection pour une délimitation virtuelle.....	20
1.3.1. Généralités sur la télédétection	20
1.3.1.1. Le domaine géométrique.....	21
1.3.1.2. Le domaine radiométrique	21
1.3.1.3. Caractéristiques générales des images de télédétection	22
1.3.2. Focus sur la photogrammétrie.....	22
1.3.2.1. Principes généraux de la photogrammétrie	23
1.3.2.2. Paramètres optimaux pour l'aérotriangulation.....	24
1.3.2.3. Paramètres optimaux pour la photographie	26
1.3.2.4. Produits dérivés	28
1.3.3. Délimitations théoriques possibles.....	29
1.3.3.1. Matériel envisageable en fonction d'une précision spécifiée	29
1.3.3.2. Précision théorique possible en fonction d'un matériel donné	33
1.3.4. Délimitation virtuelle via les images de télédétection	33
1.3.4.1. Report des coordonnées terrain sur l'image : la délimitation virtualisée	34

1.3.4.2. Réduction du nombre de points levés en cas de limite complexe : la délimitation semi-virtuelle.....	34
1.3.4.3. Tracé des limites géoréférencées directement sur la mosaïque d'orthophotographie : la délimitation virtuelle	35
1.3.4.4. Définition des outils statistiques	36
1.3.4.5. Analyse de la faisabilité d'une délimitation via l'orthophotographie	38
1.3.4.5.1. Premier essai.....	38
1.3.4.5.2. Second essai.....	40
1.3.4.5.3. Conclusion sur la faisabilité d'une délimitation via l'orthophotographie	42
2. La place de l'image dans les délimitations de demain.....	43
2.1. Statut actuel de l'image comme moyen de preuve.....	44
2.2. Suppositions permettant l'évolution de la valeur probante de l'image.....	46
2.2.1. Conditions techniques permettant l'évolution de la force probante de l'image	46
2.2.2. Conditions juridiques permettant l'évolution de la force probante de l'image.....	47
2.3. L'image comme mode de preuve parfait ?.....	48
2.3.1. Hypothèse de l'image comme acte sous seing privé.....	49
2.3.2. Hypothèse de l'image comme acte authentique.....	50
2.3.3. Conséquences générales de l'éventuelle évolution du statut de l'image	52
2.4. Impacts probables sur la procédure de bornage amiable	52
2.5. L'authentification des images de télédétection : une nouvelle mission pour le géomètre-expert ?.....	55
Conclusion	57
Bibliographie.....	59
Table des équations.....	61
Table des figures.....	61
Table des tableaux.....	61
Table des annexes	62
Synthèse	75
Abstract	75

Introduction

Aujourd'hui les images interviennent dans des domaines divers et variés. Les médias, les réseaux sociaux et notre mode de vie influent fortement sur la profusion d'images à laquelle nous sommes exposés chaque jour. À première vue les images concernent principalement nos activités personnelles et nos loisirs, cependant elles sont également présentes dans des domaines tels que le droit et la mesure.

Ce sujet du TFE se situe au centre de l'activité du géomètre-expert puisqu'il fait autant appel à des notions juridiques, notamment liées au bornage, qu'à des notions techniques concernant la télédétection. Afin de réaliser cette étude, les termes clefs du sujet sont préalablement mis en exergue. Cette étape permet de s'interroger sur le cadre à l'intérieur duquel l'ensemble des recherches sont réalisées.

En ce qui concerne « l'étude de la valeur juridique des images de télédétection », le premier élément important à définir est **l'image numérique**. Elle se définit comme le « support informatique d'une représentation 2D de l'espace 3D, organisée en matrice de pixel »⁹. Le choix de considérer uniquement l'image numérique est dû au recours quasi systématique de nos jours de ce format pour la création et le stockage des images. Ensuite, il est nécessaire de définir la **télédétection**, qui représente « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. Elle permet d'interpréter ces objets par des mesures spécifiques et par l'étude de leurs comportements spectraux et de leurs distributions spatiales »¹⁰. L'étude de la valeur juridique de ce type d'image a pour ambition de déterminer leur valeur juridique.

Pour la deuxième partie du titre du sujet : « Application à la délimitation virtuelle », il faut souligner que l'expression « délimitation virtuelle » ne trouve pas de définition préconstruite. Cependant, la **délimitation** se traduit par la « définition et/ou la matérialisation d'une ligne séparant deux espaces contigus ayant des caractéristiques différentes »¹¹. Historiquement et étymologiquement, la **limite** s'illustre par « ce qui borne un terrain, un territoire »¹², mais de nos jours le bornage a une définition bien précise. Pour cette raison, il faut distinguer le bornage de la délimitation. Enfin, l'utilisation de l'adjectif « **virtuelle** » se traduit par une réalisation « numérique » de la délimitation, différemment d'une délimitation physique établie totalement sur le terrain. Ainsi, la délimitation est réalisée à distance du terrain à partir d'une représentation virtuelle de ce dernier. Dans ce mémoire, la délimitation virtuelle concerne principalement l'aspect technique de la délimitation. Aussi, la délimitation est envisagée selon plusieurs degrés de virtualisation. Ceci permet de s'interroger sur les intérêts et les conséquences de chaque degré de virtualisation.

Dans un premier temps, l'étude se porte sur l'image et la délimitation à l'heure actuelle (1.). Ici, on s'interroge sur le potentiel de l'image en tant que **mode de preuve**. Dans le domaine juridique, la preuve se définit comme « la démonstration de la réalité d'un fait, d'une obligation (ou de son paiement), d'un état ou d'une circonstance »¹³. Le terme « mode de preuve » représente tous les moyens employés par un plaideur permettant d'apporter au juge la démonstration des faits et des actes juridiques qu'il allègue¹⁴. Il ne faut pas le confondre avec **l'objet de la preuve** qui représente directement ce que l'on doit prouver. Dans le domaine non juridique, c'est-à-dire au sens commun, **la preuve** est un « fait, témoignage,

⁹ Elisabeth SIMONETTO, cours de traitement numérique des images, ESGT, 2014.

¹⁰ Olivier DE JOINVILLE, cours de télédétection « *Généralités* », ENSG, 2015.

¹¹ Morgane LANNUZEL, cours de bornage (règles de l'art OGE), 2015, page 63.

¹² Voir le site internet : www.cnrtl.fr/definition/limite. Consulté en Mars 2016.

¹³ Dictionnaire juridique disponible sur le site internet www.lexinter.net. Consulté en Juin 2016.

¹⁴ V. DEPATD-SEBAG, « Les conventions sur la preuve », publié dans *La preuve*, édition Economica, 2004, page 13 et 17.

raisonnement susceptible d'établir de manière irréfutable la vérité ou la réalité de quelque chose »¹⁵. La preuve non juridique est donc une notion bien distincte de la preuve juridique qui est légalement définie.

Dans cette première partie principale la **photogrammétrie** est abordée. Cette technique de télédétection se basant sur la stéréovision, permet de reconstituer des objets 3D à partir de photographies en 2D. Elle permet entre autres la création **d'orthophotographie** qui semble cumuler de nombreux avantages face à la carte classique. Elle se définit comme « une photographie rééchantillonnée pour être rendue superposable à une carte. Ce produit a donc les propriétés géométriques d'une carte et les propriétés radiométriques de l'image d'origine »¹⁶. L'orthophotographie est accessible à un plus grand nombre de personnes puisque l'utilisation de la photographie est commune contrairement à la carte. Aussi, les cartes nécessitent de l'expérience et des compétences particulières afin de parvenir à les interpréter. Ainsi, il semble intéressant de s'interroger sur les apports de l'orthophotographie afin de réaliser une délimitation virtuelle.

La **sécurisation**, composée notamment de l'authentification, est un principe régulièrement abordé dans ce sujet. En effet, dans le domaine des données, la sécurisation se traduit par le fait de limiter le vol, la diffusion, la modification, la détérioration. Elle est étroitement liée aux notions de confidentialité, d'intégrité, de disponibilité et **d'authentification**¹⁷. La dernière notion évoquée permet de valider l'authenticité de la donnée, en d'autres termes l'identité de son émetteur ou de son créateur. La problématique de l'authenticité de l'image intervient dans tous les domaines abordés dans l'état actuel. Par conséquent, il est nécessaire de s'interroger sur l'intégration de cette problématique pour les délimitations de demain.

Dans un second temps, l'étude permet d'imaginer quelle serait la place des images dans les délimitations de demain (2.). Elle propose de placer l'image au sommet de la **hiérarchie des modes de preuve**, c'est-à-dire au niveau des **preuves littérales**. Le premier élément important à identifier ici est la preuve littérale ou preuve par écrit. Elle résulte d'une « suite de lettres, de caractères, de chiffres ou de tous autres signes ou symboles dotés d'une signification intelligible, quels que soient leur support et leurs modalités de transmission »¹⁸. Cette définition fait appel au caractère intelligible de la preuve c'est-à-dire que l'on peut comprendre sans difficulté¹⁹. Pour envisager l'évolution de la place de l'image dans la hiérarchie des modes de preuve, il apparaît indispensable de déterminer sa situation actuelle.

Enfin, en ouverture, l'étude propose de considérer l'image de télédétection comme support même des droits, autrement dit comme un **acte constitutif de droit**. Ceci est une révolution forte puisque **l'acte déclaratif** ne fait que constater un fait ou un droit préexistant tandis que **l'acte constitutif** crée un nouvel état de droit et peut faire naître un droit réel pouvant lier le juge.

¹⁵ Voir le site internet : www.cnrtl.fr/definition/preuve.

¹⁶ Laurent POLIDORI. Cours de télédétection ESGT. 2014. Page 20.

¹⁷ Voir le sujet sur la sécurisation des données sur le site internet : https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9curit%C3%A9_des_donn%C3%A9es.

¹⁸ Loi n°2000-230 du 13 mars 2000 - art. 1 JORF 14 mars 2000. Portant sur la définition de l'écrit. Article 1316 du code civil.

¹⁹ Voir le site internet www.cnrtl.fr/lexicographie/intelligible.

1. L'image et la délimitation, état actuel des utilisations juridiques et techniques

De nos jours, les applications liant l'image et la délimitation ne sont pas nombreuses. Ce constat conduit à s'interroger sur les applications juridiques et techniques existantes aujourd'hui. Afin de mettre en relief ces dernières, les règles juridiques relatives à l'image en tant que mode de preuve sont abordées afin de cibler les applications juridiques où l'image est utilisée comme mode de preuve (1.1.). Ensuite, l'étude se focalise sur l'état de l'art de l'image comme outil de délimitation (1.2.). Elle a pour objectif de présenter les principales applications techniques où l'image a servi d'outil de délimitation. Enfin, le troisième aspect, les images de télédétection pour une délimitation virtuelle (1.3.), se concentre sur le domaine de la photogrammétrie afin de répondre aux besoins techniques théoriques d'une délimitation virtuelle. Puis, l'application concrète de la délimitation virtuelle est envisagée.

1.1. Règles juridiques relatives à l'image en tant que mode de preuve

Cet état du droit a pour objectif de recenser l'ensemble des cas et des applications juridiques liés à l'utilisation de l'image comme mode de preuve. Pour réaliser cette étude non exhaustive, il est possible de se baser selon plusieurs catégories d'image. Pour cette raison l'image est abordée selon deux types de sources allant du cas général, où l'image est issue de sources hétérogènes (1.1.1.), au cas spécifique, où l'image est issue de la télédétection (1.1.2.).

1.1.1. Les images issues de sources hétérogènes comme modes de preuve

L'image utilisée comme mode de preuve existe depuis plus d'un siècle et, avec l'avènement du numérique, suscite de plus en plus d'intérêts. En effet, le criminologue français Alphonse Bertillon a, par exemple, utilisé la photographie métrique dès 1903 sur des scènes de crime²⁰. Il a conçu une procédure scientifique permettant d'utiliser ses photographies comme **moyens de preuve en matière pénale**. C'est à cette date que l'on voit apparaître, associée à la photographie, la forensique qui se définit comme « la mise en œuvre de moyens scientifiques et technologiques pour enquêter et établir des faits devant des tribunaux »²¹. Comme autre exemple historique il est possible d'évoquer le procès de Nuremberg de 1945, où le procureur choisit d'enregistrer les réactions des accusés nazis face à la projection des images des camps de concentration afin de révéler leur culpabilité²². C'est ainsi que tout au long du 20^{ème} siècle, les images sont régulièrement utilisées comme moyen de preuve en matière pénale puisqu'elles permettent de figer puis de rendre compte d'une situation (1.1.1.1.). Cependant, les utilisations de l'image en tant que mode de preuve existent aussi dans des cas non judiciaires (1.1.1.2.).

1.1.1.1. Utilisation des images comme mode de preuve en justice

Le 10 Février 2016, l'ordonnance n° 2016-131²³ portant en partie réforme de la preuve des obligations réaffirme la possibilité d'utiliser l'image comme moyen de preuve. L'article 1358²⁴ du code civil souligne que « hors les cas où la loi en dispose autrement, la preuve peut être apportée par tout moyen ». Lorsque la preuve est libre, le juge possède un pouvoir d'appréciation important contrairement au système

²⁰ Diane DUFOUR, « Images à charge - La construction de la preuve par l'image », Exposition LE BAL, édition Xavier BARRAL, 2015, page 2.

²¹ Diane DUFOUR, « Images à charge - La construction de la preuve par l'image », Exposition LE BAL, édition Xavier BARRAL, 2015, page 2.

²² Diane DUFOUR, « Images à charge - La construction de la preuve par l'image », Exposition LE BAL, édition Xavier BARRAL, 2015, page 2.

²³ Ordonnance n° 2016-131 du 10 février 2016 portant réforme du droit des contrats, du régime général et de la preuve des obligations.

²⁴ Cet article est une renumérotation de l'article 1316-2 du code civil issu de la loi n°2000-230 du 13 mars 2000.

de la preuve légale où son pouvoir d'appréciation est plus restreint puisque la loi impose des procédés de preuve précis. Ce **principe de la preuve par tout moyen** est en vigueur en matière pénale, commerciale et civile pour rapporter la preuve des faits juridiques²⁵ et des actes juridiques²⁶ dont le montant est inférieur à 1500 €. Le **système de la preuve légale** concerne le domaine civil pour rapporter la preuve des actes juridiques dont le montant est supérieur à 1500 €. Parmi les divers moyens de preuve libre, la place de la photographie dans les tribunaux est forte puisqu'elle permet à ses destinataires de se représenter instantanément une situation. Dans nos esprits elle enregistre, fixe, et valide une scène. Cet outil a une force de conviction très importante. En réalité cet atout est souvent remis en question puisque les possibilités de falsification des photographies ne cessent de croître avec l'évolution des ordinateurs. En effet, avec des outils informatiques de plus en plus puissants, **garantir l'authenticité des images devient difficile**. De plus, la photographie peut perdre de son objectivité, en effet si le photographe lui-même ne l'est pas il peut réussir à influencer notre perception de la scène. Afin de conserver sa force probante, elle doit donc adopter une neutralité de point de vue sous peine de ne pas être prise en compte par le juge. Aussi, comme la photographie est considérée comme un procédé de preuve moderne, **elle doit être obtenue de façon loyale** sous peine d'être interdite par le juge²⁷. Enfin, il faut souligner que la photographie est un mode de preuve situé en bas de la pyramide des modes de preuves. Elle s'efface devant les preuves parfaites comme la preuve littérale, la preuve testimoniale, la preuve par présomption, l'aveu judiciaire, le serment décisive, les empreintes génétiques, et d'autres encore²⁸. La photographie se situe au niveau des preuves imparfaites, soumises à l'appréciation souveraine du juge, et plus précisément au niveau des **présomptions du fait de l'homme**²⁹. Donc si l'image constitue un mode de preuve, son utilisation est néanmoins limitée à cause de sa situation au sein de la hiérarchie des modes de preuve.

De nos jours, il existe néanmoins des cas où l'utilisation des images comme modes de preuve est encadrée par la loi. On peut, par exemple, citer le cas de la vidéosurveillance³⁰. Cette technologie et cet encadrement législatif ont pour objectif de protéger les citoyens en contact avec ce dispositif. En effet, la vidéosurveillance permet de capter et de figer une situation de manière continue ce qui permet généralement de dissuader les actes illégaux. Pour installer un tel système dans un lieu public ou ouvert au public, il est nécessaire d'obtenir une autorisation préfectorale, de respecter un certain formalisme auprès de la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL) et enfin de fournir un certain nombre d'informations aux personnes concernées. En effet, le public doit être informé de l'existence du système de vidéosurveillance et de la personne ou l'autorité responsable. Un manque d'information conduit à obtenir la preuve par un procédé déloyal et donc au rejet de cette dernière par le juge. De plus, pour utiliser les images de vidéosurveillance comme mode de preuve, les images doivent être horodatées³¹, géolocalisées³² et, selon une circulaire³³ datant de 2009, elles doivent être de qualité suffisante. L'exemple de la vidéo surveillance met en exergue un domaine où **l'image, encadrée par la loi, a une force probante supérieure à celle de l'image non encadrée par des règles ou des lois**³⁴. En effet, l'image issue de la vidéosurveillance est plus facilement utilisable comme moyen de preuve puisque son authentification et sa sécurisation sont assurées par la circulaire de 2009. Donc cet encadrement qui à première vue semble très contraignant s'avère en réalité indispensable pour faciliter l'utilisation et augmenter la force probante de la preuve par

²⁵ Événement volontaire ou involontaire entraînant des conséquences juridiques non voulues.

²⁶ Acte volontaire entraînant des conséquences juridiques recherchées.

²⁷ Pascal LEMOINE conseiller référendaire à la Cour de cassation, « La loyauté de la preuve », rapport annuel de la Cour de cassation, 2004. Disponible sur le site internet : <https://www.courdecassation.fr>

²⁸ L'ensemble des définitions est accessible sur le site internet : www.legifrance.gouv.fr.

²⁹ Démonstration disponible en partie 2.1.1. Page 42 de ce mémoire.

³⁰ Ulrich MAMBOU, « étude de la valeur juridique des images de télédétection en vue d'un bornage virtuel. », Projet d'assistant recherche bénévole ESGT (ARB), 2015.

³¹ « Qui comporte l'indication de la date et de l'heure ». Dictionnaire Larousse.

³² « Technique de détermination de la situation géographique précise d'un lieu ou, à un instant donné, d'un objet ». Dictionnaire Larousse.

³³ Formulaire Cerfa n°13806*03 disponible sur le site internet : www.interieur.gouv.fr/content/download/6586/62588/file/INTD0900057C.pdf

³⁴ Code de la sécurité intérieure : Articles L.223-1 à L.223-9, L.251-1 à L.255-1, L. 613-13 et R.251-1 à R.253-4.

l'image devant le juge. Ainsi, l'image issue de la vidéosurveillance est un mode de preuve moins limité puisqu'elle est accompagnée d'un cadre législatif particulier.

Après avoir détaillé les utilisations de l'image comme mode de preuve judiciaire, notamment avec l'exemple de la vidéosurveillance, il est possible de s'interroger sur les utilisations non judiciaires de l'image comme mode de preuve.

1.1.1.2. Utilisation non judiciaire des images comme mode de preuve

Dans le monde professionnel, l'utilisation de l'image comme mode de preuve est peu courante. Si l'on se focalise sur l'activité professionnelle du géomètre-expert, il n'existe pas de cas clairement identifié où il utilise une photographie comme mode de preuve devant le juge. Néanmoins, la photographie d'une borne implantée où l'on voit sa proximité avec son environnement peut servir de **preuve non judiciaire** du bornage effectué³⁵. Il faut rappeler que cette profession est la seule à pouvoir réaliser un bornage amiable puisqu'elle bénéficie d'une délégation de service public. Dans le cas en question, à l'issue du bornage contradictoire effectué, le géomètre a photographié l'ensemble des bornes implantées sur le terrain. Sur ces photographies, on remarque clairement la proximité des bornes avec leur environnement et il est possible d'estimer grossièrement la distance de ces dernières avec des éléments fixes du terrain, par exemple un mur ou un poteau en ciment. Après l'opération de bornage, l'un des propriétaires construit un mur sur la limite bornée. Peu après cette construction, l'autre voisin constate que le mur empiète sur sa propriété. La compagnie d'assurance de ce dernier se retourne contre le géomètre-expert car elle considère que la construction du mur sur le terrain voisin est due à une erreur d'implantation d'une borne par le géomètre-expert. Cependant sur le terrain, il est possible de constater que cette borne a manifestement été déplacée puisqu'elle n'est plus aussi proche du poteau en ciment comme il était aisé de le voir sur la photographie prise en amont de la construction du mur. Le géomètre-expert a donc envoyé à la compagnie d'assurance la photographie et le plan de bornage réalisé avant la construction du mur par courrier avec accusé de réception. En conclusion, la compagnie d'assurance a abandonné ses poursuites et l'affaire n'a pas été portée devant les tribunaux. La photographie sert ici de moyen de preuve de la juste implantation face à la compagnie d'assurance³⁶. Une fois de plus, l'image permet de rendre compte d'une situation en figeant la scène à un instant donné. Néanmoins, l'absence de l'utilisation de l'image comme mode de preuve du bornage effectué par un géomètre-expert en justice, illustre les problèmes liés à la force probante de l'image. En effet, cette absence montre de nouveau que l'image est un mode de preuve limité.

Le sport est un autre cas illustrant l'utilisation de l'image comme preuve non judiciaire. Effectivement, dans ce paragraphe consacré au sport, la preuve est considérée au sens courant. Ici, elle permet de rendre compte visuellement d'une situation en la figeant. Néanmoins, la photo-finish³⁷ est un exemple fort puisqu'elle représente directement ce qui doit être prouvé. Par définition, c'est donc l'objet de la preuve. Contrairement aux cas précédents où l'image constituait un mode de preuve limité, ici elle représente le **mode de preuve par excellence**. Cette technologie permet, grâce à un appareil photo parfaitement callé sur l'axe de la ligne d'arrivée, de prendre des images d'une largeur de 1 pixel tous les 1/10000ème de seconde pour les systèmes les plus performants³⁸. Puis, chaque bande est ajoutée à la précédente formant une image temporelle du franchissement de la ligne d'arrivée. Il est possible de retrouver cette technologie dans de nombreux sports comme le cyclisme, les sports automobiles, les

³⁵ Cas rencontré au sein de la SELARL HOUDRY.

³⁶ Cas rencontré au sein de la SELARL HOUDRY.

³⁷ Article web disponible intégralement sur le site internet : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Photo-finish>. Site consulté en février 2016.

³⁸ Voir le site internet de TAGHEUER : www.tagheuer-timing.com/en/tag-heuer-professional-timing-news-lynx-photo-finish-camera. Site consulté en février 2016.

courses hippiques, l'athlétisme et bien d'autres encore. Des technologies différentes existent pour attester de l'ordre d'arrivée des sportifs sur la ligne mais la photo-finish est considérée comme la plus précise. En effet, sa précision peut être de l'ordre du millimètre ce qui implique que des mesures du même ordre de grandeur peuvent être réalisées. La photo-finish est donc une image qui peut être utilisée pour obtenir des informations topographiques dans le sens où il est possible d'y extraire des distances. Le sport permet de constater une fois de plus que l'image peut être utilisée comme mode de preuve. Il est intéressant de noter qu'elle peut avoir cette fonction grâce au cadre règlementaire et législatif que représente le domaine du sport³⁹. Il semble aussi important de souligner que dans cet exemple, la sécurisation et l'authenticité des images ne représentent pas un élément central.

Les cas présentés permettent de prendre conscience des nombreuses utilisations, juridiques ou non juridiques, possibles à partir de l'image. On constate aussi que le recours aux images comme mode de preuve judiciaire atteint rapidement ses limites dans le cas des images issues de sources hétérogènes. En effet, ce constat fait principalement ressortir des problèmes liés à l'authentification de l'image, à la fiabilité de la source et à la qualité de l'image. Pour cette raison et afin de poursuivre l'état du droit, le cas limité de l'image de télédétection est envisagé.

1.1.2. Les images issues de la télédétection comme mode de preuve

L'image de télédétection⁴⁰ est aussi utilisée comme moyen de preuve judiciaire ou non judiciaire depuis de nombreuses années. En 1945, lors d'une campagne aérienne, l'armée britannique a recueilli des images aériennes sur tout le territoire Palestinien. Ces dernières permettent de nos jours d'établir la présence de hameaux de nomades Palestiniens et prouvent l'existence de ce peuple avant la création d'Israël⁴¹. Cette campagne aérienne représente un point de référence sur l'histoire du peuplement de ces terres. Afin de poursuivre l'état du droit positif, l'image issue de la télédétection est scindée en deux parties. La première concerne le cas général de l'utilisation de ce type d'image comme mode de preuve (1.1.2.1.). La seconde présente le cas spécifique de son utilisation comme mode de preuve de délimitation, mais entre deux États (1.1.2.2.).

1.1.2.1. Cas général

Aujourd'hui l'utilisation de l'image de télédétection comme mode de preuve s'applique à de nombreux domaines comme l'environnement, la technologie, le droit et d'autres encore. Plusieurs exemples permettent de se rendre compte de l'importance de cette technologie comme moyen de preuve. Le cas de la couche d'ozone, de la pollution maritime, des catastrophes naturelles et de la catastrophe technologique AZF⁴², sont les éléments abordés dans la suite pour entrevoir les apports de la télédétection en tant que mode de preuve dans le cas général.

Dans le domaine de l'environnement, la télédétection a permis la mise en place de nombreux traités internationaux, avec par exemple le protocole de Montréal de 1987 qui prévoit la réduction de 50% des émissions de gaz détruisant l'ozone⁴³. En ce qui concerne la couche d'ozone, les images de

³⁹ L'ensemble des lois et des règles relatives au sport sont regroupées dans le Code du sport.

⁴⁰ Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. Dans : Journal officiel de la république du 11 décembre 1980. Terminologie de la télédétection aérospatiale.

⁴¹ Eyal WEIZMAN, « *Les revendications des Bédouins sur leurs terres dans le désert du Néguev* ». Dans « *Images à charge - La construction de la preuve par l'image* », Exposition LE BAL, édition Xavier BARRAL, 2015, page 6.

⁴² L'usine AZF (AZote Fertilisants) a été détruite le 21 Septembre 2001 à Toulouse par l'explosion d'un stock de nitrate d'ammonium.

⁴³ Daniel VIDAL-MADJAR, « L'observation spatiale de la Terre et de son environnement ». In *Droit télédétection et environnement* réalisé sous la direction de Simone COURTEIX, 1993, page 93 à 97, spécifiquement page 93.

télédétection apportent une **preuve scientifique** d'une part de son existence car elle n'est pas visible par l'homme directement, et révèlent la présence d'une dégradation due à l'émission de gaz particulier causée par nos activités⁴⁴. D'autre part, cette technique permet de faire respecter les normes mises en place. En effet, les émissions à l'échelle mondiale ne peuvent pas être détectées par des moyens locaux. La télédétection permet une **surveillance globale** et réalise ainsi un **constat** à un instant donné sur une zone géographique déterminée. Comme précédemment, les images de télédétection capturent et figent une situation. Ces constats doivent pouvoir servir de **preuve scientifique ou judiciaire** et d'outil de décision aux organes de contrôle face au non-respect de la norme. L'utilisation de la télédétection comme système de contrôle a été évoquée lors des débats de la 21^{ème} Conférence des Parties (COP21) à Paris en 2015⁴⁵. Il apparait donc que cette méthode d'observation représente, à l'échelle internationale, l'un des seuls moyens de vérification et de surveillance disponible à ce jour. De ce fait l'utilisation de l'image de télédétection comme mode de preuve en matière environnementale ne peut que croître avec le développement important du droit de l'environnement et des normes internationales⁴⁶.

Dans le domaine judiciaire, à l'échelle nationale et internationale, les images de télédétection sont régulièrement admises comme moyens de preuve. Plus précisément, il existe de nombreuses décisions de justice s'appuyant sur ces images afin de confondre des navires qui procèdent à des vidanges illicites d'hydrocarbure en pleine mer. On retrouve le cas du « Song San »⁴⁷ en 1997 à Singapour, ou encore le cas « Société Thenamaris Ship Management » faisant l'objet d'un arrêt de la Cour de cassation du 13 Mars 2007⁴⁸. Dans tous les cas, l'image de télédétection ne constitue pas l'objet de la preuve mais un **moyen de preuve**. Autrement dit, sa simple existence n'apporte pas directement la preuve du fait mais elle permet de conduire à la preuve de ce dernier. Par exemple, dans le cas du « Song San », ce sont des prélèvements d'échantillons associés aux images qui ont permis d'apporter la preuve définitive. Ainsi, dans cet exemple les images de télédétection permettent d'émettre des doutes sur la légalité de la vidange du « Song San ». Néanmoins, ce sont les prélèvements qui conduisent à prouver l'illégalité de l'opération. Ici, l'image utilisée seule a donc une **force probante limitée**. De nouveau en ce qui concerne la « Société Thenamaris Ship Management », l'image de télédétection vaut moyen de preuve. En effet, la Cour de cassation précise qu'une photo aérienne est soumise à interprétation et que pour réduire cet aspect subjectif, il est nécessaire de recourir à des méthodes objectives comme un prélèvement chimique⁴⁹. Comme le fait remarquer le Professeur de droit Bernard Bouloc « se fier aux apparences, écarter les moyens de preuve modernes, c'est ouvrir en grande la porte à l'erreur judiciaire »⁵⁰, il prend l'exemple d'une tache de sang ou d'une tache de peinture rouge. En effet, il est impossible de les différencier sur une photographie sans élément objectif comme une analyse chimique. Pour revenir au cas de la « Société Thenamaris Ship Management » aucun prélèvement n'a été réalisé. Cependant les juges ont fondé leur jugement sur un faisceau d'indices tirés de l'aspect de la nappe polluée, conformément au principe de liberté de la preuve en matière pénale. Ce faisceau est né par comparaison de l'aspect de la nappe à une référence et à des **codes d'apparence reconnus sur le plan international comme mode de preuve de la teneur d'un rejet en hydrocarbure**. Dans cette affaire, l'image de télédétection a une importance capitale, elle représente un moyen de preuve très

⁴⁴ Daniel VIDAL-MADJAR, « L'observation spatiale de la Terre et de son environnement ». In *Droit télédétection et environnement* réalisé sous la direction de Simone COURTEIX, 1993, page 93 à 97, spécifiquement page 93, 95 et 96.

⁴⁵ Information disponible sur le site internet : eoeu.belspo.be/fr/profs/2015-12-18-cop21.asp?section=

⁴⁶ Alexandre KISS, « Le droit international de l'environnement et la télédétection ». In *Droit télédétection et environnement* réalisé sous la direction de Simone COURTEIX, 1993, Page 79.

⁴⁷ Gérardine GOH ESCOLAR, « *Evidence from earth observation satellites* », édition Ray Purdy and Denise Leung 2012, page 110.

⁴⁸ Cour de cassation, chambre criminelle, audience publique du 13 mars 2007, n° de pourvoi : 06-80922, bull.crim.2007 n°80

⁴⁹ Cour de cassation, chambre criminelle, audience publique du 13 mars 2007, n° de pourvoi : 06-80922, bull.crim.2007 n°80. Page 3 dernier paragraphe.

⁵⁰ Bernard BOULOC, professeur à l'université de Paris 1 (Panthéon – Sorbonne). « *Apparence d'hydrocarbures et présomption d'innocence* ». www.afcan.org/dossiers_juridiques/doctrine2.html

important qui combiné au code d'apparence⁵¹ de l'accord de Bonn⁵², permet de rejeter le pourvoi de cassation de la société précitée et de valider la décision des juges du fond l'ayant condamné.

Les compagnies d'assurances françaises et internationales ont également recours aux images de télédétection comme **moyen de preuve des dommages causés par des catastrophes naturelles**. En effet, lors de la tempête Katrina aux États-Unis ou de la tempête Xynthia en France, la comparaison des images de télédétection avant et après la catastrophe permet de faire un état des lieux des dégâts et des zones concernées⁵³. Grâce à une résolution temporelle⁵⁴ courte de certains satellites de télédétection, un état des lieux peut être réalisé quotidiennement. Les assurés et les assurances peuvent ainsi faire valoir leurs droits en utilisant ces images. En effet, il est possible de prendre l'exemple d'une société française⁵⁵ d'imagerie aérienne par drone qui propose ses services afin de réaliser des déclarations de sinistre auprès des assurances. Néanmoins, les problèmes d'authentification et de force probante ressurgissent. Par conséquent aux États-Unis le débat sur la création d'une **agence d'authentification** des images satellitaires a été relancé au moment de la tempête Katrina sans pour autant aboutir. Aujourd'hui, il n'existe toujours pas d'agence de cette espèce aux États-Unis et plus globalement dans le monde. La naissance d'un tel organisme aurait un impact conséquent sur la force probante des images de télédétection puisque leur provenance et leur traitement ne pourront plus être systématiquement remis en cause.

Si les images de télédétection peuvent être utilisées comme mode de preuve dans des cas de catastrophe naturelle, elles le peuvent également dans le cas d'une catastrophe technologique. L'exemple de la catastrophe AZF⁵⁶ de Toulouse en 2001 met en évidence l'importance de **l'apport technique** des images de télédétection en matière pénale. Lors de l'enquête aucun dossier technique n'a été versé au dossier pénal, la photogrammétrie réalisée grâce aux images de télédétection permet d'aboutir à la détermination des caractéristiques topographiques détaillées de la zone touchée et plus précisément du cratère de l'explosion⁵⁷. Cette information contribue à l'avancement de l'enquête et du procès en cours puisqu'elle était nécessaire à la compréhension de l'explosion. Deux éléments intéressants dans ce dossier sont à souligner. Le premier vient du fait que la source des images de télédétection n'est pas remise en cause. Ce trait du dossier s'explique par le fait que ces images ne sont pas utilisées individuellement. En effet, c'est un mélange de trois jeux de photographie provenant de trois capteurs différents qui permet d'aboutir à un nuage de points 3D par traitement photogrammétrique. On constate alors que le traitement photogrammétrique semble limiter de lui-même les possibilités de falsification lors de la création du nuage de point. Le second élément intéressant à relever concerne encore le problème de l'authentification. Tout au long du calcul photogrammétrique, des contrôles ont été mis en place afin de valider une certaine précision du rendu final. Ainsi, ces contrôles permettent de déceler les erreurs involontaires et potentiellement volontaires dues à l'utilisation des images de télédétection. Dans ce cas il faut souligner que les images de télédétection permettent, en plus de capturer et de figer une situation, d'effectuer un calcul permettant d'aboutir au nuage de points 3D. Finalement, apparaît lors de ce dossier AZF, une technique qui pourrait s'avérer utile pour l'utilisation régulière des images de télédétection comme moyen de preuve : la photogrammétrie.

⁵¹ Le code d'apparence permet de déterminer approximativement l'épaisseur de la nappe d'hydrocarbure ainsi que les quantités déversées dans l'océan à partir de l'observation visuelle de la nappe.

⁵² « L'accord de Bonn est le mécanisme selon lequel les Etats de la mer du Nord et l'Union européenne (les Parties contractantes), travaillent conjointement afin d'assurer une assistance réciproque de lutte contre la pollution, dans la zone de la mer du Nord, due à des catastrophes maritimes et à la pollution chronique découlant de la navigation et des installations offshore ; et d'exercer une surveillance à titre d'aide à la détection et la lutte contre la pollution en mer. ». Signé le 9 juin 1969. Source : www.bonnagreement.org.

⁵³ Jean-François MAYENCE, « Quelques considérations sur l'état du cadre juridique des activités d'observation satellitaire et de certaines de leurs applications », novembre 2008, 24 pages. Particulièrement pages 17 et 18.

⁵⁴ Temps nécessaire à l'accès à l'image au-dessus d'un même lieu de la terre. Laurent POLIDORI cours de télédétection ESGT.

⁵⁵ Disponible sur le site internet : www.planete-drone.fr/traitement-images-aeriennes/

⁵⁶ L'usine AZF (AZote Fertilisants) a été détruite le 21 Septembre 2001 à Toulouse par l'explosion d'un stock de nitrate d'ammonium.

⁵⁷ Par Michel KASSER, Jean Baptiste MONNERIE, Laurent DELGADO, Daniel ROBERT. Dossier XYZ n°122 : « La photogrammétrie au service de la justice : mesures géométriques du cratère de l'explosion AZF ». Pages 31 à 38.

L'image de télédétection en tant que mode de preuve a permis de mettre en évidence plusieurs cas où son utilisation a été déterminante dans les décisions des juges. Afin de compléter cet état du droit, un dernier cas est considéré : la délimitation entre deux États réalisée à partir de l'image de télédétection.

1.1.2.2. Cas particulier de la délimitation entre deux États

L'utilisation des images de télédétection comme mode de preuve dans les délimitations territoriales n'est pas courante. Les cas recensés concernent généralement des différends d'ordre international. La Cour Internationale de Justice⁵⁸ (CIJ) a notamment reconnu et utilisé des images de télédétection et des cartes produites via cette technique dans plusieurs dossiers. Préalablement à l'exposé de ces cas, il est important de préciser que la hiérarchie des modes de preuves de la CIJ est celle du droit international. Sans prendre en compte les différents systèmes de preuve, au sommet de cette hiérarchie des modes de preuve on retrouve la preuve littérale, comprenant les actes écrits et conclus entre les parties, les preuves testimoniales et la preuve par expertise. Enfin, au bas de la hiérarchie on retrouve d'autres procédés de preuve comme le serment, les présomptions et l'aveu⁵⁹. Dans cette hiérarchie internationale des modes de preuves **l'image si situe au bas de la pyramide des modes de preuve**, comme dans le cas national, au niveau des présomptions. En conséquence, elle est aussi soumise à l'appréciation souveraine des juges.

Le premier dossier oppose le Burkina Faso à la République du Mali en 1986⁶⁰. Ici, la CIJ utilise les images de télédétection et les cartes résultantes afin de déterminer la position de la frontière entre les deux pays. Cependant elle souligne dans son arrêt qu' « en matière de délimitation de frontière ou de conflit territorial international, les cartes ne sont que de simples indications, plus ou moins exactes selon les cas ; elles ne constituent jamais – à elles seules et du seul fait de leur existence – un titre territorial ». Cette même cour rappelle qu'il est néanmoins possible d'augmenter fortement la valeur probante des moyens précités en les annexant à des documents constituant l'expression de la volonté des parties concernées. Par exemple, si des cartes sont annexées à un texte officiel où les parties expriment clairement leur volonté⁶¹. Ainsi la carte, et par analogie l'image de télédétection, **peut se voir attribuer une valeur juridique intrinsèque**. Comme précédemment, la source et la fiabilité de l'image sont remises en question, néanmoins il faut mettre en exergue que lorsque ces deux points ne sont pas discutables, la valeur de la carte peut devenir déterminante. En effet, la cour précise dans son arrêt : « Cependant, en tenant compte de la date à laquelle les levés ont été effectués et de la neutralité de la source, la Chambre considère que, si toutes les autres preuves font défaut ou ne suffisent pas pour faire apparaître un tracé précis, **la valeur probante de la carte de l'IGN devient déterminante** »⁶². Dans cette affaire la cour utilise donc les cartes comme moyens de preuve qui intégrées à un faisceau d'indices lui permet de conclure sur la position de la frontière.

Le second cas concerne le Botswana et la Namibie et date de 1999. Dans ce dossier, les deux parties s'affrontent sur le sujet de leur limite frontalière. Plus précisément, la frontière entre les deux pays suit un

⁵⁸ « La Cour internationale de Justice (CIJ) est l'organe judiciaire principal de l'Organisation des Nations Unies (ONU). Elle a été instituée en juin 1945 par la Charte des Nations Unies et a entamé son activité en avril 1946. Elle exerce la fonction de tribunal mondial. Sa compétence est double : elle règle, conformément au droit international, les différends juridiques qui lui sont soumis par les Etats (compétence contentieuse) et donne des avis consultatifs sur les questions d'ordre juridique que lui posent les organes de l'ONU et les institutions spécialisées dûment autorisés à le faire (compétence consultative) ». Source : www.icj-cij.org.

⁵⁹ Joseph RICHANI, Thèse : « Les preuves dans l'arbitrage international » page 9. Disponible sur le site internet : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00869967/document>

⁶⁰ Arrêt du 22 décembre 1986. *Affaire du différend frontalier Burkina Faso / République du Mali*. Par la Cour Internationale de Justice.

⁶¹ Arrêt du 22 décembre 1986. *Affaire du différend frontalier Burkina Faso / République du Mali*. Par la CIJ. Paragraphe 54.

⁶² Arrêt du 22 décembre 1986 paragraphe 62. *Affaire du différend frontalier Burkina Faso / République du Mali*. Par la CIJ.

fleuve, cependant ils ne s'accordent pas sur la branche du fleuve en question. Dans son arrêt⁶³, la CIJ s'appuie notamment sur les campagnes de photographies aériennes prises au-dessus de cette région de 1925 à 1985 et des images satellitaires réalisées en 1975, 1995 et 1996. Ces observations permettent à la cour d'ajouter, à son faisceau d'indices, la preuve que le chenal Nord est plus large que le Sud. Ainsi la CIJ utilise les images de télédétection, les cartes et d'autres moyens encore, pour systématiquement **vérifier et valider** la véracité des arguments de chacune des parties. Par exemple, la Namibie qualifie le chenal Sud de principal alors que le Botswana affirme que c'est le chenal Nord. D'après les observations de la cour, et grâce à une photographie aérienne de 1943, elle remarque des cultures dans le lit totalement asséché du chenal Sud. La cour n'admet donc pas l'argument de la Namibie car il est vraisemblablement faux. En somme, elle parvient grâce aux images de télédétection utilisées comme moyen de preuve, à confronter les arguments apportés et la situation effective à la date des faits, afin de déterminer la limite entre les deux pays.

Le cas opposant le Bénin au Niger en 2005 est similaire au précédent. Ici, la frontière se situe le long du fleuve Niger. Le conflit repose sur la propriété des îles de ce fleuve et donc sur le tracé précis de la limite frontalière. Dans son arrêt⁶⁴, la CIJ détermine le propriétaire de chaque île en considérant les documents les plus pertinents selon elle. On y retrouve, des cartes, des rapports d'ingénieur, et des images de télédétection dont une série de photographies aériennes publiées dans un rapport de l'IGN de Paris en 1979 et les images SPOT⁶⁵. Comme illustration, la cour constate que l'île de Sandi Tounga Barou revendiquée par le Niger n'apparaît sur aucune de ses cartes avant 1973 mais apparaît sur les images de télédétection. Elle attribue donc cette île au Bénin. Les images de télédétection constituent ainsi un **moyen de preuve fort et efficace** dans cette affaire.

Enfin, le dernier dossier présenté oppose le Nicaragua au Honduras en 2007. Ce conflit concerne la limite maritime entre les deux pays et la souveraineté des îles proches de cette limite. Dans la construction de son arrêt⁶⁶, la CIJ accepte comme moyen de preuve les faits évoqués par le Honduras fondés sur une photographie prise par satellite. Néanmoins si la cour l'accepte, **elle n'est pas pour autant liée par cette photographie** puisqu'elle choisit une solution finale différente pour le choix du point de départ de la limite maritime. Malgré tout, le statut de l'image de télédétection est de nouveau validé en tant que moyen de preuve par la Cour Internationale de Justice.

Le cas de la délimitation entre deux États finalise l'état du droit où l'image est utilisée comme mode de preuve. Ainsi, il est possible de souligner les principales règles juridiques relatives à l'utilisation de l'image comme mode de preuve.

1.1.3. Conclusion sur les conditions de l'utilisation de l'image en tant que mode de preuve

À de nombreuses reprises, les juges admettent des images de toutes origines comme moyen de preuve. Mais les exemples abordés permettent de mettre en exergue le principal point faible de l'image : son authenticité. En effet, la photographie est souvent rejetée à cause de la subjectivité qu'impliquent son interprétation et sa source. Néanmoins, à travers cet état du droit, on constate que des règles et des lois permettent d'accroître la valeur probante des images dans des cas très spécifiques. Les différents cadres législatifs de la vidéo-surveillance, de l'accord de Bonn sur la pollution maritime et de la photo-finish dans domaine du sport, illustrent qu'il est possible d'augmenter la force probante des images à condition de

⁶³ Arrêt du 13 décembre 1999. *Affaire du différend frontalier Botswana / Namibie*. Par la Cour Internationale de Justice.

⁶⁴ Arrêt du 12 juillet 2005. *Affaire du différend frontalier Bénin / Niger*. Par la Cour Internationale de Justice.

⁶⁵ Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT). Famille française de satellites civils de télédétection développée par le Centre national d'études spatiales (CNES).

⁶⁶ Arrêt du 8 octobre 2007. *Affaire du différend territorial et maritime opposant le Nicaragua au Honduras*. Par la CIJ.

définir des prérequis particuliers qu'elle doit nécessairement valider. Cependant les cas présentés permettent aussi de souligner le **statut déclaratif de l'image**. Ce statut signifie que l'image ne peut que déclarer un droit ou une situation préexistante. L'acte déclaratif ne crée pas de droit nouveau à l'inverse de l'acte constitutif. Ainsi l'image est toujours soumise à l'appréciation souveraine des juges. Enfin, en ce qui concerne l'authenticité et la fiabilité d'une image et lorsqu'elle est émise par un organisme spécialisé, il semble qu'elle est moins souvent remise en question. Cette constatation fait ressurgir à nouveau le manque d'un organisme de certification et de sécurisation des images autant à l'échelle internationale que nationale.

Cet état du droit a permis de répertorier et d'analyser les principales applications juridiques concernant les différentes catégories d'images envisagées. L'état de l'art suivant a un objectif différent. Il a pour ambition de recenser les applications techniques où l'image est utilisée comme un outil permettant la réalisation d'une délimitation.

1.2. État de l'art de l'image comme outil de délimitation

La réalisation d'une délimitation virtuelle grâce aux images de télédétection a déjà fait l'objet de divers rapports, tests et mises en application dans des domaines et pays différents. Généralement les domaines concernés sont les délimitations liées au cadastre ou au bornage et plus rarement celles associées à l'agriculture. Dans cet état de l'art non exhaustif où l'image est utilisée comme outil de délimitation, c'est-à-dire comme base permettant de fixer la position d'une limite, trois domaines sont mis en relief. Le premier concerne les opérations cadastrales et le bornage à l'étranger (1.2.1.), le second s'attarde sur le domaine d'activité du géomètre-expert en France (1.2.2.) et enfin le dernier concerne le domaine agricole (1.2.3.).

1.2.1. Les opérations cadastrales et le bornage à l'étranger

La délimitation foncière d'un territoire est un besoin qui découle souvent de la nécessité pour un pays de disposer d'un système foncier solide. Il regroupe notamment les deux premiers domaines du bornage et du cadastre. L'intérêt de se doter d'un système foncier est considérable pour un pays. En effet, il permet la mise en application et le respect des lois attachées à la propriété immobilière et donc à une augmentation de sa valeur financière. Aussi, il contribue à la sécurité de la tenue du parcellaire, à l'investissement des propriétaires vis-à-vis de leurs biens, et à la réduction des conflits de voisinage par exemple. Dans de nombreux pays ne disposant pas encore d'un tel système, l'image de télédétection constitue le moyen le plus efficace pour son élaboration.

La Namibie a mis en place ce procédé⁶⁷ basé sur l'orthophotographie afin de bâtir son système foncier. **Elle s'appuie sur l'orthophotographie pour réaliser le bornage général de son territoire.** Cette notion « générale » du bornage se traduit par une détermination des bornes de façon peu précise. Elle est donc différente de la notion du bornage en France, cependant elle est adaptée pour les applications foncières courantes des pays en développement et plus particulièrement dans les zones rurales. Si la précision obtenue via l'orthophotographie en question est du même ordre de grandeur qu'un GPS civil⁶⁸, on peut se demander l'intérêt de la mise en place de cette technique. Premièrement, et comme le précise le ministre du territoire de Namibie, les limites ne sont souvent pas connues précisément par les propriétaires. Ainsi, il n'est pas cohérent de mettre en place des techniques précises combinées à une

⁶⁷ *Fit-For Purpose Land Administration* n°60. Réalisé par la Fédération Internationale des Géomètres (FIG) et de la World Bank. Page 28.

⁶⁸ Précision d'environ 10 mètre.

réalité imprécise. De plus l'orthophotographie permet aux propriétaires de localiser directement ce qui correspond à leurs bornes comme les arbres, les rochers, les cours d'eau. Il est intéressant de noter que le bornage par orthophotographie d'une parcelle rurale en Namibie prend huit fois moins de temps qu'un bornage traditionnel⁶⁹. Dans ce cas l'intérêt de cette technique prend toute sa signification : elle est suffisamment précise, rapide, globale, simple à comprendre par les propriétaires et enfin peu coûteuse.

D'autres pays en développement utilisent les **images de télédétection pour réaliser le bornage général⁷⁰ de leur territoire**. Le Rwanda a réalisé cette opération sur l'ensemble de son territoire en cinq ans, de 2009 à 2013, pour environ six dollars américains par parcelle⁷¹. La délimitation est réalisée par des géomètres spécialisés à l'aide de l'orthophotographie et des dires des parties. Ainsi, des certificats de propriété sont établis et un registre du parcellaire est créé. L'Éthiopie a aussi utilisé deux niveaux de certification pour mettre en place son système foncier. Le premier niveau regroupe pour chaque parcelle le nom du propriétaire, la surface approximative, et le nom des voisins. Ces certificats sont regroupés dans un livre foncier, le « Green Book », pour un dollar américain par parcelle. Ensuite, c'est à partir de cette campagne qu'une ébauche de cadastre est réalisée à partir d'une mosaïque d'orthophotographies sur laquelle sont plaquées les limites enregistrées dans le livre foncier. Le géomètre spécialisé attribue à chaque parcelle un numéro unique et regroupe les dires et revendications des parties. Le second niveau de certification valide l'ensemble des étapes précédentes et inclus la numérisation des limites, leur géoréférencement, un contrôle de qualité et une inspection externe par un organisme public. Le coût du second certificat représente environ huit dollars américains par parcelle. Il est possible de citer encore de nombreux pays en développement utilisant l'image de télédétection comme moyen de délimitation avec comme exemple non exhaustif le Vietnam, l'Indonésie, et les îles de Saint-Vincent et des Grenadines⁷².

La France, pays développé, possède un système foncier solide. Néanmoins la situation foncière d'un pays est en remodelage permanent et nécessite des mises à jour régulières. Le service du cadastre français, lors de ses opérations de mise à jour du plan cadastral, utilise les images de télédétection pour régulariser la situation. Cette procédure, définie par la loi⁷³, peut être réalisée par des travaux terrestres ou par procédé photogrammétrique. Ainsi, les agents du cadastre peuvent procéder à la **rectification du plan et des limites en se basant sur l'orthophotographie**.

La mise en place d'un système foncier via les images de télédétection représente une part importante des applications techniques. Cependant des études⁷⁴ réalisées par des étudiants français de l'ESGT se sont également penchés sur l'utilisation des images de télédétection pour **réaliser des délimitations et notamment dans le cas du bornage**. D'un point de vue technique, les conclusions des études sont favorables à l'utilisation de cette méthode. Néanmoins lors de certains tests réalisés dans le but de constater à quelle précision ces délimitations sont réalisables, on remarque des précisions de détermination mauvaises. Par exemple, lors d'un test⁷⁵ plusieurs opérateurs ont successivement déterminé sur l'orthophotographie une limite entre de la terre et de l'herbe. On retrouve des écarts entre les déterminations allant jusqu'à 50 centimètres. Cela peut paraître imprécis en vue d'un bornage, mais en

⁶⁹ *Fit-For Purpose Land Administration* n°60. Réalisé par la Fédération Internationale des Géomètres (FIG) et de la World Bank. Page 28.

⁷⁰ Signification du bornage général exposée au paragraphe précédent.

⁷¹ *Fit-For Purpose Land Administration* n°60. Réalisé par la Fédération Internationale des Géomètres (FIG) et de la World Bank. Page 27.

⁷² *Fit-For Purpose Land Administration* n°60. Réalisé par la Fédération Internationale des Géomètres (FIG) et de la World Bank. Page 30.

⁷³ Art.6 de la loi n° 74-645 du 18 Juillet 1974. Cette loi porte « sur la mise à jour périodique de valeurs locatives servant de base aux impositions directes locales ».

⁷⁴ Travail de fin d'étude « *Les opportunités et l'utilité de l'utilisation de la photogrammétrie aérienne par drone dans la réalisation d'un procès-verbal de bornage et de reconnaissance de limite* » ESGT. Réalisé par Baptiste VARIN. / Projet préprofessionnel « *Étude de la valeur juridique des images de télédétection en vue d'un bornage virtuelle* » ESGT. Réalisé par BILLION Florence, CARNEJAC Alexandre, MAUVIEL Steeve, SALAUN Katel. / Projet d'assistant recherche bénévole (ARB) : « *étude de la valeur juridique des images de télédétection en vue d'un bornage virtuel* » ESGT. Par Ulrich MAMBOU.

⁷⁵ Projet préprofessionnel « *Étude de la valeur juridique des images de télédétection en vue d'un bornage virtuelle* » ESGT page 15. Réalisé par BILLION Florence, CARNEJAC Alexandre, MAUVIEL Steeve, SALAUN Katel

réalité cet écart est cohérent puisque la réalité terrain est du même ordre de grandeur. En effet, cette limite n'est pas franche et que l'on soit sur le terrain ou sur l'orthophotographie le résultat est identique sans élément supplémentaire concernant la définition de la limite. Il est donc essentiel de prendre en compte cette **précision intrinsèque à la limite** pour réaliser des tests et conclure sur la précision de ceux-ci.

Après avoir constaté l'apport des images comme outil de délimitation dans le domaine des opérations cadastrales et du bornage extranational, il est intéressant de se focaliser sur le domaine du géomètre-expert en France.

1.2.2. L'image au service du géomètre-expert en France

Le géomètre-expert réalise des délimitations liées à la topographie ou au foncier. L'image est un outil très intéressant qui lui permet de répondre à ces besoins en matière de délimitation.

Dans le domaine du foncier l'image est efficace car elle permet de figer un instant présent et donc les limites apparentes. Ainsi, elle permet de **rendre compte d'une situation passée de façon objective**. En France, l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN) met à disposition sur son site du Géoportail⁷⁶ certaines des campagnes aériennes réalisées des années 1919 à aujourd'hui. Le cabinet de géomètre-expert HOUDRY a utilisé cette ressource afin de régler un conflit entre cultivateurs. Dans cet exemple, les champs cultivés sont issus de plusieurs échanges informels passés entre les anciens propriétaires il y a plus de trente ans. Grâce aux photographies aériennes datant de l'échange, le géomètre a pu mettre en évidence qu'une partie de l'échange n'a pas été appliquée. Ainsi, l'un des cultivateurs exploite depuis de nombreuses années les deux parcelles échangées. Ceci a permis aux exploitants de se rendre compte objectivement d'une situation puis de se concerter pour remettre en conformité leurs limites de culture.

Toujours en matière de foncier, il faut rappeler que le Procès-Verbal de Bornage Normalisé (PVBN) fait mention d'éléments de présomption permettant de fixer la position de la limite séparative. Sachant que **la photographie peut être un élément de présomption**, le géomètre-expert peut, et dans certain cas doit prendre en compte les photographies aériennes ou terrestres pouvant lui permettre d'établir la limite. Cependant dans la pratique, l'image n'est quasiment jamais rapportée par les parties et ne permet pas à elle seule d'établir la position de la limite. Dans les cabinets de géomètres experts interrogés⁷⁷, il n'existe aucun cas où une image a permis d'établir la limite de propriété, même lorsqu'elle est incluse dans un faisceau d'indices.

En ce qui concerne la topographie, il existe de nombreux exemples où le géomètre peut faire appel à **l'image de télédétection pour délimiter des surfaces ou des volumes**. En effet, avec la démocratisation de la photogrammétrie et du drone, il est de plus en plus facile d'effectuer des campagnes réduites de photogrammétrie. Par exemple, le cabinet HOUDRY réalise régulièrement des suivis de carrière et du calcul de cubature⁷⁸ grâce à cette technique. Ces opérations consistent à déterminer des volumes de matériau présent sur un site donné. Sachant qu'un volume se calcule par le produit d'une surface par une hauteur, la photogrammétrie permet de réaliser une délimitation des volumes dans les trois dimensions. En effet, à partir du nuage de points 3D il est possible de calculer l'aire de la base du tas et de créer un MNT (Modèle Numérique de Terrain) de sa surface. À partir de ces deux informations il est aisé de calculer son volume.

⁷⁶ Site internet du Géoportail de l'IGN : <http://www.geoportail.gouv.fr>.

⁷⁷ Affirmation issue d'échanges avec Mme Gaëlle GAILLARD, M. Guillaume LLORCA et M. Benoît HOUDRY.

⁷⁸ Calculs géométriques permettant de déterminer des volumes.

Comme il est possible de l'observer, l'image est un outil important pour le géomètre-expert en France. Afin de conclure cet état de l'art de l'utilisation de l'image comme outil de délimitation, un dernier cas à part est envisagé : le domaine agricole. Cette distinction entre le domaine du géomètre-expert et le domaine agricole est effectuée puisque leurs besoins en termes de délimitations sont différents.

1.2.3. Le domaine agricole

Les activités agricoles modifient et façonnent fortement l'aspect de notre territoire. Le besoin de **délimiter les parcelles agricoles** découle de l'intérêt porté par les scientifiques en matière d'hydrologie, de paysage, de biodiversité, mais aussi par les propriétaires et par les producteurs. Une étude⁷⁹ a été réalisée sur une méthode de **délimitation automatique** des parcelles agricoles via les images de télédétection Pléiades⁸⁰. Même si les recherches et tests sur ce sujet sont rares, les résultats sont encourageants et montrent qu'il est tout à fait possible d'utiliser les images de télédétection comme base pour délimiter ces parcelles.

L'état de l'art de l'image comme outil de délimitation a permis de faire ressortir de nombreuses applications techniques. Il a également contribué à souligner l'importance de l'image pour les délimitations liées au foncier, notamment dans les pays en développement. En ce qui concerne les pays développés, l'utilisation des images apparaît nettement plus ponctuelle. Afin de mettre en évidence le potentiel des images pour les délimitations foncières des pays développés, la suite de l'étude se consacre aux images de télédétection pour une délimitation virtuelle.

1.3. Les images de télédétection pour une délimitation virtuelle

Avant de réaliser une délimitation à partir des images de télédétection, il est essentiel de présenter cette technique permettant d'aboutir au support de base final. Ensuite, il est important de prendre en compte les caractéristiques des systèmes d'acquisition actuels afin de s'orienter vers la solution la plus adaptée pour réaliser une délimitation virtuelle. Dans un premier temps, il semble essentiel de présenter globalement la télédétection (1.3.1.) pour ensuite se focaliser sur la photogrammétrie (1.3.2.). Dans un second temps les délimitations théoriques possibles sont présentées en fonction de la précision attendue sur la limite ou du matériel imposé (1.3.3.). Enfin, l'aspect pratique de la délimitation virtuelle est envisagé en déterminant des limites via les images de télédétection (1.3.4.).

1.3.1. Généralités sur la télédétection

La télédétection « regroupe l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci »⁸¹. Elle permet d'interpréter ces objets par des mesures spécifiques et par l'étude de leurs comportements spectraux et de leurs distributions spatiales. Cette science se compose de quatre éléments principaux : un vecteur, un capteur, un outil de traitement et un objet d'étude⁸².

⁷⁹ Nesrine CHEHATA, Arnaud LE BRIS, Philippe LAGACHERIE. « Délimitation des parcelles agricoles par classification d'images Pléiades ». Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection. Janvier 2015 n°209, page 165 à 171.

⁸⁰ La constellation Pléiades est constituée de deux satellites : Pléiade 1 lancé en 2011 et Pléiade 2 en 2012. Le but premier de la constellation est de fournir des informations dans un délai très court (inférieur à 24 heures) et de permettre une grande réactivité dans le suivi de crise. Par Olivier De Joinville dans « Les principaux satellites optiques d'observation de la terre. ».

⁸¹ Journal officiel de la république du 11 décembre 1980. Terminologie de la télédétection aérospatiale. Dans l'arrêté du 26 Juillet 1988 relatif à l'enrichissement du vocabulaire de la télédétection aérospatiale.

⁸² Laurent POLIDORI Cours de télédétection ESGT.

La télédétection se compose de deux domaines majeurs : la géométrie et la radiométrie. Le premier domaine naît de la nécessité de connaître très précisément la trajectoire des satellites, le géoréférencement des pixels, et la résolution spatiale (1.3.1.1.). Le second domaine intervient afin de définir la résolution spectrale et radiométrique (1.3.1.2.). L'approfondissement de ces deux domaines conduit à se questionner sur les besoins géométriques et radiométriques de l'image pour réaliser une délimitation virtuelle.

1.3.1.1. Le domaine géométrique

La **résolution spatiale**⁸³, ou résolution géométrique, se définit comme la capacité d'un capteur à séparer deux objets. C'est le pouvoir séparateur permettant de compter des objets rapprochés. Elle dépend de la cadence spatiale de l'échantillonnage : la **taille du pixel**⁸⁴ et du **champ de vue instantané** : étendue de la surface décrite par une mesure radiométrique. Cette résolution ne doit pas être confondue avec la **précision de localisation** qui s'obtient en mesurant la **parallaxe**⁸⁵ sur des points de contrôle. Grâce à des règles⁸⁶ et tests empiriques, il est possible de déterminer la taille nécessaire du pixel au sol en fonction de la taille de l'objet à observer. Ainsi, pour interpréter un objet d'une taille donnée, il faut une taille de pixel au sol trois fois inférieure. Pour l'identifier il faut une taille de pixel au sol vingt et une fois inférieure.

Le **géoréférencement** des pixels se traduit par le passage de leurs coordonnées « image » à un système de coordonnées « terrestre » déterminé. Pour réaliser cette étape, plusieurs méthodes existent et dépendent des caractéristiques du vecteur de télédétection. (Cette notion est abordée dans le paragraphe consacré à la photogrammétrie par la suite).

1.3.1.2. Le domaine radiométrique

La **radiométrie** se définit comme la « science ou la technique dont le sujet d'étude est lié au rayonnement électromagnétique. Elle se traduit par une représentation numérique de la réflectance spectrale d'un objet pour une longueur d'onde donnée »⁸⁷. Elle permet de faciliter la détection et l'interprétation des objets et aussi d'estimer des grandeurs physiques liées à ces objets.

Quand il est fait référence à la **résolution spectrale**, il s'agit du pouvoir de séparation spectrale du capteur : sa capacité à reconnaître des différences dans le spectre électromagnétique. Il ne faut pas la confondre avec la résolution radiométrique⁸⁸ qui se définit comme le pouvoir de séparation entre différents niveaux de luminance reçue.

Les deux grands domaines vus précédemment semblent indépendants néanmoins en ce qui concerne la télédétection, ils sont **fortement liés**. Il est intéressant de noter que la capacité de détection⁸⁹ d'un capteur peut être inférieure à la taille d'un pixel au sol. Cette capacité dépend du contraste qu'il existe entre l'objet et son environnement. Il est alors essentiel de prendre en compte les paramètres propres à chaque domaine afin d'obtenir un résultat de bonne qualité générale.

⁸³ Laurent POLIDORI. Cours de télédétection ESGT. Page 16.

⁸⁴ Cadence spatiale de l'échantillonnage. On lui associe par commodité la géométrie d'une grille, mais les mailles carrées n'ont pas de réalité physique. Laurent POLIDORI. Cours de télédétection ESGT page.16.

⁸⁵ Écart entre la position connue et la position calculée. Laurent POLIDORI. Cours de télédétection ESGT page.19.

⁸⁶ Cours de télédétection ESGT. Par Laure CHANDELIER. Disponible sur le site internet de l'ENSG : http://fad.ensg.eu/moodle/file.php/316/La_prise_de_vues_photogrammetriques_papier.odt

⁸⁷ Olivier DE JOINVILLE. Cours de télédétection ESGT : « La télédétection optique », Page 18.

⁸⁸ Olivier DE JOINVILLE. Cours de télédétection ESGT : « La télédétection optique », Page 19.

⁸⁹ Laurent POLIDORI. Cours de télédétection ESGT par. Page 16.

1.3.1.3. Caractéristiques générales des images de télédétection

Les nombreux vecteurs et capteurs de télédétection produisent des images variées. Dans le tableau suivant, les principaux vecteurs et les caractéristiques envisageables des images correspondantes sont résumés.

Vecteurs	Satellite	Avion	Drone	Terrestre
Altitudes d'utilisation	36000 à 800 km	10 à 0,5 km	150 à 5 m	5 à 0 m
Taille d'un pixel au sol possible	100 km à 40 cm	1 m à 10 cm	Centimétrique	Centimétrique à millimétrique
Applications principales	Environnement, météo, agriculture, cartographie, ...	Cartographie, environnement, agriculture	Cartographie, agriculture, archéologie	Architecture, archéologie
Couvertures envisageables	Mondiale à locale	Régionale à locale	Locale	Ponctuelle
Résolutions temporelles	Dépend de l'orbite des satellites	Dépend de la commande	Dépend de la commande	Dépend de la commande
Principale condition climatique limitante	Couverture nuageuse	Couverture nuageuse	Vent fort et pluie	Pluie
Coût de mise en place	Important mais financé par l'État	Moyen	Faible	Très faible

Tableau 1 : Caractéristiques principales des images de télédétection en fonction des vecteurs.⁹⁰

Ce tableau permet de mettre en évidence des **vecteurs complémentaires**. En effet chaque plateforme d'acquisition permet d'atteindre une certaine taille de pixel au sol et possède des avantages et des inconvénients propres à sa mise en œuvre.

La présentation globale de la télédétection a permis de mettre en exergue deux domaines principaux : la géométrie et la radiométrie. Elle souligne aussi la capacité de la télédétection à s'adapter à des conditions différentes et à des applications variées. La suite du développement se concentre sur une technique de télédétection particulière : la photogrammétrie.

1.3.2. Focus sur la photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique de télédétection qui permet de reconstituer des objets en trois dimensions à partir de photographies en deux dimensions. Elle se base sur le même principe que nos yeux : la stéréovision⁹¹. Avant de déterminer les délimitations théoriques possibles à partir de l'orthophotographie (1.3.3.), il est essentiel de rappeler les principes généraux de la photogrammétrie (1.3.2.1.) pour ensuite établir, notamment grâce à la réalisation de tests, les paramètres optimaux de l'aérotriangulation (1.3.2.2.) et de la photographie (1.3.2.3.).

⁹⁰ Laure CHANDELIER, cours de photogrammétrie ESGT « Les systèmes d'acquisition d'images numériques haute résolution », 2015, page 1. Disponible sur le site internet de l'ENSG : <http://www.ensg.eu/>.

⁹¹ Vision stéréoscopique permettant de voir en relief.

1.3.2.1. Principes généraux de la photogrammétrie

Le calcul photogrammétrique pour un couple stéréoscopique⁹² se décompose en plusieurs orientations : interne⁹³, relative⁹⁴, absolue⁹⁵ et externe⁹⁶. Son objectif est de réaliser les changements d'échelles, les rotations et les translations nécessaires au passage des coordonnées images aux coordonnées objets puis enfin aux coordonnées terrains.

Ces diverses orientations sont à réaliser pour chaque couple stéréoscopique, ce qui rend la tâche laborieuse et chronophage. **L'aérotriangulation** permet de simplifier la procédure. Cette opération regroupe l'ensemble des étapes qui permettent de géoréférencer toutes les images d'un bloc photogrammétrique pour lequel on dispose d'un nombre réduit de points d'appui. Pour réaliser l'orientation externe du bloc il faut les mêmes données que pour les diverses orientations : le certificat d'étalonnage, la focale lors des prises de vue, et les points d'appui. Néanmoins avec la miniaturisation et la progression de la technologie de nouvelles données viennent s'ajouter afin de faciliter le calcul. On retrouve, par exemple, les informations GNSS⁹⁷, obtenues grâce au récepteur GNSS embarqué dans le vecteur, ou encore les informations d'attitudes⁹⁸ obtenues via l'utilisation d'une centrale inertielle. L'amélioration des algorithmes de calcul permet aussi de faire progresser la méthode avec, par exemple, l'utilisation de la géométrie projective⁹⁹, le développement de la géométrie épipolaire¹⁰⁰, l'amélioration des fonctions de corrélation ou encore l'utilisation de la multi-stéréoscopie. L'aérotriangulation peut suivre trois méthodes de compensation différentes, par bande, par modèle indépendant ou par faisceaux. La méthode la plus efficace et la plus utilisée par les logiciels est la méthode de compensation par faisceaux.

L'aérotriangulation implique le **respect d'une méthode** de prise de vue. Cette dernière se focalise principalement sur le recouvrement des clichés entres eux et dépend fortement des conditions de prise de vue. Ceci a pour objectif de conserver la stéréoscopie ainsi qu'une marge de sécurité pour l'ensemble du bloc photogrammétrique. L'aérotriangulation nécessite un certain nombre de points d'appui. La quantification de ce dernier dépend du matériel embarqué sur le vecteur. Par exemple si on utilise que les points d'appui pour effectuer l'aérotriangulation il faut théoriquement un point (3D) tous les cinq ou six

⁹² Deux images prises dans des conditions semblables à celles de la vision humaine. Laure CHANDELIER. Cours de photogrammétrie ESGT 2015. Page 3. Disponible sur le site internet de l'ENSG : www.ensg.eu/.

⁹³ L'orientation interne a pour objectif de reconstituer les faisceaux perspectifs tels qu'ils étaient au moment de la prise de vue en corrigeant les déformations subies au moment de la prise de vue aérienne. Dans le cas du numérique, le certificat d'étalonnage de l'appareil photo ainsi que les données présentent dans l'EXIF (EXchangeable Image file Format) des photographies permettent de réaliser cette première étape. Le certificat se compose des paramètres internes de la caméra, on y retrouve : les coordonnées du centre optique, la forme de la distorsion et les coefficients du polynôme de distorsion.

⁹⁴ L'orientation relative permet de rendre coplanaire les rayons homologues du couple. En effet pour qu'il y ait intersection entre deux droites de l'espace de dimension trois elles doivent appartenir au même plan : c'est la condition de coplanarité. Ainsi, il est nécessaire, pour chaque couple stéréoscopique, de pointer au moins cinq points de liaison, c'est-à-dire visible sur les deux photos. Aujourd'hui dans le cas du numérique cette étape est automatisée. À la fin de cette orientation on se trouve dans le système modèle.

⁹⁵ L'orientation absolue a pour objectif de passer du repère modèle au repère terrain. Pour un couple stéréoscopique, il nécessite au moins trois points d'appui connus en trois dimensions dans le repère terrain. Les points d'appui sont des points homologues connus en coordonnées terrain, et pris en compte dans le calcul photogrammétrique. Il faut les pointer manuellement dans les photographies même dans le cas du numérique. La position et le nombre de ces points sont très importants et doivent faire l'objet d'une attention particulière puisque dans le cas ordinaire ils représentent les fondations de la transformation des coordonnées vers le repère terrain.

⁹⁶ L'orientation externe se définit comme l'action de géoréférencement d'une image, c'est-à-dire déterminer la position et l'orientation de cette image dans le repère terrain. Elle déduit des orientations relative et absolue les six paramètres externes de la caméra dans ce repère. La validation du géoréférencement peut être réalisée par le biais des points de contrôle connus en coordonnées terrain mais n'interviennent pas dans le calcul photogrammétrique.

⁹⁷ Global Navigation Satellite System (GNSS).

⁹⁸ Lacet, roulis, et tangage.

⁹⁹ La géométrie projective est le domaine de la géométrie qui modélise les notions intuitives de perspective et d'horizon. Elle étudie les propriétés inchangées des figures par projection. Source internet : www.wikipedia.org/ / « Elle permet d'écrire linéairement les relations entre espace objet 3D et espace image 2D, et aussi les relations entre images sans connaître ni les paramètres internes, ni les paramètres externes de la caméra. ». Par Elisabeth SIMONETTO. Cours de traitement numérique des images ESGT. 2015.

¹⁰⁰ « La géométrie épipolaire est un modèle mathématique de géométrie, qui décrit les relations géométriques de différentes photos du même objet, prises de différents points d'observation. Elle permet de décrire les dépendances entre les pixels en correspondance – c'est-à-dire ceux formés par un seul point de l'objet observé sur chacune des images. ». www.wikipedia.org.

couples et un point altimétrique tous les couples. Afin de réaliser une délimitation, à partir d'une orthophotographie par exemple, il est essentiel de rechercher et de déterminer les paramètres à prendre en compte pour réaliser l'aérotriangulation. En effet, c'est cette opération qui permet la production de cette image de télédétection aux caractéristiques particulières.

1.3.2.2. Paramètres optimaux pour l'aérotriangulation

L'aérotriangulation permet de résoudre l'orientation externe de toutes les images d'un bloc photogrammétrique simultanément en disposant d'un nombre réduit de points d'appui. Les deux points essentiels de cette méthode sont le recouvrement des clichés et le nombre de points d'appui.

Le recouvrement que l'on retrouve généralement lors d'une mission par avion est de 60% en longitudinale et 20% en transversale. Le choix d'un recouvrement faible dans le cas de l'avion découle du coût important de chaque prise de vue. Un faible recouvrement permet de réduire le temps de vol et donc le coût général de l'opération. En ce qui concerne le drone, la problématique est différente puisque le vol en lui-même a un coût réduit par rapport à celui du vol de l'avion. Cependant, la durée de vol maximale du drone est nettement inférieure ce qui implique plus de temps passé sur le terrain et donc un coût terrain supérieure. Le recouvrement de 80% en longitudinal et 60 % en transversal est optimal pour plusieurs raisons : il réduit le nombre de masque, augmente la qualité de restitution altimétrique et améliore la qualité de la mosaïque d'orthophotographies entre autres.

À partir de ces valeurs de recouvrement et du matériel, il est possible de calculer des éléments indispensables au déroulement de l'aérotriangulation. Par exemple, afin de **conserver la stéréoscopie** la variation d'altitude maximale présente sur le terrain ne doit pas dépasser une certaine valeur. Appliqué à notre cas on obtient une dénivelée maximale admissible de 36 m. Le détail des calculs est disponible en *annexe 1*.

Un fort recouvrement semble cumuler que des avantages, néanmoins quelques inconvénients subsistent. Le nombre de clichés et donc le temps de post-traitement ainsi que le temps de vol augmentent considérablement avec une valeur du recouvrement croissante. L'*annexe 2* permet d'illustrer ce propos. De plus pour un couple stéréoscopique la précision de restitution altimétrique est dégradée avec une base courte. En effet plus la base est petite, plus l'angle de l'intersection est faible :

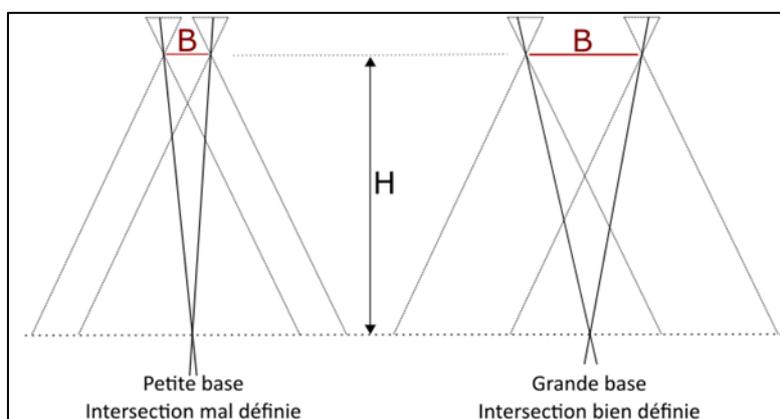


Figure 1 : Influence du rapport B/H sur la restitution altimétrique.¹⁰¹

¹⁰¹ Laure CHANDELIER. Cours de photogrammétrie « La prise de vues photogrammétriques » ESGT. 2015. Page 19. Disponible sur le site internet de l'ENSG : http://fad.ensg.eu/moodle/file.php/316/La_prise_de_vues_photogrammétriques_papier.odt

Néanmoins cette conséquence est atténuée grâce à la multi-stéréoscopie et l'aérotriangulation.

Le nombre de points d'appui pour un bloc photogrammétrique dépend fortement des caractéristiques du vecteur. De plus, il est essentiel de valider les calculs grâce à des points de contrôle. Ce nombre de points de contrôle doit être du même ordre de grandeur que le nombre de points d'appui. Il est très important de noter que le calcul photogrammétrique est valable à l'intérieur du polygone formé par les points d'appui. À l'extérieur de ce polygone le logiciel réalise une extrapolation. Il est possible de constater l'impact du manque de points d'appui en *annexe 6*. Le tableau suivant récapitule¹⁰² le nombre de points d'appui nécessaires en fonction des données disponibles :

Données disponibles	Nombre de point d'appui 3D	Nombre de point d'appui altimétrique
Sans trajectoire GNSS	1 point tous les 5 couples	1 point par couple
Avec trajectoire GNSS	4 points aux coins du bloc	1 point tous les 30 couples
Avec trajectoire GNSS et vol croisé	4 points aux coins du bloc	1 point tous les 30 couples en bord de bloc

Tableau 2 : Récapitulatif du nombre de points d'appui nécessaire en fonction du vecteur et de ses caractéristiques.¹⁰³

L'utilisation des données inertielles liées à la trajectoire et à l'orientation des photographies permet de réduire le temps de traitement sous Pix4D¹⁰⁴. Ces données n'ont aucun apport prouvé pour l'aérotriangulation mais permet le géoréférencement directe si les données sont suffisamment précises et si l'on dispose d'un certificat d'étalonnage de précision. Le test réalisé avec le drone Fox6¹⁰⁵ illustre ce besoin en données inertielles précises. Il permet également de souligner l'importance de la présence des points de contrôle malgré l'absence des points d'appui. Dans ces conditions ils représentent le seul élément de contrôle.

Pour valider l'aérotriangulation il faut **valider plusieurs étapes**¹⁰⁶ :

- Sur la structure du chantier :
 - Nombre et répartition des points d'appui et de contrôle corrects,
 - Structure du bloc photogrammétrique correcte : recouvrement et points de liaison suffisants et de qualité.
- Sur les paramètres du calcul :
 - Pondération du calcul en accord avec la précision des mesures.
- Sur les résidus :
 - Écarts sur les points de contrôle en accord avec leurs écart-types à priori,
 - Résidus sur les points d'appui en accord avec leurs écart-types à priori,
 - Résidus clichés en accord avec la précision a priori des mesures clichées,
 - Moyenne des résidus précédents nulle (absence de biais).

Enfin, il faut préciser que le résultat photogrammétrique ne peut pas être plus précis que les données de base. En effet, ils représentent la base du calcul. Par exemple pour un traitement sans données inertielles suffisamment précises, le résultat de la restitution ne peut pas être de meilleure qualité que celle

¹⁰² Laure CHANDELIER. Cours de photogrammétrique et lasergrammétrique ESGT. 2015. Page 36. Disponible sur le site internet de l'ENSG : www.ensg.eu/

¹⁰³ Élisabeth SIMONETTO, Cours de photogrammétrique et lasergrammétrique ESGT, 2015, Page 35 à 40.

¹⁰⁴ Détails du matériel du cabinet HOUDRY en annexe 10.

¹⁰⁵ Détails du matériel du cabinet HOUDRY en annexe 10.

¹⁰⁶ Laure CHANDELIER. Cours de photogrammétrique analytique ESGT. 2014. Page 52.

des points d'appui ayant servi au géoréférencement. La précision finale dépend de la qualité des prises de vue et des conditions de vol, de la précision des points d'appui et de la qualité du calcul de l'aérotriangulation.

Après avoir mis en évidence les paramètres adéquats pour réaliser l'aérotriangulation, il est important de déterminer ceux concernant la prise de vue photographique. En effet, la photographie constitue la donnée de base de la photogrammétrie.

1.3.2.3. Paramètres optimaux pour la photographie

Dans le cas de la photogrammétrie, **l'outil de mesure principal est la photographie** même si de nombreuses autres données supplémentaires interviennent aujourd'hui. La prise de vue photographique est une discipline à part entière qui demande de nombreuses compétences techniques. Avant de détailler et de tester les principaux réglages adaptés à notre cas, il est important de rappeler que les logiciels de photogrammétrie utilisent une fonction de corrélation afin de détecter les pixels homologues. Donc plus les pixels sont individualisables les uns des autres, plus il y a de chance d'obtenir une corrélation importante.

Le capteur photographique de l'appareil photo peut être de type CCD (Charge Coupled Device) ou de type CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor). Le premier permet d'obtenir une réponse plus linéaire à la lumière et nécessite moins d'amplification donc bruite moins le signal enregistré. Le capteur CMOS est plus résistant à l'éblouissement, moins cher et moins énergivore. Néanmoins, le capteur CCD reste la meilleure option pour de la photogrammétrie du fait de sa qualité supérieure¹⁰⁷.

La taille du capteur doit être grande et celle des photosites¹⁰⁸ doit être petite. En effet, les photosites convertissent le rayonnement électromagnétique (photon) en un signal analogique (électron). Le bruit photonique¹⁰⁹ étant inversement proportionnel au nombre de photons capturés, une taille réduite de photosite permet alors d'augmenter le rapport signal sur bruit. Il est important de souligner qu'un nombre croissant de photosites sur un capteur de taille fixe n'est pas forcément bénéfique contrairement à ce que l'on peut penser. Ceci entraîne une augmentation du bruit de mesure et donc est néfaste pour la photographie. Pour cette raison, il ne faut pas se focaliser uniquement sur le nombre de photosites du capteur, mais également sur ses dimensions. Il est intéressant de rappeler qu'un grand capteur permet de couvrir une surface au sol supérieure pour une distance focale équivalente. Aussi, la dynamique du capteur, c'est-à-dire sa capacité de restitution dans les zones claires ou sombres, est améliorée avec un capteur de grande taille.

Le choix entre une **photographie en couleur ou en nuance de gris** n'a pas une grande importance dans le traitement photogrammétrique sauf en ce qui concerne l'esthétique du rendu final. Un pixel codé sur un octet¹¹⁰ peut prendre plus de 16 millions¹¹¹ de valeurs pour une image couleur tandis qu'un pixel de la même image transformée en niveaux de gris codé sur un octet peut prendre 256 valeurs, il semble que la quantité d'informations apportées par l'image couleur est nettement supérieure. Le test réalisé sur des données réelles permet de vérifier cette hypothèse (*annexe 3*). Il permet de mettre en avant la faible influence de la couleur sur la qualité géométrique du calcul photogrammétrique.

¹⁰⁷ Voir le site internet et la vidéo de démonstration associées sur : www.fpv-passion.fr/camera-ccd-ou-cmos-pour-le-fpv/

¹⁰⁸ Nom des cellules photoélectriques qui composent le capteur. Elles correspondent au plus petit élément qui réagit à l'intensité lumineuse.

Source : www.cours-de-photo.com/definition-photosite-m68.html.

¹⁰⁹ Bruit proportionnel au carré du signal et donc au nombre de photons capturés. Ce bruit est inévitable, et il est lié à la nature physique de la lumière et de sa capture.

¹¹⁰ Regroupement de 8 bits.

¹¹¹ Calculé de la façon suivante : $256^3 = 16\,777\,216$ pixels.

Le réglage du **triangle de l'exposition**¹¹² est spécifique dans le cas de la photogrammétrie. Ce triangle permet d'ajuster la durée de l'exposition, la sensibilité du capteur et l'ouverture. Ces trois paramètres s'influencent mutuellement et impactent la photographie résultante. La sensibilité du capteur (ISO) augmente parallèlement au bruit numérique. L'ouverture réduit la profondeur de champ au fur et à mesure qu'elle augmente. La durée d'exposition peut entraîner du flou lorsqu'elle augmente. Il faut choisir un juste équilibre afin d'avoir une photographie adaptée à la situation. La meilleure solution pour le cabinet HOUDRY est d'utiliser le réglage « Sport » de l'appareil photo qui donne priorité à la durée d'exposition définie. Le logiciel interne de l'appareil ajuste automatiquement la sensibilité et l'ouverture. D'après le test réalisé avec des photos légèrement floues, disponible en *annexe 4*, il apparaît que le réglage principal pour la photogrammétrie est la durée d'exposition. Afin de ne pas introduire de bruit superflu et d'obtenir un résultat de bonne qualité il est possible de définir la durée d'exposition maximale. Le flou produit par le déplacement du vecteur, aussi appelé filé, pendant un temps (Δt) et à une vitesse (v) transforme un objet ponctuel en petit segment (Δd), on a :

$$\Delta d = \frac{\Delta t \cdot v}{Tps}$$

Équation 1 : Calcul du filé

Avec, la vitesse de vol maximum (v) = 8 m/s et la taille de pixel au sol (Tps) = 1,5 cm. Si on souhaite obtenir un filé quasiment nul, c'est-à-dire égal à un pixel ($\Delta d = 1$ pixel) on obtient :

$$\Delta t_{\max} = \frac{\Delta d \cdot Tps}{v} \quad \text{d'où} \quad \Delta t_{\max} = \frac{1}{533} \text{ seconde, soit environ } 1,9 \text{ ms.}$$

Il faut donc sélectionner une durée d'exposition inférieure à cette valeur de 1,9 ms.

Il est important de noter que ce calcul repose sur la taille du pixel au sol et donc sur de nombreux paramètres de vol. Plus cette taille de pixel au sol diminue plus la durée maximale d'exposition visant à éviter le filé va diminuer.

La distance focale impacte la taille du pixel au sol ainsi que la précision de restitution liée : plus la distance focale augmente plus la taille du pixel au sol diminue et donc plus la surface couverte par la photographie est réduite. Pour de la photogrammétrie, il apparaît donc logique d'utiliser une focale plutôt longue mais pas en excès puisque le nombre de photographies augmente également avec la croissance de la distance focale. Néanmoins, le choix de ce paramètre doit être adapté aux conditions de prise de vue et du résultat recherché.

Enfin, avant d'effectuer un traitement via un logiciel de photogrammétrie, il est indispensable de lui indiquer le **fichier de calibration** de l'appareil photo utilisé. Ce fichier renseigne sur la valeur des paramètres internes de l'appareil photo et il s'obtient après étalonnage de ce dernier. Il permet de corriger les déformations dues à l'optique de la caméra. L'*annexe 9* souligne l'importance de disposer de ce fichier avant de réaliser un calcul photogrammétrique.

Les paragraphes précédents permettent de souligner les nombreux paramètres intervenant lors d'un calcul photogrammétrique. La maîtrise de ces derniers est essentielle si l'on veut obtenir un produit en particulier. Afin de sélectionner un produit adapté à la réalisation d'une délimitation virtuelle, il est nécessaire de détailler les produits issus de cette technique.

¹¹² Cours permettant de comprendre l'influence des paramètres (ouverture, temps de pose et ISO) sur la photographie disponible sur le site internet : <http://blog.deviens-photographe.com/index.php/2014/06/premier-cours-photo-comprendre-exposition/>

1.3.2.4. Produits dérivés

La photogrammétrie permet de réaliser de nombreux produits permettant des applications multiples. Cette technique permet la production de nuage de points 3D, de modèle numérique de terrain (MNT), de surface (MNS) ou d'élévation (MNE), d'orthophotographie, de mosaïque et d'autres encore.

Le **nuage de point 3D** est obtenu par le principe de la corrélation automatique dense du processus photogrammétrique. À l'issue de l'aérotriangulation le nuage de point 3D est créé. La densité de ce nuage dépend des paramètres choisis lors du calcul. On retrouve, par exemple le choix de la densité, de faible à élever dans Pix4D, ou encore le nombre minimum de fois qu'un point doit être vu dans les photographies pour être créé, de 3 à 9 fois dans Pix4D. Ce nuage de points représente la base des autres produits comme le MNT et le MNS en photogrammétrie mais également pour d'autres produits comme les maquettes 3D.

Le **MNT** et le **MNS** s'obtiennent à partir du nuage de points 3D et d'un rééchantillonnage. Le MNT est de dimension 2,5D car pour un point connu en planimétrie correspond une unique valeur altimétrique. La photogrammétrie produit majoritairement des MNS puisque l'acquisition se fait depuis plusieurs dizaines de mètres de hauteur, et donc il y a souvent des zones de masque. Dans certain cas comme pour un champ labouré, la création d'un MNT est directement possible car il y a absence totale de masque et d'élévation. La création des modèles numériques permet de s'approcher de la réalité du terrain au mieux grâce à plusieurs méthodes de rééchantillonnage. Ces méthodes se composent de deux éléments : la définition de la géométrie de la grille et le choix d'une loi d'interpolation. Elles entraînent la simplification mais également la destruction d'une partie de l'information initiale, il faut donc être prudent lors de l'utilisation de ces produits. On retrouve pour illustration la méthode par grille régulière, par grille irrégulière TIN (Triangulated Irregular Network) ou encore par courbes de niveau. Chacune des méthodes a ses avantages et ses inconvénients. La méthode par grille régulière génère des fichiers simples mais volumineux et l'échantillonnage se fait de façon arbitraire en fonction du choix du pas de la grille, par exemple tous les mètres, et l'interpolation est simple. Cette méthode ne permet pas de coller au mieux au terrain dans le cas d'un relief très variable. La méthode irrégulière par TIN produit des fichiers complexes mais petits et l'échantillonnage s'adapte au terrain en fonction de l'algorithme d'interpolation. Enfin, la méthode par courbe de niveau est généralement produite à l'issue de l'obtention du MNT mais parfois il est intéressant de réaliser le processus inverse. Néanmoins la description par courbe de niveau sert généralement à faciliter la compréhension du paysage. Les MNT et MNS servent de base à la création des orthophotographies.

L'orthophotographie se définit comme « une photographie rééchantillonnée pour être rendue superposable à une carte. Ce produit a donc les propriétés géométriques d'une carte et les propriétés radiométriques de l'image d'origine »¹¹³. Les photographies sont corrigées des déformations dues au relief du terrain, à l'inclinaison de l'axe de prise de vue et à la distorsion optique. Si la photographie est corrigée en plus des déformations dues au sursol, il s'agit d'une orthophotographie vraie ou intégrale à condition de gérer les zones de masque. La création et la qualité des orthophotographies dépendent directement de la modélisation du terrain servant de base. Par exemple, dans la BD ORTHO¹¹⁴ de l'IGN, les bâtiments n'y sont pas redressés volontairement car le MNT utilisé n'intègre pas les bâtiments. Il est important de souligner les avantages d'une orthophotographie face à la carte : elle est plus facile de compréhension pour le grand public, c'est un support de communication puissant et enfin sa mise à jour est simple.

¹¹³ Laurent POLIDORI. Cours de télédétection ESGT. 2014. Page 20.

¹¹⁴ La BD ORTHO est l'image géographique du territoire national, la France vue du ciel. Source : www.professionnelts.ign.fr.

Le **mosaïquage** est un processus permettant d'assembler un ensemble d'orthophotographies. Soit il est réalisé image par image suite à l'orthorectification, soit il est réalisé en définissant des règles de choix sur un bloc de photographie en amont de l'orthorectification. La règle de choix du plus proche nadir est la plus souvent utilisée. Elle permet de sélectionner l'orthophotographie limitant au mieux l'étalement dû à la perspective conique de l'appareil photo. D'autres règles sont utilisées pour, par exemple, placer les lignes de mosaïquage entre les orthophotographies de façon peu visible.

Maintenant il est possible de s'interroger sur le potentiel de cette technique pour réaliser une délimitation.

1.3.3. Délimitations théoriques possibles

Afin de réaliser une délimitation virtuelle par procédé photogrammétrique, il est possible de se placer suivant deux perspectives. La première se basant sur la précision de délimitation finale à atteindre, ainsi il est possible d'obtenir les caractéristiques du matériel nécessaire (1.3.3.1.). La seconde se basant sur un matériel de caractéristiques données, et il est ainsi possible de calculer la précision de délimitation correspondante (1.3.3.2.). Avant de détailler ces deux points, il convient de rappeler que le terme « délimitation » employé ici correspond à l'aspect technique, c'est-à-dire que lors de la définition de la ligne séparant deux espaces contigus ayant des caractéristiques différentes, seul l'aspect technique est considéré. (L'aspect juridique concernant la délimitation virtuelle est abordé par la suite).

1.3.3.1. Matériel envisageable en fonction d'une précision spécifiée

Pour obtenir un ordre d'idée du matériel à utiliser pour atteindre une précision en position 3D donnée, quatre seuils de précision à atteindre sont envisagés. Le premier seuil inférieur à 10 cm correspond à un relevé de terrain naturel sommaire, pour un avant-projet par exemple. Le second seuil inférieur à 5 cm correspond à la précision d'un plan topographique au 1/500. Le troisième seuil inférieur à 2 cm correspond à la précision des activités topographiques courantes. Le quatrième seuil inférieur à 1 cm correspond à la précision d'un bornage en milieu urbain. Enfin, le cinquième seuil inférieur à 0,5 cm correspond à la valeur du seul empiètement sanctionné par la justice¹¹⁵.

Pour la suite on considère tous les paramétrages et principes vus en amont appliqués et donc adaptés au mieux pour de la photogrammétrie. En effet, la précision finale du calcul photogrammétrique dépend de nombreux éléments. Or, ici l'objectif est simplement de mettre en avant les éléments fondamentaux pour atteindre une précision définie.

Les informations sur le calcul de la précision a priori du calcul photogrammétrique sont difficiles à trouver dans la littérature existante. Néanmoins, les formules¹¹⁶ **pour un couple stéréoscopique** permettent de s'approcher de cette valeur :

$$\sigma \text{ restitution planimétrique théorique} = \sigma \text{ pointé linéaire} \cdot Tps$$

Équation 2 : Précision de restitution planimétrique théorique

¹¹⁵ Cour de cassation, chambre civile 3, du 20 mars 2002 pourvoi n°00-16015.

¹¹⁶ Laure Chandelier. Cours de photogrammétrie ESGT. 2015. Page 19. Disponible sur le site internet de l'ENSG : http://fad.ensg.eu/moodle/file.php/316/La_prise_de_vues_photogrammetriques_papier.odt

$$\sigma \text{ restitution altimétrique théorique} = \sigma \text{ pointé stéréoscopique} \cdot \frac{H}{B} \cdot \text{Tps}$$

Équation 3 : Précision de restitution altimétrique théorique

Le principal inconvénient de ces formules est qu'elles sont applicables uniquement pour un couple stéréoscopique. Or, aujourd'hui les logiciels de traitement utilisent la multi-stéréoscopie qui tend à limiter les différences entre les deux précisions de restitutions énoncées. De ce fait, les formules dissocient la planimétrie de l'altimétrie, ce qui est problématique pour déterminer une précision théorique globale. De plus, elles ne prennent pas en compte la précision intrinsèque des points d'appui.

Pour cette raison, la précision globale 3D a priori du traitement photogrammétrique est approximée. Deux types de précision sont pris en compte : la précision sur la position des points d'appui 3D et la précision de restitution 3D théorique du calcul photogrammétrique. Ces deux principaux éléments semblent suffisants pour obtenir une valeur approchée de la précision finale. Puisque ces précisions sont indépendantes, il suffit théoriquement de réaliser la somme quadratique de ces deux dernières pour obtenir globalement la précision théorique du calcul photogrammétrique :

$$\sigma \text{ globale 3D théorique} = \sqrt{(\sigma \text{ points d'appui 3D})^2 + (\sigma \text{ restitution 3D théorique})^2}$$

Équation 4 : Précision globale 3D théorique

$$\text{Avec, } \sigma \text{ restitution 3D théorique} = \sqrt{(\sigma \text{ pointé linéaire} \cdot \text{Tps})^2 + \text{Tps}^2}$$

Équation 5 : Précision de restitution 3D théorique

Avec la précision de pointé linéaire (σ pointé linéaire = 1 pixel), car dans notre cas la taille du pixel au sol (Tps) est toujours inférieure à 3 cm ce qui rend complexe le pointer au demi-pixel près. De plus, le matériel photographique utilisé n'est pas de type professionnel donc les photographies obtenues ne sont pas toujours de qualité irréprochable, ce qui justifie ce choix d'une précision de pointé linéaire de 1 pixel malgré qu'il soit possible de pointer au demi-pixel près¹¹⁷.

Pour **valider de façon empirique** la formule de précision 3D globale théorique, celle-ci a été appliquée à de nombreux chantiers traités par le cabinet HOUDRY :

Nom du chantier :	VAU	INF	EBE	LIE	EVE	BAR	GUN
Nombre de point de contrôle :	20	Nuage	5	4	6	5	20
Précision globale empirique 3D (m) :	0,046	0,0050	0,044	0,042	0,038	0,060	0,016
Précision globale théorique 3D (m) :	0,057	0,0080	0,064	0,056	0,057	0,060	0,015
Surévaluation (%) :	19,3	33,8	30,6	25,4	41,3	0,0	10,0

Tableau 3 : Comparaison de la précision empirique et théorique sur différents chantiers.

Comme il est possible de le constater dans le tableau ci-dessus, la formule de précision globale théorique est une bonne approximation de la précision obtenue empiriquement (voir les détails en *annexe 5*). Comparativement aux précisions de restitution pour un couple stéréoscopique, on remarque que la multi-stéréoscopie semble limiter la différence entre la précision de restitution planimétrique et altimétrique. De plus, on observe systématiquement une précision globale théorique un peu moins bonne

¹¹⁷ Laure Chandelier. Cours de photogrammétrie ESGT. 2015. Page 20. Disponible sur le site internet de l'ENSG : http://fad.ensg.eu/moodle/file.php/316/La_prise_de_vues_photogrammetriques_papier.odt

que la précision obtenue réellement : pour l'ensemble des chantiers elle est surévaluée en moyenne de 30 % et jamais sous-évaluée comme il est possible de constater.

La précision sur la position des points d'appui peut être de plusieurs ordres en fonction du matériel utilisé. Si on utilise une antenne GNSS, la précision en position en mode RTK¹¹⁸ est de 2 à 5 cm, en mode RTK moyenné est de 2 à 3 cm et en mode statique elle est inférieure à 2 centimètres. Si on utilise un tachéomètre actuel et en utilisant une méthode ordinaire la précision en position est inférieure au demi centimètre et inférieure à 0,3 cm en utilisant une méthodologie de précision. Ainsi en prenant la borne supérieure des intervalles de précision précités, on obtient cinq valeurs de précision sur la position des points d'appui : 5 cm, 3 cm, 2cm, 0,5 cm et 0,3 cm.

Pour la précision de la restitution, les éléments pris en compte dans la formule sont : la taille du pixel au sol, la précision de pointé linéaire. On remarque que plus la taille du pixel au sol diminue plus la précision de restitution augmente. Il faut donc une petite taille de pixel au sol tout en conservant un rapport B/H correct¹¹⁹.

D'après cette formule la taille du pixel au sol (Tps) est un élément prépondérant. Plus il est petit plus la précision globale 3D théorique augmente et pour le faire diminuer il est possible d'agir sur plusieurs leviers. La formule suivante permet de la calculer : $Tps = Tp \cdot \frac{H}{f}$

Néanmoins chaque levier d'action a une incidence sur d'autres paramètres comme on peut le voir dans l'exemple ci-dessous. Il faut donc être vigilant aux manipulations effectuées.

$$\text{Taille d'un côté de photosite : } (Tp) = \sqrt{\frac{\text{surface du capteur}}{\text{nombre de pixel}}} = 0,0039 \text{ mm,}$$

Équation 6 : Calcul de la taille d'un côté de photosite

État initial :

- Hauteur de vol : 60 m,
- Distance focale : 0,016 m,
- Nombre de cliché nécessaire pour 1 ha : 30 clichés.

¹¹⁸ Real Time Kinematic = temps réel. C'est un mode d'utilisation des antennes GNSS d'une précision a priori allant de 2 à 5 cm.

¹¹⁹ Le rapport B/H doit être compris entre ½ et ¼ en photogrammétrie aérienne. Laure CHANDELIER. Cours de photogrammétrie ESGT. p.19. Disponible sur le site internet de l'ENSG : http://fad.ensg.eu/moodle/file.php/316/La_prise_de_vues_photogrammetriques_papier.odt

Modification réalisée	Taille du pixel au sol résultante (cm)	Conséquences parallèles
Augmentation du nombre de pixel : 24Mpixel → 48Mpixels	1,5 → 1,0	Augmentation du bruit photonique Photosites moins sensibles Dynamique moins bonne Augmentation du prix
Réduction de la hauteur de vol : 60 m → 40 m	1,5 → 1,0	30 clichés → 70 clichés
Augmentation de la distance focale : 0,016 m → 0,024 m	1,5 → 1,0	30 clichés → 70 clichés
Augmentation de la surface du capteur : 23,5 x 15,6 cm → 43,8 x 32,9 cm	1,5 → 2,9	30 clichés → 6 clichés Photosites plus sensibles Meilleur dynamique Augmentation du prix

Tableau 4 : Conséquence d'une modification des paramètres de l'appareil photographique.

Comme il est possible de constater ci-dessus, il est très difficile de cibler les caractéristiques d'un appareil photo puisque **de nombreux paramètres peuvent être ajustés** pour obtenir une même taille de pixel au sol. Par exemple, il suffit d'augmenter la distance focale de l'appareil photo, ce qui est extrêmement simple à réaliser.

Le tableau suivant permet d'obtenir la taille du pixel au sol nécessaire en fonction du matériel topographique donné et de la précision à atteindre :

Précision à atteindre (1σ)		10 cm	5 cm	3 cm	1,5 cm	1,0 cm
Technique de rattachement	Type d'appareil	GNSS	GNSS	GNSS	Tachéomètre	Tachéomètre
	Méthode	RTK	RTK moyenné	Statique	Ordinaire	Précise
	Précision (1σ)	< 5 cm	< 3 cm	< 2 cm	< 0,5 cm	< 0,3 cm
Taille du pixel au sol		5 cm	2,5 cm	1,5 cm	1,0 cm	0,5 cm
Précision globale atteinte (1σ)		8,7 cm	4,6 cm	2,9 cm	1,5 cm	0,8 cm

Tableau 5 : Taille du pixel au sol nécessaire pour atteindre une précision globale donnée.

Pour illustrer la difficulté à identifier un appareil photo en particulier, il suffit de prendre l'exemple de l'appareil photo numérique Sony A6000¹²⁰ du cabinet HOUDRY. En effet cet appareil permet d'obtenir une taille de pixel au sol de 1,5 cm à une hauteur de vol de 60 m et pour une distance focale de 16 mm, soit une précision globale 3D possible inférieure à 2 cm. En modifiant uniquement la distance focale à 50 mm, ce qui est envisageable aujourd'hui, il est possible d'obtenir une taille de pixel au sol de 0,5 cm soit une précision globale 3D possible inférieure au centimètre.

En conclusion, il faut retenir que la précision globale 3D de la restitution **dépend autant de la façon dont on va déterminer nos points d'appui que des caractéristiques de l'appareil photo utilisé**. Il ne faut absolument pas se focaliser sur l'un ou l'autre de ces aspects mais réfléchir à chaque type de chantier en fonction du matériel à disposition. Ainsi, il faut être vigilant à la précision annoncée par les commerciaux qui prennent rarement l'aspect du rattachement en compte. Après avoir déterminé le matériel à choisir en

¹²⁰ Voir le matériel du cabinet HOUDRY en annexe 10.

fonction d'une précision fixée, il est possible de calculer la précision théorique en fonction du matériel à disposition.

1.3.3.2. Précision théorique possible en fonction d'un matériel donné

Déterminer la précision globale possible en fonction du matériel est similaire à déterminer les appareils possibles pour une précision donnée. Ainsi on obtient le tableau reprenant les précisions globales approximatives grâce à l'équation vue précédemment :

$$\sigma \text{ globale 3D théorique} = \sqrt{(\sigma \text{ points d'appui 3D})^2 + (\sigma \text{ restitution 3D théorique})^2}$$

Précision sur les points d'appui \ Précision de restitution	0,3 cm	0,5 cm	1 cm	2 cm	3 cm	5 cm
0,25 cm	0,4	0,6	1,0	2,0	3,0	5,0
0,5 cm	0,6	0,7	1,1	2,1	3,0	5,0
1 cm	1,0	1,1	1,4	2,2	3,2	5,1
5 cm	5,0	5,0	5,1	5,4	5,8	7,1
10 cm	10,0	10,0	10,0	10,2	10,4	11,2

Tableau 6 : Précision globale possible en fonction de la précision sur les points d'appui et de la restitution.

On se rend compte une fois de plus que pour atteindre une précision globale donnée il faut nécessairement **prendre en compte la précision du rattachement et la précision de restitution**. Selon l'objectif visé et les données disponibles, il faut adapter l'une ou l'autre des précisions. Par exemple pour une précision de restitution de dix mètres, il n'est pas cohérent d'utiliser une technique de rattachement précise. Un GPS de randonnée d'une précision métrique suffit à ne pas dégrader la précision globale. Pour rester cohérent les deux précisions doivent être du même ordre de grandeur et respectivement inférieures à la précision globale recherchée.

Après avoir établi les précisions de délimitation théoriques envisageables, il est indispensable de mettre en pratique les principes établis en amont. La suite du développement permet d'envisager la délimitation d'un point de vue pratique.

1.3.4. Délimitation virtuelle via les images de télédétection

Dans cette partie, seuls les aspects techniques de la délimitation sont envisagés. Afin de constater si une détermination de limite est possible en utilisant des images de télédétection plusieurs aspects ont été envisagés. Le premier consiste à reporter les coordonnées relevées sur le terrain sur l'image, et correspond à une **délimitation virtualisée** car la délimitation est effectuée totalement sur le terrain. Le deuxième aspect consiste à réduire le nombre de points implantés dans le cas d'une limite complexe, ce cas de figure est équivalent à une **délimitation semi-virtuelle** puisqu'une partie de la délimitation est effectuée sur le terrain et l'autre directement sur l'image. Enfin le troisième cas propose de tracer directement les limites géoréférencées sur la mosaïque d'orthophotographie. La délimitation est totalement effectuée via l'image de télédétection, c'est donc une **délimitation entièrement virtuelle**.

Cependant, si ces trois délimitations sont conceptuellement différentes elles sont identiques au niveau technique : il faut que les coordonnées d'un point levé sur le terrain soient les mêmes que celles obtenues via l'orthophotographie et vice versa. Ainsi la méthode permettant de les valider est identique. Dans chacun des cas, la comparaison validant la délimitation se focalise sur la comparaison entre ces deux types de coordonnées. On obtient ainsi des écarts interprétables grâce à des outils statistiques. Donc après avoir présenté les trois types de délimitation précédents (1.3.4.1. à 1.3.4.3.), il est essentiel de définir les outils statistiques (1.3.4.4.) permettant d'analyser la faisabilité d'une délimitation via l'orthophotographie (1.3.4.5.).

1.3.4.1. Report des coordonnées terrain sur l'image : la délimitation virtualisée

Virtualiser une délimitation a des intérêts multiples. Superposée à l'orthophotographie, la délimitation réalisée est accessible à un nombre plus important de personnes. En effet, la lecture d'une photographie est nettement plus simple que celle d'un plan. La délimitation basée sur l'orthophotographie permet également de la rendre plus durable car les coordonnées des sommets de la limite sont de nouveau disponibles sur l'image. Elle permet également de retrouver plus facilement les points matérialisés dans le cas où ces derniers sont enfouis ou couverts par la végétation.

La délimitation virtualisée se décompose en plusieurs étapes. Il est nécessaire de lever complètement les points de la limite sur le terrain puis dans un deuxième temps, il faut reporter les coordonnées obtenues pour chaque point sur l'orthophotographie. Pour réaliser un tel type de délimitation, il n'est pas obligatoire de produire en interne cette image de télédétection mais elle doit néanmoins être d'une précision suffisante, être dans le même système de coordonnées que le lever et enfin elle doit avoir été créée à une date suffisamment proche de celle du lever. En effet, le processus de création de l'orthophotographie varie en fonction du logiciel utilisé. L'*annexe 8* regroupe les principales options à considérer pour la création d'une orthophotographie sous Pix4D dans le but de réaliser une délimitation virtuelle.

Il est intéressant de noter que le portail Géofoncier¹²¹ est basé sur le principe de la délimitation virtualisée depuis la création du RFU (Référentiel Foncier Unifier) en 2010. En effet, tous les Géomètres-Experts doivent obligatoirement insérer les coordonnées des bornes implantées sur le terrain dans ce référentiel lorsque le PVBN a été signé et validé par toutes les parties concernées. Ensuite, elles sont directement visibles sur l'orthophotographie géoréférencée dans le système de référence légal Lambert 93. Ce RFU pourra permettre à terme de renouveler totalement le parcellaire cadastral à une précision nettement supérieure à celle du cadastre actuel.

Après avoir défini la délimitation virtualisée, la délimitation semi-virtualisée permet d'augmenter un peu plus la part virtuelle dans le processus de délimitation.

1.3.4.2. Réduction du nombre de points levés en cas de limite complexe : la délimitation semi-virtuelle

Dans certain cas le lever et, *a fortiori* la matérialisation physique de certaines limites complexes peut s'avérer peu utile et coûteux. L'exemple de la limite d'un bas de talus ou encore d'une limite en zigzag comme les berges d'un ruisseau illustre bien les cas ciblés. On constate que pour matérialiser ce genre de

¹²¹ « Lancé en juillet 2010, le portail GéoFoncier est porté par l'Ordre des Géomètres-Experts. Il se présente comme le guichet unique de l'information géographique foncière en France. Le portail GéoFoncier vous permet notamment de consulter la base de données de l'ensemble des interventions foncières effectuées par les géomètres-experts depuis 1997. ». Source www.geofoncier.fr.

limite, il faut lever et implanter de nombreux points sur le terrain et par conséquent y passer beaucoup de temps. Au final, après une opération souvent trop onéreuse pour le client, le nombre de points est souvent insuffisant pour caractériser totalement la limite. Utiliser l'image de télédétection dans ces cas peut permettre de réduire le coût de l'opération ainsi que le nombre de points implantés ou levés et enfin améliorer la caractérisation de la limite.

La délimitation semi-virtuelle se décompose en plusieurs étapes. Une fois la limite identifiée sur le terrain, le lever des points matérialisés doit être effectué. Ces points peuvent être le début et la fin de la limite, un point d'intérêt fort pour le client, un point de jonction avec une autre limite, et encore d'autres points. Ensuite il faut reporter les coordonnées des points levés sur l'orthophotographie. Enfin, il est possible de piqueter de nombreux autres points, non matérialisés sur le reste de la limite, directement sur l'orthophotographie. À l'issue de cette procédure tous les points de la limite sont matérialisés soit physiquement sur le terrain soit virtuellement sur l'orthophotographie.

Pour la délimitation semi-virtuelle, il semble important de disposer d'une orthophotographie réalisée après la matérialisation physique des points afin de pouvoir les observer sur cette dernière. En effet, ceci peut permettre de contrôler la partie virtuelle de la délimitation. Comme pour la délimitation virtualisée, cette image de télédétection doit avoir une précision globale suffisante, être dans le même système de coordonnées que le lever et enfin elle doit avoir été créée à une date suffisamment proche de celle du lever.

Après avoir exposé la délimitation semi-virtualisée, la délimitation virtuelle permet d'augmenter au maximum la part virtuelle dans le processus de délimitation.

1.3.4.3. Tracé des limites géoréférencées directement sur la mosaïque d'orthophotographie : la délimitation virtuelle

La délimitation virtuelle se différencie des deux délimitations précédentes. En effet, dans ce cas la partie terrain est inexistante puisque toute la délimitation est virtuelle. Cette différence est également son principal atout puisque ce sont les opérations de terrain qui sont le plus chronophage et qui ont le coût le plus élevé. À cela s'ajoute la suppression de la matérialisation physique des points de la limite, ce qui a pour conséquence de réduire encore un peu plus le coût de l'opération.

Pour réaliser une délimitation virtuelle une seule étape est nécessaire : identifier et piqueter la limite directement sur l'orthophotographie. Ainsi, on obtient les coordonnées de tous les points de la limite directement depuis l'orthophotographie. Il est important de noter que le système de coordonnées des points piquetés est nécessairement le même que celui de l'orthophotographie, il faut donc être particulièrement prudent lors de cette étape.

Pour la délimitation virtuelle il semble nécessaire de créer sa propre orthophotographie afin de pouvoir contrôler tout son processus d'élaboration. De plus, cette création permet d'obtenir une image de télédétection très récente et dans un système de coordonnées adéquat.

Les trois types de délimitations présentés permettent d'envisager la réalisation d'une délimitation virtuelle. Avant d'analyser la faisabilité d'une délimitation via l'orthophotographie (1.3.4.5.), il semble indispensable de définir les outils statistiques qui permettent d'effectuer cette analyse statistique (1.3.4.4.).

1.3.4.4. Définition des outils statistiques

L'objectif de ce paragraphe est de **définir les outils statistiques permettant d'analyser les résultats des tests effectués**. Une distinction importante à effectuer concerne l'exactitude et la précision. Comme il est possible de voir sur le schéma suivant, ce sont des notions différentes.

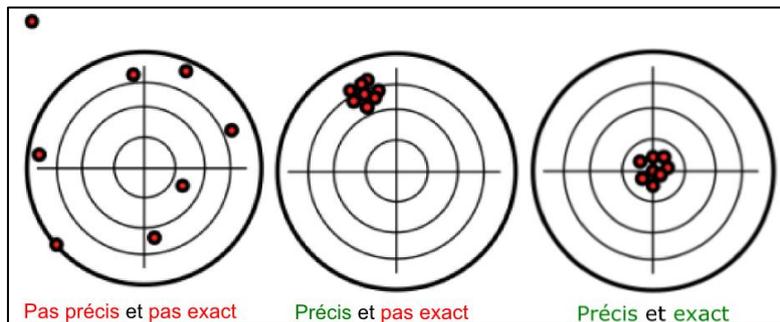


Figure 2 : Distinction entre la précision et l'exactitude.

La notion la plus simple à définir et la plus utilisée au quotidien est la **moyenne arithmétique (\bar{x})**. Réaliser une telle moyenne de nos écarts peut permettre de constater la présence d'un biais dans l'ensemble des mesures. Dans notre cas elle peut conduire à mettre en exergue une erreur systématique sur une composante comme, par exemple, une erreur sur la hauteur de la canne GNSS. Elle se calcule de la façon suivante :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=0}^n x_i}{N}$$

Équation 7 : Moyenne arithmétique

Avec : x_i l'écart numéro i ,
 \bar{x} la moyenne arithmétique des écarts,
 et N le nombre d'écarts.

Le terme précision est souvent mal employé dans la vie courante. En réalité, il qualifie l'incertitude de mesure c'est-à-dire la capacité d'un appareil à réaliser des observations répétées proches les unes des autres¹²². Il correspond à la fiabilité de la mesure et se calcule grâce à l'**écart-type (σ)** de la façon suivante :

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^p \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

Équation 8 : Précision

Il est essentiel de noter que l'écart-type est souvent donné à 1-sigma ce qui signifie que dans un espace à une dimension un écart à la moyenne à 68% de chance d'être compris dans l'intervalle définie par l'écart-type et la moyenne arithmétique : $\bar{x} - \sigma < x_i < \bar{x} + \sigma$. Ceci implique donc qu'il a 32% de chance d'être hors de cet intervalle.

Afin de pouvoir calculer l'**intervalle de confiance**, la répartition des écarts est considérée gaussienne. Cette considération est donc appliquée à toutes les données. Pour obtenir un intervalle de confiance pour l'ensemble des écarts pour une probabilité de chance (p) donnée, il est nécessaire de

¹²² Stéphane DURAND. Cours de Topométrie de précision ESGT. Page 13.

prendre en compte le nombre de mesure réalisé (N) et la répartition gaussienne de ces écarts ($t_{\alpha/2}$) déduit de la table statistique de Student :

$$I_p = \left[\bar{x} - t_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{N}}; \bar{x} + t_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \right]$$

Équation 9 : Intervalle de confiance

L'intervalle de confiance ainsi calculé est le meilleur indicateur permettant de valider nos tests pour des données d'une dimension.

L'exactitude est la qualité d'une observation d'être proche de la valeur vraie de l'observable¹²³. Pour quantifier l'exactitude d'un ensemble de mesure il est possible de calculer son **écart moyen quadratique (emq)** empirique de la façon suivante :

$$\text{emq} = \sqrt{\sum_{i=1}^p v_i^2 / (N - 1)}$$

Équation 10 : Écart moyen quadratique

Avec : v_i l'écart à la valeur vraie,
et N le nombre de mesure.

Comme pour l'écart-type, l'emq correspond à un intervalle de 68% dans un espace à une dimension. Il faut donc être conscient de la possibilité qu'un écart à la valeur vraie soit hors de l'intervalle définie par l'emq. En effet, il est possible de valider une certaine exactitude sur un ensemble de mesures malgré que l'une d'entre elles soit hors de l'intervalle de 68% définie par l'emq. Enfin, il est important de souligner que l'emq est un bon indicateur permettant d'analyser nos résultats pour une dimension puisqu'il prend en compte la moyenne arithmétique et l'écart-type. En effet il peut aussi être calculé de la façon suivante pour la composante en H par exemple :

$$\text{emq} (H) = \sqrt{\sigma H^2 + \bar{H}^2}$$

Équation 11 : Écart moyen quadratique

Le dernier outil statistique utilisé est l'**ellipse de confiance**. Cette ellipse définit l'iso-contour dans lequel les écarts se trouvent pour un pourcentage donné. Elle permet ainsi de définir une région de confiance en deux dimensions. L'équation de l'ellipse de confiance planimétrique s'obtient de la façon suivante :

$$\left(\frac{x}{\sigma x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma y}\right)^2 = S$$

Équation 12 : Ellipse de confiance

Avec (x) et (y) les demi-axes de l'ellipse,
(σx) et (σy) l'écart-type sur chaque composante,
et (S) la valeur tirée de la table statistique du Chi-2.

$$\text{Donc } x = 2 \sigma x \sqrt{S} \text{ et } y = 2 \sigma y \sqrt{S}$$

¹²³ Stéphane DURAND. Cours de Topométrie de précision ESGT. Page 14.

Pour obtenir les coordonnées du centre de cette ellipse de confiance il suffit de calculer la moyenne arithmétique des écarts. Par exemple : $O_{ellipse E, N} = (\bar{E}; \bar{N})$.

Ainsi pour analyser les résultats obtenus en planimétrie l'ellipse de confiance est l'outil idéal tandis que pour analyser les résultats obtenus en altimétrie il est plus judicieux d'utiliser l'intervalle de confiance.

1.3.4.5. Analyse de la faisabilité d'une délimitation via l'orthophotographie

Afin de vérifier si les trois types de délimitation exposés précédemment sont techniquement possibles à mettre en place, deux tests sur des données réelles ont été effectués et analysés grâce aux outils statistiques définis en amont.

1.3.4.5.1. Premier essai

Pour le premier test, les coordonnées levées sont issues d'un lever GNSS en mode RTK soit d'une précision inférieure à 5 cm. L'orthophotographie utilisée est produite par des données indépendantes, elle a une résolution spatiale de 2 cm et dispose d'une précision globale 3D théorique de 5,7 cm. Les points sont matérialisés sur le terrain par des cibles afin de limiter les erreurs d'interprétation et d'identifier le même point pour les deux types de lever. Les surfaces où les points sont matérialisés sont de type bitume, donc lisses et homogènes. Enfin, les prises de vue sont toutes orientées perpendiculairement au terrain c'est-à-dire verticalement. L'illustration suivante permet de se rendre compte de la configuration du chantier en question :

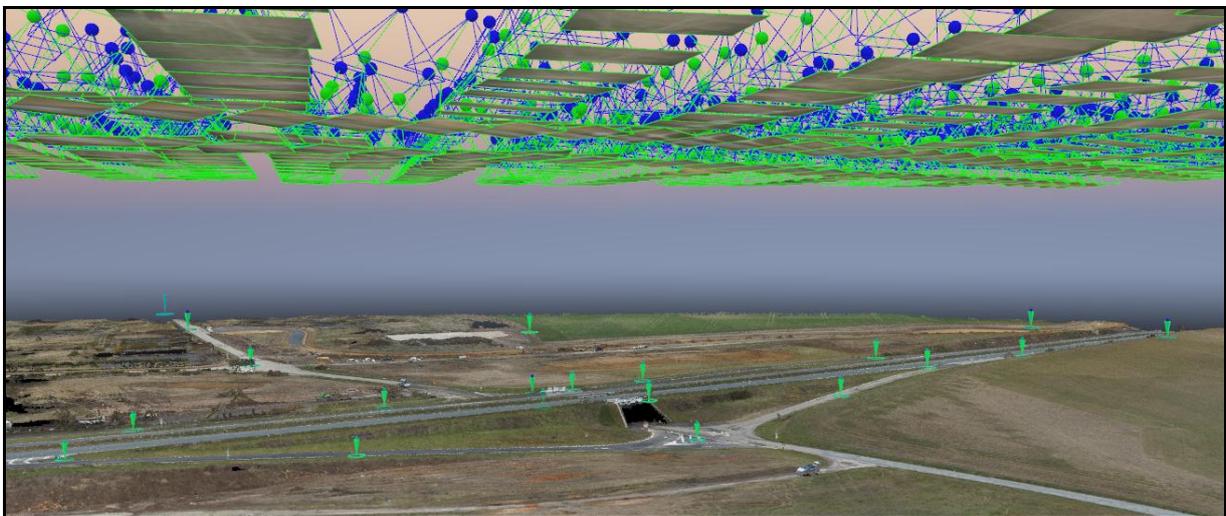


Figure 3 : Configuration du chantier du premier test. Source : Pix4D.

On obtient, pour un ensemble de 20 points levés à la fois sur le terrain et directement sur l'orthophotographie, les résultats suivants :

	Moyenne arithmétique	Écart-type (1 σ)
Écart en E	0,009 m	0,024 m
Écart en N	-0,001 m	0,024 m
Écart en H	-0,039 m	0,041 m

Tableau 7 : Moyenne et écart-type des écarts sur chaque composante, test 1.

La moyenne des écarts permet de faire ressortir un biais de près de -4 cm sur la composante en (H) car les écarts sont quasiment tous négatifs et du même ordre de grandeur. Pour les composantes en (E) et en (N) il n'y a pas de biais apparent puisque les moyennes sont proches de zéro.

On constate également une dispersion des écarts à la moyenne nettement supérieure sur la composante en (H) avec un écart-type de $4,1$ cm contre $2,4$ cm pour les composantes en (E) et en (N). Ceci met en exergue une **moins bonne détermination de la composante altimétrique**. Ces données permettent d'établir l'ellipse de confiance planimétrique :

	Coordonnées du centre (m)	Demi-grand axe (m)	Demi-petit axe (m)
Ellipse de confiance planimétrique (68%)	(0,009 ; -0,001)	0,036	0,035

Tableau 8 : Ellipse de confiance planimétrique (68%), test 1.

En ce qui concerne la planimétrie on remarque que l'ellipse de confiance obtenue est compatible avec la précision inférieure à 5 cm de la méthode de levé GNSS RTK comme il est possible de voir sur le schéma suivant :

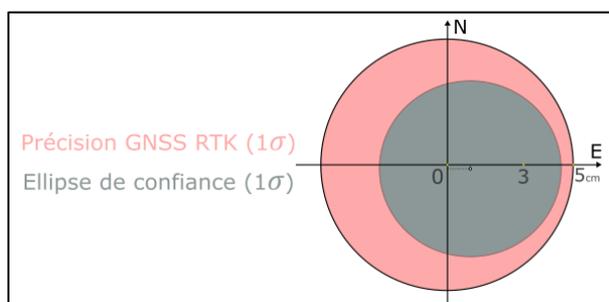


Figure 4 : Superposition des ellipses de confiance planimétriques (68%) de l'orthophotographie et du GNSS RTK.

Il apparait donc clairement qu'il est possible de réaliser une délimitation planimétrique à partir de l'orthophotographie sans pour autant avoir une moins bonne précision que l'acquisition GNSS en mode RTK. On peut maintenant observer l'intervalle de confiance sur la composante altimétrique :

Intervalle de confiance altimétrique (68%)	$[-0,056 ; -0,022]$ (cm)
--	--------------------------

Tableau 9 : Intervalle de confiance altimétrique (68%), test 1.

On constate que pour la composante altimétrique, l'intervalle de confiance est un peu trop grand par rapport à la précision du GNSS en mode RTK ; en effet, la borne minimale de l'intervalle de confiance dépasse celle du levé GNSS de -1 cm. Néanmoins, ce défaut sur la composante altimétrique peut être causé par plusieurs éléments. Premièrement un biais a été constaté sur la composante altimétrique. Donc, soit il y a eu une erreur lors du levé GNSS des cibles (une erreur sur la hauteur de canne par exemple), soit il y a eu un défaut dans la configuration du vol (un défaut de recouvrement par exemple), soit il y a eu un problème lors du calcul photogrammétrique (une mauvaise pondération du calcul par exemple). Ensuite, nous avons constaté que la restitution photogrammétrique est de moins bonne qualité sur la composante altimétrique. Le second essai a pour objectif de vérifier ces hypothèses.

1.3.4.5.2. Second essai

Afin de valider ou d'écarter les hypothèses émises en conclusion du test précédent, une nouvelle procédure est mise en place. Dans le dernier protocole, la validation de la précision globale de l'orthophotographie, obtenue de façon empirique, est réalisée en comparant deux techniques de précision équivalente : d'une part le levé GNSS RTK (précision inférieure à 5 cm) et d'autre part l'orthophotographie (précision globale théorique de 5,7 cm). Ainsi, il est difficile de savoir quelle technique est la plus proche de la valeur vraie et de déterminer la source de l'erreur observée sur la composante altimétrique. Pour ce second protocole, la technique de référence à mettre en œuvre doit être nettement plus précise que le levé GNSS RTK et que l'orthophotographie utilisée. En effet, « tout contrôle implique l'emploi de mesures de contrôle fournissant a priori des résultats d'une précision au moins deux fois meilleure que celle des objets à tester »¹²⁴.

Pour le second test, les coordonnées levées sont issues d'un lever au tachéomètre soit d'une précision inférieure à 5 millimètres. L'ensemble des mesures a été effectué à partir de la même station, ce qui réduit le risque d'erreur. L'orthophotographie utilisée est produite par des données indépendantes, elle a une résolution spatiale de 1,1 cm et dispose d'une précision globale théorique de 1,6 cm. Les points sont matérialisés sur le terrain par des cibles afin de limiter les erreurs d'interprétation et pour identifier le même point pour les deux types de lever. Les surfaces où les points sont matérialisés sont de type marbre ou bois, donc lisses et homogènes. Enfin, les prises de vue sont toutes orientées perpendiculairement au terrain c'est-à-dire verticalement. L'illustration suivante permet de se rendre compte de la configuration du chantier en question :

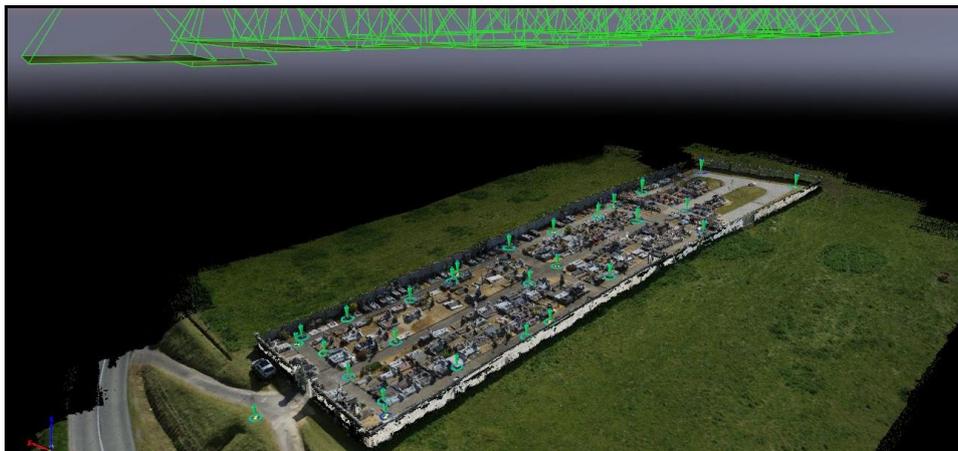


Figure 5 : Configuration du chantier du second test. Source : Pix4D.

Pour un ensemble de 20 points levés sur le terrain et après traitement photogrammétrique, on obtient les résultats suivants :

	Moyenne arithmétique	Écart-type (1 σ)
Écart en E	-0,0014 m	0,0043 m
Écart en N	0,0004 m	0,0055 m
Écart en H	0,0192 m	0,0122 m

Tableau 10 : Moyenne et écart-type des écarts sur chaque composante, test 2.

¹²⁴ Michel KASSER « Les nouveaux textes réglementaires français en matière de précision des levés » Revue XYZ n°96 3^{ème} trimestre 2003, page 31 à 42. Page 34.

La moyenne des écarts permet de faire ressortir un biais de près de 2 cm sur la composante en (H) car les écarts sont tous positif et du même ordre de grandeur. Pour les composantes en (E) et en (N) il n'y a pas de biais apparent puisque les moyennes sont proches de zéro.

On constate également une dispersion des écarts à la moyenne nettement supérieure sur la composante en (H) avec un écart-type de 1,2 cm contre 0,5 cm pour les composantes en (E) et en (N). Ceci met en exergue une moins bonne détermination de la composante altimétrique. Ces données permettent d'établir l'ellipse de confiance planimétrique :

	Coordonnées du centre (m)	Demi-grand axe (m)	Demi-petit axe (m)
Ellipse de confiance planimétrique (68%)	(-0,0014 ; 0,0004)	0,0085	0,0065

Tableau 11 : Ellipse de confiance planimétrique (68%), test 2.

En ce qui concerne la planimétrie on remarque que l'ellipse de confiance obtenue est du même ordre de grandeur que la précision globale théorique de 1,6 cm comme il est possible de le constater sur le schéma ci-dessous :

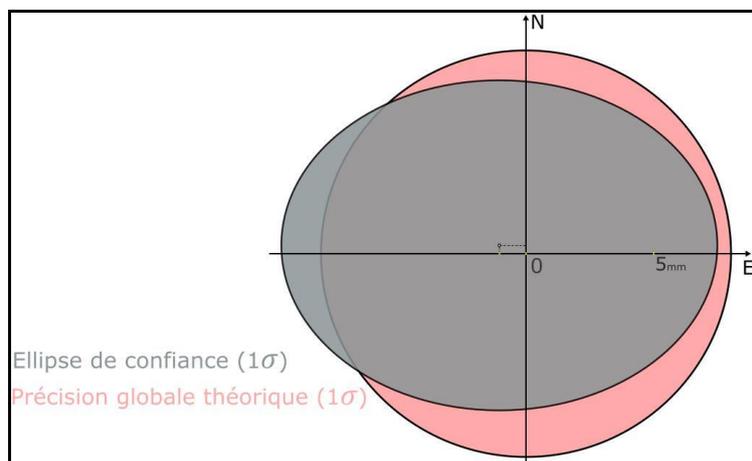


Figure 6 : Superposition des ellipses de confiance planimétriques théorique et empirique (68%).

Comme précédemment, **il est possible de réaliser une délimitation planimétrique à partir de l'orthophotographie d'une précision proche de la précision globale 3D théorique.** On peut maintenant observer l'intervalle de confiance sur la composante altimétrique :

Intervalle de confiance altimétrique (68%)	[0,014 ; 0,024] (cm)
--	----------------------

Tableau 12 : Intervalle de confiance altimétrique (68%), test 2.

Comme pour le premier test, les écarts altimétriques représentent la principale source d'erreur dans le calcul de la précision global 3D théorique et empirique. Il semble que cette **difficulté au niveau de la restitution altimétrique** provienne du principe même de la photogrammétrie, soit au niveau de la configuration des vols soit lors du calcul photogrammétrique.

1.3.4.5.3. Conclusion sur la faisabilité d'une délimitation via l'orthophotographie

La délimitation 3D à partir de l'orthophotographie semble une fois de plus réalisable. Avant d'effectuer une délimitation virtuelle par ce procédé, il est préalablement nécessaire de connaître la précision de la délimitation que l'on veut effectuer et ses caractéristiques. En effet, la précision globale 3D théorique mise en place précédemment permet de produire une orthophotographie pouvant permettre de réaliser des délimitations dans les trois dimensions. Néanmoins, l'orthophotographie ne semble pas l'outil le plus approprié pour effectuer une délimitation en prenant en compte l'altimétrie puisqu'elle est en deux dimensions et demi. Pour réaliser une délimitation en 3D, il faudrait privilégier le nuage de points 3D. Pour réaliser une délimitation planimétrique, l'orthophotographie est l'outil idéal.

L'ensemble des exemples présentés permet de souligner que le résultat d'un traitement photogrammétrique ne dépend pas uniquement de la taille du pixel au sol. Même si cette donnée intervient dans le calcul, elle est loin d'être la seule. Pour réaliser une délimitation virtuelle il semble alors important de maîtriser le produit support et donc sa chaîne de production.

L'état actuel de cette première partie fait ressortir une faible utilisation de l'image, que ce soit en tant que mode de preuve que comme outil servant de base à la réalisation de délimitation. Pourtant l'image cumule de nombreux atouts, par exemple elles permettent de figer et de rendre compte d'une situation à un instant donné. Cette faible utilisation de l'image est due notamment à sa force probante limitée, mais aussi à un manque d'habitude de son utilisation et plus particulièrement en droit. Ce constat amène à se questionner sur les possibles conséquences d'une éventuelle évolution de la valeur probante de l'image. Qu'elle serait la place de l'image dans les délimitations de demain si son statut juridique venait à évoluer (2.) ? Quelles seraient les conséquences d'une telle révolution ?

2. La place de l'image dans les délimitations de demain

La première partie du mémoire a permis de situer la place de l'image dans les délimitations d'aujourd'hui. Cette deuxième partie a pour ambition d'envisager les conditions et les éventuelles conséquences de l'augmentation de la force probante de l'image. Afin d'imaginer la place de l'image dans les délimitations de demain, plusieurs révolutions sont envisagées. Globalement elles imaginent l'évolution du statut de l'image dans la hiérarchie des modes de preuve, cette évolution vers le sommet de la hiérarchie se ferait de façon progressive pour au final parvenir au niveau des modes de preuve parfaits.

La hiérarchie des modes de preuve est différente selon le système de preuve auquel on est soumis. En droit français il existe deux systèmes de preuve : morale et légale¹²⁵.

Dans le **système de la preuve morale**, la preuve peut être rapportée par tout moyen, elle est libre. Ici, les modes de preuves sont dits imparfaits. Ceci signifie d'une part que tous les modes de preuves sont admissibles et d'autre part que le juge dispose d'une totale liberté sur l'analyse de la force probante de chaque moyen de preuve. Ce système s'applique de façon générale en matière pénale, commerciale et administrative. En matière civile, le système de la preuve libre s'applique pour les faits juridiques et pour les actes juridiques dont le montant est inférieur à 1500 €. Il est important de rappeler que le **fait juridique** est un événement volontaire ou involontaire entraînant des conséquences juridiques non voulues tandis que l'**acte juridique** est un acte volontaire entraînant des conséquences juridiques spécialement recherchées¹²⁶. Les modes de preuve imparfaits les plus fréquents sont le commencement de preuve par écrit, les présomptions, l'aveu extrajudiciaire, le serment supplétoire et les témoignages¹²⁷.

En revanche, dans le **système de la preuve légale**, les modes de preuves sont imposés par la loi. Ce sont des modes de preuve dits parfaits. Ces derniers lient les parties ainsi que le juge. Ce système s'applique de façon générale en matière civile pour les actes juridiques dont le montant est supérieur à 1500 €. Deux catégories de mode de preuve parfait existent : les preuves parfaites écrites comprenant l'acte authentique et l'acte sous seing privé, et les preuves parfaites non écrites comprenant l'aveu judiciaire et le serment décisoire.

Afin d'imaginer une évolution du statut de l'image dans la hiérarchie des modes de preuve, plusieurs aspects sont abordés. Préalablement, il est indispensable de situer la place actuellement occupée par l'image dans la hiérarchie des modes de preuve, c'est le statut actuel de l'image (2.1.). En effet, cette étape est le point de départ des hypothétiques évolutions du statut de l'image dans cette hiérarchie. Ensuite, il semble important de s'interroger sur l'éventuelle augmentation de la valeur probante de l'image. Qu'elles seraient les conditions nécessaires à cette augmentation ? (2.2.). L'image pourrait-elle être envisagée comme un mode de preuve parfait ? (2.3.). Qu'elles seraient les potentiels impacts sur la procédure du bornage si une telle révolution est envisagée (2.4.) ? Enfin, après avoir répondu à ces interrogations, un dernier point imagine une nouvelle mission pour le géomètre-expert : l'authentification des images de télédétection (2.5.).

¹²⁵ Dominique MONGENOT, « *Droit des obligations – La preuve* », édition LARCIER, 2002, 383 pages, page 65.

¹²⁶ Nathalie DELEUZE Aude BERTRAND-MIRKOVIC, « *Introduction générale au droit* », STUDYRAMA, 218 pages, page 153.

¹²⁷ Sylvian DOROL. « Fasc. 20 : PREUVE. Modes de preuve » JurisClasseur Encyclopédie des Huissiers de Justice. 2015.

2.1. Statut actuel de l'image comme moyen de preuve

Comme vu précédemment¹²⁸, l'image peut être abordée selon deux façons. Soit comme une information visuelle permettant de rendre compte d'une situation, soit comme une donnée de base permettant de réaliser un traitement photogrammétrique par exemple. Dans le premier cas, l'image permet de faciliter la **compréhension et l'analyse d'une situation** mais elle ne revêt que de manière ponctuelle une force probante suffisante. En effet, l'image peut être remise en question, notamment en ce qui concerne son authenticité. De plus, elle s'oppose régulièrement à des modes de preuve de force probante supérieure. Le plus souvent, la force probante de l'image existe quand cette dernière constitue l'unique élément de preuve. Par exemple lorsque l'image est le seul élément existant pour rapporter la preuve d'un fait ou d'un acte juridique. Dans le second cas, **l'image permet de créer une nouvelle donnée par un processus mathématique**. Le résultat est donc issu d'une transformation, son utilisation comme mode de preuve est exceptionnelle. L'exemple de la catastrophe technologique AZF cité précédemment constitue un cas où l'image permet, grâce à la photogrammétrie, de créer un MNT servant de moyen de preuve de la topographie du cratère de l'explosion¹²⁹. Dans cet exemple la photogrammétrie représente l'unique moyen de reconstituer la scène, l'image est donc le seul élément existant pour rapporter la preuve de ce fait. En conclusion, l'utilisation de l'image comme mode de preuve est peu courante, notamment à cause d'une faible force probante.

La place de l'image n'apparaît pas spontanément dans la hiérarchie des modes de preuve. Néanmoins, l'état du droit réalisé en amont permet de constater sa **valeur déclarative** : elle ne lie jamais le juge. L'une des caractéristiques principales des preuves parfaites est de lier le juge. L'image ne fait pas partie de la catégorie des preuves parfaites, cependant elle est acceptée par les juges à condition d'être obtenue par des moyens loyaux en conformité avec les droits fondamentaux comme le respect de la vie privée¹³⁰.

Toujours en ce qui concerne la hiérarchie des modes de preuve, il faut souligner qu'elle n'est pas figée. En effet, l'évolution de la technologie entraîne des changements au niveau des modes de preuve admis par les juges. Par exemple, il est possible de souligner la loi du 13 mars 2000¹³¹ qui rend équivalent l'écrit électronique à l'écrit traditionnel sur papier¹³². Il est également intéressant de citer le cas des empreintes génétiques pouvant être admises comme mode de preuve parfait en matière pénale¹³³. Il semble alors légitime de s'interroger sur le statut de l'image. Est-elle une preuve écrite ou non ?

L'écrit est défini juridiquement comme « une suite de lettres, de caractères, de chiffres ou de tous autres signes ou symboles dotés d'une signification intelligible, quels que soient leur support et leurs modalités de transmission »¹³⁴. Il est possible de constater que l'image analogique est liée à un support matériel et que l'image numérique peut se décrire par un ensemble fini de valeurs entières¹³⁵. Donc, il semble que l'image numérique s'approche davantage de la définition juridique de l'écrit puisque l'image analogique est généralement créée chimiquement sur un support unique. Ainsi, ce type d'image ne se compose ni de « signes » ni de « symboles » contrairement à l'image numérique. Cependant, dans la définition juridique, il est fait référence à « une signification intelligible » c'est-à-dire que l'on peut

¹²⁸ Voir le paragraphe : « 1.1. État du droit de l'image comme mode de preuve » Page 9.

¹²⁹ Michel KASSER, Jean Baptiste MONNERIE, Laurent DELGADO, Daniel ROBERT. Dossier XYZ n°122 : « La photogrammétrie au service de la justice : mesures géométriques du cratère de l'explosion AZF », mars 2010, page 31-38.

¹³⁰ Article 9 du code civil : « Chacun a droit au respect de sa vie privée. Les juges peuvent, (...), prescrire toutes mesures, telles que séquestre, saisie et autres, propres à empêcher ou faire cesser une atteinte à l'intimité de la vie privée (...) ».

¹³¹ Loi n°2000-230 du 13 mars 2000 - art. 1 JORF 14 mars 2000. Portant sur la définition de l'écrit.

¹³² Article 1316-3 du code civil : « L'écrit sur support électronique a la même force probante que l'écrit sur support papier. ».

¹³³ Cours disponible sur le site internet : www.cours-de-droit.net/les-moyens-de-preuve-serment-aveu-ecrit-temoignage-a121608830. Voir principalement le paragraphe « LES MOYENS DE PREUVE MODERNES ».

¹³⁴ Article 1316 du code civil. Version en vigueur avec terme du 14 Mars 2000 au 1^{er} Octobre 2016.

¹³⁵ Cours sur les images de l'université de Rennes disponible sur le site internet : http://www.sites.univ-rennes2.fr/arts-spectacle/cian/image_numFlash/pdf/chap3_cours31.pdf, par université de Rennes 2.

comprendre sans difficulté¹³⁶. Or, le code des images numérique n'est absolument pas facile de compréhension¹³⁷, il est toujours nécessaire de le traduire grâce à des logiciels de traitement pour obtenir une représentation compréhensible. Donc **l'image ne constitue pas un écrit au sens juridique** et a fortiori elle ne constitue pas une preuve parfaite écrite. Si l'image n'a aucune correspondance dans les divers modes de preuve parfaits, il est possible d'en trouver une dans les modes de preuve dits imparfaits.

Il existe deux modes de preuve imparfaits qui pourrait correspondre à l'image : le commencement de preuve par écrit et la présomption. Le premier se définit comme « tout acte par écrit qui est émané de celui contre lequel la demande est formée, ou de celui qu'il représente, et qui rend vraisemblable le fait allégué »¹³⁸. D'après cette définition, **l'image ne peut pas être un commencement de preuve par écrit** puisqu'elle n'est pas un écrit. Le second mode de preuve imparfait est la présomption, qui se définit comme les « conséquences que la loi ou le magistrat tire d'un fait connu à un fait inconnu »¹³⁹. Dans la catégorie des présomptions, il faut distinguer les présomptions légales, qui résultent donc de la loi, et les présomptions du fait de l'homme, retenues par le juge lors d'un litige et régies par l'article 1353¹⁴⁰ du code civil. Une seconde distinction concerne les présomptions, qui peuvent être simples c'est-à-dire qu'il est possible d'apporter la preuve contraire, ou irréfragables quand il est impossible d'apporter la preuve contraire. Donc **l'image constitue une présomption simple du fait de l'homme** puisqu'elle peut permettre d'établir un fait en démontrant la réalité d'un fait voisin en fixant une scène, un fait ou un acte juridique.

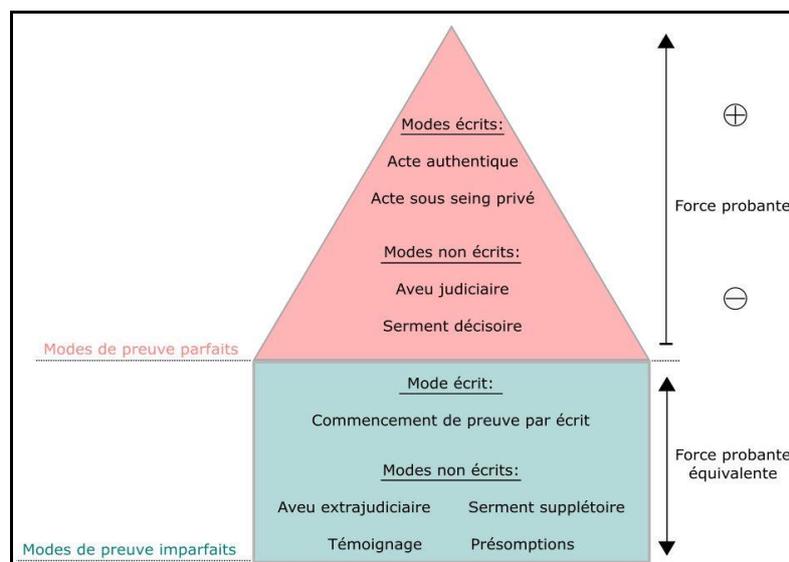


Figure 7 : Hiérarchie des modes de preuve¹⁴¹

De nos jours, l'image se situe au niveau des modes de preuve imparfaits et plus précisément comme une présomption simple du fait de l'homme. Sa force probante est soumise à l'appréciation souveraine des juges. En effet, l'image est facilement modifiable, son authenticité est difficile à établir, sa source n'est pas toujours objective, sa qualité radiométrique ou géométrique n'est pas systématiquement suffisante. Néanmoins, certains cadres règlementaires, comme dans le cas de la vidéosurveillance, permettent d'atténuer une partie des défauts évoqués. Pour imaginer une augmentation de sa force

¹³⁶ Définition tirée du Centre National de Ressource Textuelles et Lexicales, sur le site internet : www.cnrtl.fr/lexicographie/intelligible

¹³⁷ Le code l'image numérique est sous forme binaire, c'est-à-dire qu'il se compose d'une suite de 1 et de 0. Voir le cours sur le site internet : http://www.sites.univ-rennes2.fr/arts-spectacle/cian/image_numFlash/pdf/chap3_cours32.pdf, par université de Rennes 2.

¹³⁸ Article 1347 du code civil

¹³⁹ Article 1349 du code civil

¹⁴⁰ Article 1353 du code civil : « Les présomptions qui ne sont point établies par la loi, sont abandonnées aux lumières et à la prudence du magistrat, qui ne doit admettre que des présomptions graves, précises et concordantes, et dans les cas seulement où la loi admet les preuves testimoniales, à moins que l'acte ne soit attaqué pour cause de fraude ou de dol. ».

¹⁴¹ Réalisation personnelle.

probante ou une évolution vers un mode de preuve supérieur, l'image devrait donc remplir des conditions particulières.

2.2. Suppositions permettant l'évolution de la valeur probante de l'image

Afin d'imaginer l'évolution du statut de l'image dans la hiérarchie des modes de preuve, il semble nécessaire de remplir des conditions particulières. Ces dernières ont pour objectif d'atténuer les défauts mis en relief dans la partie précédente. Deux catégories sont envisagées : la première concerne les conditions techniques (2.2.1.) et la seconde se concentre sur les conditions juridiques (2.2.2.). Néanmoins, il est important de souligner que les conditions techniques et juridiques ne forment pas deux groupes indépendants. En effet, les exigences juridiques sont parfois directement liées aux caractéristiques techniques de l'image.

2.2.1. Conditions techniques permettant l'évolution de la force probante de l'image

La force probante d'une image peut être influencée par ses caractéristiques techniques. Par exemple, le cadre de la vidéosurveillance précédemment évoqué¹⁴², souligne cette idée. En effet, si la résolution de l'image est inférieure à celle préconisée dans la circulaire de 2009¹⁴³, elle ne permet pas de remplir la fonction pour laquelle le système de vidéosurveillance est mis en place : l'identification d'un individu entre autres. De ce fait, plusieurs aspects techniques doivent être abordés afin d'accroître la force probante de l'image et d'envisager son évolution dans la hiérarchie des modes de preuve.

Les caractéristiques géométriques de l'image doivent être suffisantes en fonction de son objet et de sa finalité. Par exemple, dans le cas de la télédétection vu précédemment¹⁴⁴, pour identifier un objet, la taille du pixel au sol doit être vingt et une fois inférieure à ce dernier. Dans le cadre de la vidéosurveillance, la circulaire de 2009 impose une résolution de 4CIF soit 704 x 576 pixels¹⁴⁵. Selon l'image, il faut donc **adapter la résolution de l'image en fonction de sa finalité**. Il est intéressant de noter que l'image dans le cas de la vidéosurveillance sert de support visuel, qui fixe et enregistre une scène, tandis que dans le cas de la télédétection l'image peut servir en plus de base pour réaliser des calculs. Par exemple, pour la création d'un nuage de points 3D en photogrammétrie ou encore pour le calcul d'indices comme l'indice de végétation¹⁴⁶. Lorsque l'on considère l'image comme la base d'un calcul, elle doit également être d'une résolution spatiale suffisante afin de permettre le bon déroulement de ce dernier. Aussi, il semble essentiel de pouvoir quantifier et contrôler cette qualité géométrique lorsque cela est possible. De manière générale, l'image devra permettre d'atteindre l'objectif pour lequel elle est conçue sans qu'il soit possible de la remettre en question en se basant sur un défaut sur ses caractéristiques géométriques.

Les caractéristiques radiométriques de l'image doivent également être en accord avec sa finalité. En effet, cette donnée technique peut permettre d'accroître la valeur probante de l'image. Pour reprendre l'exemple utilisé précédemment¹⁴⁷, le code d'apparence sur la composition d'un rejet en hydrocarbure de l'accord de Bonn s'appuie notamment sur la couleur de la nappe pour déterminer sa composition. Ainsi, une image en couleur est nécessaire afin de constituer un élément de preuve. Donc si l'usage de la couleur

¹⁴² Voir paragraphe 1.1.1. Page 9

¹⁴³ Formulaire Cerfa n°13806*03 disponible sur le site internet : www.interieur.gouv.fr/content/download/6586/62588/file/INTD0900057C.pdf

¹⁴⁴ Voir paragraphe 1.3.1.1. Page 9

¹⁴⁵ Ceci correspond à moins de 0,5 mégapixel, ce qui est faible. En comparaison presque tous les appareils photos des téléphones portables actuels ont des capteurs de plus de 1 mégapixel. Certain téléphone dépasse même les 40 mégapixels.

¹⁴⁶ De nombreux exemples expliqués sont disponible sur le site internet : <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/vegetation/indices/qques-indices/indices-simples.html>

¹⁴⁷ Voir paragraphe 1.1.2. Page 12.

permet de s'approcher davantage de la finalité de l'image, il permet aussi d'augmenter sa valeur probante sans pour autant modifier la position actuelle de l'image dans la hiérarchie des modes de preuve. Il apparaît donc important **d'adapter les caractéristiques radiométriques de l'image afin d'accroître sa valeur probante.**

L'authenticité d'un objet se définit comme la certitude de l'origine qui lui est attribuée, concernant l'auteur, le lieu, l'époque, la conformité avec la réalité¹⁴⁸. Une fois de plus, l'exemple de la vidéosurveillance permet de mettre en avant un cadre réglementaire existant et permettant entre autres de vérifier l'authenticité des images. En effet, le formulaire de demande d'autorisation d'un système de vidéosurveillance¹⁴⁹ se compose de plusieurs rubriques correspondant aux éléments de la définition de l'authenticité : « identité du déclarant » correspondant à l'auteur, « localisation du système de vidéosurveillance » permettant de déterminer le lieu, et « caractéristiques du système » permettant de déterminer l'époque et d'en déduire la conformité avec la réalité. Cependant, dans ce cas particulier, le formulaire permet une authentification sommaire et peu précise du système de vidéosurveillance. Pour authentifier précisément et donc pour accroître la valeur probante des images, il est possible de recourir à d'autres techniques. Par exemple, en ce qui concerne l'auteur de l'image il devrait fournir un certificat d'identité¹⁵⁰ en plus des informations de base. Pour la géolocalisation de l'image, englobant le lieu et l'époque, il serait possible d'utiliser une méthode GNSS précise. Enfin, pour la conformité à la réalité il suffirait de connaître précisément les caractéristiques des caméras afin de corriger les déformations dues à la prise de vue. Il serait également possible d'exiger de l'auteur des images un certain niveau de compétence qui lui permettrait d'estimer cette conformité. Néanmoins, si toutes ces données sont réunies, elles ne sont pas pour autant certaines car elles peuvent être exposées à des modifications. Pour cette raison, l'image doit répondre à des **critères de sécurité et de confidentialité**. La circulaire de 2009 sur la vidéosurveillance prévoit également deux rubriques en rapport avec cette problématique : « personnes habilitées à accéder aux images » permettant de contrôler l'accès aux données, et « sécurité et confidentialité » visant la mise en place des moyens permettant de certifier les données. Pour permettre une authentification optimale, il semblerait indispensable de mettre en place un système de sécurité et de confidentialité performant et permettant un accès restreint aux données. Il serait donc possible d'envisager la création d'un organisme voué à cette tâche de sécurisation et d'authentification des données.

Ainsi, il est possible d'accroître la valeur probante des images grâce à des considérations techniques. Néanmoins, l'aspect juridique est crucial pour l'admissibilité de la preuve par l'image. Donc pour envisager une augmentation de la valeur probante des images il faut également s'attarder sur des conditions juridiques.

2.2.2. Conditions juridiques permettant l'évolution de la force probante de l'image

Il est important de rappeler qu'en droit français il existe deux conceptions sur les modes de preuve : la liberté de la preuve avec le système de preuve morale et la limitation de la preuve avec le système de preuve légale. Dans le système de preuve morale, les moyens de preuve sont libres et le juge dispose d'une totale liberté pour former sa conviction. Inversement, dans le système de la preuve légale, le législateur fixe les moyens de preuve et le juge est totalement lié par ces derniers. En règle générale, pour que l'image soit admissible comme mode de preuve dans le système de la preuve libre, elle doit avant tout avoir été **obtenue par des moyens loyaux**¹⁵¹, c'est-à-dire sans ruser pour arriver à ses fins, et de manière

¹⁴⁸ Définition complète de l'authenticité disponible sur le site internet : www.cnrtl.fr/lexicographie/Authenticité.

¹⁴⁹ Disponible sur directement sur le site internet : https://www.formulaires.modernisation.gouv.fr/gf/cerfa_13806.do

¹⁵⁰ Par exemple, un passeport valide. Son obtention nécessite de nombreuses pièces comme l'acte de naissance, le justificatif de nationalité, le justificatif de domicile, la rédaction d'un formulaire CERFA, ..., www.service-public.fr.

¹⁵¹ Sylvian DOROL. JurisClasseur fascicule 10 : « Preuves Règles générales ». Paragraphe 18 Page 12.

licite, autrement dit en restant conforme à la loi et à la morale. Ces conditions sont édictées afin de garantir le principe de la liberté de la preuve et d'un procès équitable. Dans le système de la preuve légale, l'image n'est pas admissible puisqu'elle ne fait pas partie des modes de preuve parfaits énoncés par la loi¹⁵².

La **neutralité de la source** d'où provient l'image influe sur la valeur probante de cette dernière. Afin d'augmenter la force probante de l'image, il semble alors essentiel de pouvoir établir cette neutralité par rapport à l'objet de l'image. Il faut également rappeler que dans le système de la preuve légale, le principe selon lequel nul ne peut se constituer de preuve à soi-même s'applique. Ce principe signifie qu'il est impossible pour un plaideur de se constituer ses propres pièces pour apporter la preuve d'un fait juridique dans le système de la preuve légale¹⁵³. Cependant dans le système de la preuve morale, ce principe ne s'applique pas puisque le juge est libre d'apprécier la valeur probante des éléments rapportés. Pour assurer la neutralité de la source il peut être adéquat de la choisir **externe aux parties impliquées**. En effet, choisir une source externe aux parties permet d'une part, de ne pas se constituer de preuve à soi-même, et d'autre part d'éviter les conflits d'intérêts puisque la source serait externe aux parties et donc elle aurait un point de vu neutre. Enfin, il faut souligner que l'éventuelle augmentation de la valeur probante de l'image ne signifierait pas son évolution dans la hiérarchie des modes de preuve. **L'image resterait au niveau des présomptions**.

Concernant les règles relatives à la preuve, il est important de souligner qu'**elles ne sont pas d'ordre public**, c'est-à-dire qu'il est possible d'y déroger¹⁵⁴. Il est donc possible pour les parties d'aménager des règles relatives aux modes de preuve dans une convention expresse. En conséquence, augmenter la force probante de l'image jusqu'au sommet de la hiérarchie des modes de preuve est réalisable, moyennant une convention expresse entre les parties. Néanmoins, deux limites ne doivent pas être franchies. La première a pour objectif de faire respecter le principe du contradictoire. Donc l'objet de la convention ne peut pas avoir pour objectif de soustraire une preuve au débat contradictoire. La seconde interdit de prévoir la délégation des pouvoirs du juge à un mandataire¹⁵⁵, c'est-à-dire qu'il est impossible d'attribuer le rôle et les pouvoirs du juge à un tiers. Ainsi, selon la loi¹⁵⁶ et moyennant une convention relative aux modes de preuve entre les parties, l'image peut se voir attribuer une force probante équivalente aux modes de preuve du sommet de la hiérarchie précédemment détaillée.

Les hypothèses permettant l'augmentation de la valeur probante de l'image sont nombreuses. Cependant, les conditions vues précédemment n'ont aucune influence sur la place de l'image dans la hiérarchie des modes de preuve. En effet, l'image reste au niveau des présomptions. La partie suivante permet d'imaginer une éventuelle évolution de l'image jusqu'au sommet de cette hiérarchie et de mettre en avant les principaux freins qu'il serait possible de rencontrer.

2.3. L'image comme mode de preuve parfait ?

Précédemment, il a été possible d'émettre l'éventualité d'augmenter la force probante de l'image jusqu'au niveau des modes de preuve parfaits. Cependant, cette convention relative aux modes de preuve ne s'applique qu'entre les parties concernées. Ce paragraphe a pour objectif de mettre en exergue les évolutions supplémentaires qui seraient nécessaires pour éventuellement intégrer l'image aux modes de preuve parfaits dans le cas général, c'est-à-dire sans convention particulière relative aux modes de preuve.

¹⁵² Dominique MONGENOT, « *Droit des obligations – La preuve* », édition LARCIER, 2002, 383 pages, page 66.

¹⁵³ Corinne RENAULT-BRAHINSKY, « *Le nouveau droit des contrats* », GUALINO, 2016, 79 pages. Pages 76 et 77.

¹⁵⁴ Sylvian DOROL. JurisClasseur fasc 10 : « Preuves Règles générales ». Paragraphe 50 Page 11 : « Absence de caractère d'ordre public des règles de preuve »

¹⁵⁵ Sylvian DOROL. JurisClasseur fascicule 10 : « Preuves Règles générales ». Paragraphe 54 Page 11.

¹⁵⁶ Article 1316-2 du Code civil : « Lorsque la loi n'a pas fixé d'autres principes, et à défaut de convention valable entre les parties, le juge règle les conflits de preuve littérale en déterminant par tous moyens le titre le plus vraisemblable, quel qu'en soit le support. »

Pour rappel, dans le système de la preuve légale, la loi impose les modes de preuve admissibles et indique leur force probante. Ce système s'applique en matière civile pour les actes juridiques dont le montant est supérieur à 1500 €. On retrouve les preuves parfaites écrites : principalement, l'acte authentique¹⁵⁷ et l'acte sous seing privé¹⁵⁸ et les preuves parfaites non écrites avec l'aveu judiciaire¹⁵⁹ et le serment décisoire¹⁶⁰. L'image ne peut pas correspondre aux preuves parfaites non écrites car ces dernières sont principalement de forme orale. Il semble alors cohérent de se tourner principalement vers les preuves parfaites écrites comme l'acte sous seing privé et l'acte authentique. Aussi, recourir à l'écrit répond au **principe de la preuve préconstituée** qui revêt plusieurs avantages. Ce principe permet **d'anticiper toute contestation**, ce qui renforce la valeur probante de l'acte¹⁶¹. L'écrit permet une **vision plus objective** que celle issue des preuves parfaites non écrites. Enfin, l'écrit **conserve sa valeur probatoire** aussi longtemps que son support matériel demeure alors que les aveux et serments dépendent de la mémoire des individus qui avec le temps, s'estompe.

Précédemment, il a été établi que l'image n'est pas un écrit au sens juridique (paragraphe 2.1. de ce mémoire). Néanmoins, il est possible de remarquer que si l'image correspondait à la définition de l'écrit, sa force probante serait supérieure à celle qu'elle revêt actuellement. En effet, l'image a une force probante moindre en raison d'un manque d'objectivité de sa source par exemple. Or, l'écrit au sens juridique se caractérise par une objectivité accrue. Ainsi, **la force probante de l'image serait supérieure si elle était considérée comme un écrit**. Afin d'imaginer une évolution progressive de l'image vers le sommet de la hiérarchie des modes de preuve, l'image serait d'abord placée au niveau de l'acte sous seing-privé (2.1.3.1.) pour ensuite atteindre le sommet de la hiérarchie des modes de preuve au niveau de l'acte authentique (2.1.3.2.).

2.3.1. Hypothèse de l'image comme acte sous seing privé

L'acte sous seing privé est un écrit, rédigé par les parties, constatant un acte ou un fait juridique. Généralement, il n'est soumis à aucune condition de forme autre que la signature par toutes les parties. Dans le cas d'un acte synallagmatique, l'article 1325 du Code civil impose un nombre d'originaux égal au nombre de parties. Pour contester un tel acte il n'est pas nécessaire d'engager une procédure d'inscription de faux, il suffit d'apporter la preuve contraire par écrit¹⁶². La force probante de l'acte sous seing privé est identique à celle de l'acte authentique s'il respecte plusieurs conditions. Son existence doit être reconnue par la partie opposante ; si cette dernière nie avoir conclu un tel acte alors sa force probante est réduite. Pour être opposable aux tiers il doit recevoir une date certaine, il ne fait pas foi lui-même et donc ni son origine ni sa date sont garanties par sa simple existence. En effet, la date inscrite sur l'acte sous seing privé fait foi uniquement entre les parties concernées. Cependant, il est possible de lui attribuer une date certaine en respectant diverses règles¹⁶³. Par exemple, lorsque l'acte sous seing privé est enregistré par un officier public compétent. La définition de l'acte sous seing privé implique un écrit, le constat d'un acte ou d'un fait juridique, d'être signé des parties, et d'avoir autant d'originaux que de parties.

¹⁵⁷ « L'acte authentique est celui qui a été reçu par officiers publics ayant le droit d'instrumenter dans le lieu où l'acte a été rédigé, et avec les solennités requises. Il peut être dressé sur support électronique s'il est établi et conservé dans des conditions fixées par décret en Conseil d'Etat. » Article 1317 du code civil.

¹⁵⁸ Article 1322 à 1332 du code civil.

¹⁵⁹ « L'aveu judiciaire est la déclaration que fait en justice la partie ou son fondé de pouvoir spécial. Il fait pleine foi contre celui qui l'a fait. Il ne peut être divisé contre lui. Il ne peut être révoqué, à moins qu'on ne prouve qu'il a été la suite d'une erreur de fait. Il ne pourrait être révoqué sous prétexte d'une erreur de droit. » Article 1356 du code civil.

¹⁶⁰ Le serment judiciaire est : « une déclaration solennelle, faite devant un juge, par une partie à un procès, d'un fait qui lui est favorable. » et le serment judiciaire décisoire est « celui qu'une partie défère à l'autre pour en faire dépendre le jugement de la cause ». Article 1357 alinéa 1 du code civil.

¹⁶¹ W. BELIME, « Cours d'introduction à la science du droit », A. DURAND et PEDONE-LAURIEL Libraires, 1869, 717 pages. Pages 636 à 639.

¹⁶² Article 1341 du code civil.

¹⁶³ Article 1328 du code civil.

Pour que l'image puisse être considérée comme un acte sous seing privé, **il faudrait revoir la définition juridique de l'écrit** qui aujourd'hui exclut l'image. L'unique point de la définition entraînant cette exclusion correspond au terme « intelligible ». En effet, les autres termes de la définition de l'écrit s'appliquent à l'image numérique. Elle se compose « d'une suite de chiffre », en l'occurrence une suite de 1 et de 0. De plus, la définition de l'écrit précise que le support et les modalités de transmission de l'écrit peuvent être de toute sorte. Le seul frein est le terme « intelligible » car il implique une compréhension aisée de l'écrit. Or, il est impossible de se représenter et de comprendre le contenu d'une image à la seule vue de son code binaire. La nouvelle définition permettant de faire évoluer le statut de l'image devrait inclure le traitement informatique qui conduit à rendre l'image intelligible. En effet, le format numérique de l'image sous forme binaire sert principalement au stockage de l'image, les applications directes sur ce code sont très rares. De plus, la représentation et l'utilisation de l'image dans notre société sont celle de l'image transformée et non sous forme binaire. De mon point de vue, il ne me semble pas aberrant d'étendre la définition de l'écrit aux images numériques. Cependant cette révolution entraînerait l'évolution du statut de nombreux autres produits, par exemple un texte codé, vers le statut juridique de l'écrit. Ceci n'étant pas souhaitable, il faudrait pouvoir uniquement ajouter l'exception des images numériques.

En ce qui concerne le **constat d'un fait ou d'un acte juridique**, l'image peut remplir cette condition depuis de nombreuses années comme il est possible de le constater précédemment. Pour l'acte sous seing privé synallagmatique, dans le cas de l'écrit sur papier, il suffirait d'utiliser une même image imprimée plusieurs fois suivant des procédés d'impression identiques. Dans le cas du numérique, il faudrait utiliser autant de fois que nécessaire le même fichier numérique de base ayant subi exactement les mêmes traitements.

Dans la hiérarchie des modes de preuve existant, l'image semble pouvoir accéder au statut d'acte sous seing privé moyennant quelques modifications au niveau de la législation, principalement sur la définition juridique de l'écrit. Il est possible **d'imaginer la nouvelle définition de l'écrit incluant l'image numérique** : « l'écrit est une suite de lettres, de caractères, de chiffres ou de tous autres signes ou symboles dotés d'une signification intelligible **ou rendue intelligible**, quels que soient leur support et leurs modalités de transmission ». La nouvelle définition devrait également édicter, de façon exhaustive, les moyens permettant de rendre intelligible la suite de lettres, caractères, signes et cetera. Par exemple, pour permettre à l'image numérique d'être considérée comme un écrit, la transformation permettant le passage du code binaire à l'image devrait être fixée par une nouvelle loi. Après avoir appliqué l'ensemble des hypothèses émises, il semble imaginable de considérer l'image comme acte sous seing privé. Le paragraphe suivant envisage les évolutions nécessaires pour qu'une image puisse éventuellement accéder au statut de la preuve parfaite écrite par excellence : l'acte authentique.

2.3.2. Hypothèse de l'image comme acte authentique

L'acte authentique est un écrit constatant un fait ou un acte juridique, rédigé par un officier public¹⁶⁴ ayant les compétences requises. Ce dernier doit être présent lors de la manifestation de la volonté ou de la constatation des faits¹⁶⁵ et sa signature doit être apposée sur l'acte. Le support de l'acte peut être papier ou électronique depuis le 13 mars 2000¹⁶⁶. L'officier public doit également respecter les solennités¹⁶⁷, c'est-à-dire des règles variables selon la nature de l'acte et de l'officier public. Ces dernières

¹⁶⁴ Article 1317 du code civil.

¹⁶⁵ Isabelle PETEL-TEYSSIE. « Contrats et obligations, preuves littérales, acte authentique ». JurisClasseur. Page 10 paragraphe 42.

¹⁶⁶ Loi n°2000-230 du 13 mars 2000 - art. 1 JORF 14 mars 2000. Portant sur la définition de l'écrit.

¹⁶⁷ Isabelle PETEL-TEYSSIE. « Contrats et obligations, preuves littérales, acte authentique ». JurisClasseur. Page 12 paragraphe 49.

peuvent concerner le contenu ou à la présentation de l'acte par exemple. Les parties doivent toutes être présentes et signer l'acte. L'officier public peut ainsi vérifier l'identité, la capacité et les pouvoirs des parties. Pour toutes ces raisons, l'acte authentique est nettement plus difficile à remettre en question que l'acte sous seing privé, son contenu et sa date sont indiscutables. Ainsi, pour contester un acte authentique, il faut suivre la lourde procédure en inscription de faux¹⁶⁸. En plus d'avoir une force probante importante, l'acte authentique a une **force exécutoire** contrairement à l'acte sous seing privé¹⁶⁹. Ceci signifie qu'il est possible de procéder à l'exécution forcée du droit reconnu par l'acte en utilisant au besoin la force publique. En conséquence, l'exécution du droit compris dans l'acte ne dépend pas d'une décision du juge. En plus des éléments nécessaires à l'acte sous seing privé, l'acte authentique doit être **rédigé comme il vient d'être signalé par un officier public compétent** en respectant les solennités. Ce dernier a le devoir **d'être présent** lors de la manifestation de la volonté ou de la constatation des faits, et il a l'obligation, ainsi que toutes les parties concernées, de signer l'acte.

Pour que l'image réponde aux exigences de l'acte authentique, elle doit préalablement remplir les conditions de l'acte sous seing privé, c'est-à-dire l'écrit, constater un fait ou un acte juridique et être signée par les parties. Si on considère que la rédaction de l'acte puisse être étendue à la réalisation du cliché, il faudrait que l'officier public soit compétent pour le faire. Il est intéressant de souligner que des procès-verbaux réalisés par des experts et des techniciens peuvent se voir attribuer valeur authentique, néanmoins cette réalité est souvent contestée¹⁷⁰. Il serait donc possible de choisir une catégorie particulière d'expert pour réaliser le cliché. Mais ceci réduirait significativement le nombre d'images utilisables puisque dans la majorité des cas elles sont réalisées par les parties ou par des tiers. Il faudrait également définir des solennités propres à ce type d'acte authentique sur support image. En effet, la forme de ce type d'acte serait très différente des actes authentiques existants. La plus grande difficulté liée à l'image réside dans l'obligation pour l'expert **d'être présent** lors de la manifestation de la volonté ou de la constatation des faits. Majoritairement, l'image capture des faits juridiques et ces derniers ne sont généralement pas prévus puisque, par définition, les conséquences juridiques liées ne sont pas voulues. Il semble alors complexe de prévoir l'intervention d'un officier public compétent pour constater un fait souvent imprévu en utilisant une photographie qui fixe une scène donnée à un instant donné. Donc même si cette hypothèse reste envisageable, elle réduit les applications de façon drastique.

En supposant des modifications importantes, l'image semble pouvoir atteindre le statut d'acte authentique que **dans des circonstances exceptionnelles**. La principale cause de ce constat est qu'elle ne correspond pas à la définition juridique de l'écrit et aussi **qu'elle devrait être réalisée par un officier public**. En effet, il semble particulièrement difficile de faire intervenir un officier public pour réaliser la photographie figeant un fait juridique. D'une part, le coût d'une opération de ce type serait nécessairement élevé puisque l'officier public doit se déplacer, ce qui n'inciterait pas les parties à utiliser cette technique. D'autre part, la probabilité de figer le fait ou l'acte juridique serait trop aléatoire. Il y aurait sans doute de nombreux échecs avant d'atteindre cet objectif et donc le coût de l'opération serait d'autant plus important. L'image comme acte authentique apparaît comme une évolution difficile à mettre en place. Néanmoins, il est possible d'envisager les conséquences de l'évolution hypothétique de l'image dans la hiérarchie des modes de preuve.

¹⁶⁸ « La fausseté d'un acte qualifié d'authentique étant concevable, une procédure spécifique a été mise en place qui constitue le mode normal de destruction de la foi due à l'acte authentique : l'inscription de faux. D'ordre public, elle en est le passage obligé : les plaideurs ne pourraient s'entendre pour l'écarter ». JurisClasseur « Contrats et obligations, preuves littérales, acte authentique ». Page 27 parag 116.

¹⁶⁹ Xavier LABBÉE, « Introduction générale au droit pour une approche éthique », SEPTENTRION, 2005, 194 pages, Page 121.

¹⁷⁰ Isabelle PETEL-TEYSSIE. « Contrats et obligations, preuves littérales, acte authentique ». JurisClasseur. Page 5 paragraphe 18.

2.3.3. Conséquences générales de l'éventuelle évolution du statut de l'image

Si l'image est intégrée aux modes de preuve parfaits cela se fera dans le respect de nombreuses conditions. En effet, **l'image prise sans préconisation particulière devra conserver le même statut que l'image actuelle**. Les conséquences générales d'une évolution du statut de l'image seraient multiples.

Dans la majorité des cas, les actes sont écrits sous forme authentique ou sous seing privé parce que la loi l'oblige. Par exemple, dans le cas d'une vente immobilière, l'acte authentique est nécessaire. Dans le cas d'un bail entre particuliers l'acte sous seing privé est un minimum. Si l'image est acceptée comme mode de preuve parfait, il y aurait sans doute une **augmentation considérable du nombre d'écrits parfaits**. En effet, les procédés d'acquisition de l'image comme la photographie sont très répandus et utilisés au quotidien. Ceci permettrait une **approche plus ludique et plus systématique** de la preuve parfaite par écrit. Néanmoins, il faut rappeler que l'image devra impérativement respecter un ensemble de conditions. Seul le support devra être plus ludique. Ainsi, ces conditions constitueraient le cadre nécessaire à l'utilisation de l'image comme écrit parfait.

Aussi, il existe des cas où exiger un écrit est mal perçu et devient impossible. En effet, l'article 1348 du Code civil reconnaît plusieurs cas où il est impossible, matériellement ou moralement, de produire un écrit. La jurisprudence admet l'impossibilité morale lorsqu'il y a une relation de famille, d'amitié, ou encore un lien de subordination par exemple. Une fois de plus, l'utilisation de l'image pourrait permettre **d'atténuer l'aspect officiel de l'acte écrit** grâce à son support. Effectivement, la forme de ces actes est très stricte, à ceci s'additionne l'utilisation d'un vocabulaire juridique complexe et spécialisé. Ainsi, l'image permettrait d'atténuer la mise en forme stricte que revêt l'acte authentique et sous seing privé.

Si les scénarii imaginés se réalisent dans le futur, cela se fera certainement de façon progressive. L'augmentation de la force probante de l'image devrait être **croissante et étalée dans le temps**. En effet, un changement aussi important ne peut pas s'opérer de façon immédiate. L'ensemble de la législation devra s'adapter en fonction des éventuels problèmes rencontrés. Parallèlement, cette évolution pourrait être appliquée à certains domaines d'activités particuliers. Une **application ciblée et progressive** permettrait d'analyser les conséquences d'une telle évolution et d'ajuster la législation en fonction des résultats obtenus. Ainsi, la croissance de la force probante de l'image et l'augmentation des domaines d'activités concernés pourraient permettre d'aboutir à une éventuelle généralisation de l'évolution du statut de l'image.

Pour se rendre compte de la complexité d'une opération de cette envergure il est possible d'imaginer les impacts qu'elle aurait sur la procédure de bornage amiable.

2.4. Impacts probables sur la procédure de bornage amiable

Le bornage est « l'opération par laquelle est recherchée, déterminée et fixée par des marques extérieures apparentes appelées bornes, la ligne séparative, le plus souvent incertaine, entre deux fonds contigus, non déjà bornés et faisant l'objet d'un droit de propriété privée. »¹⁷¹. Ici, l'objectif est de mettre en relief les impacts qui seraient possible de constater sur la procédure amiable du bornage si la force probante des images venait à évoluer vers le sommet de la hiérarchie des modes de preuve.

L'objectif de la procédure du bornage amiable est multiple. Premièrement elle permet de fixer et de garantir la limite. Ainsi, une importante étape de recherche et de hiérarchisation des pièces est à mener

¹⁷¹ Lexis Nexis (auteur non précisé), JurisClasser encyclopédie des huissiers de justice. Fascicule 10 : « Bornage ». Page 4 paragraphe 1.

et le principe du contradictoire doit être respecté. Ensuite, les pièces relatives au bornage doivent pouvoir permettre la réimplantation des bornes conformément à l'implantation initiale. Ce second objectif est atteint par la présence du plan descriptif de bornage. Enfin, le bornage a pour objectif de regrouper l'acceptation formelle et irrévocable sur la position de la limite. Le procès-verbal de bornage normalisé (PVCN) est l'élément permettant de remplir ce troisième objectif. Il regroupe tous les éléments¹⁷² permettant le bornage et il est devenu obligatoire depuis le 1^{er} Juillet 2010.

En ce qui concerne **la hiérarchie des modes de preuve utilisés en bornage**, on retrouve en partant du sommet : les titres de propriété, les documents issus d'un bornage antérieur, les signes de possession, les us et coutumes, les indices et présomptions et enfin les documents cadastraux¹⁷³. On constate que **la place de l'image dans cette hiérarchie est au bas de la pyramide, plus précisément au niveau des indices et présomptions**. Néanmoins, si la valeur probante de l'image venait à atteindre celle de l'écrit et si l'utilisation de cette dernière venait à se généraliser lors de la réalisation des bornages amiables, alors elle pourrait atteindre le sommet de la hiérarchie des modes de preuve en bornage. En effet, l'image est aujourd'hui peu utilisée alors que la jurisprudence reconnaît que si une pièce graphique est annexée à un acte alors elle peut revêtir la même valeur probante que l'acte lui-même¹⁷⁴. Il faut cependant respecter un formalisme, par exemple pour l'acte authentique l'annexe doit être mentionnée dans l'acte et elle doit être signée du notaire dans le cas d'un écrit sur papier et elle doit être « indissociablement liée »¹⁷⁵ à l'acte dans le cas d'un écrit électronique. Donc si la force probante de l'image venait à augmenter, l'utilisation de celle-ci comme mode de preuve augmenterait et elle serait plus souvent présente notamment en tant qu'annexe.

Toujours en ce qui concerne la hiérarchie des modes de preuve du bornage et concernant les documents issus d'un bornage antérieur, l'image revêtue d'une force probante supérieure pourrait avoir un impact sur les pièces graphiques annexées au PVCN. Aujourd'hui, l'ordre des géomètres experts (OGE), préconise une pièce graphique permettant la réimplantation des bornes¹⁷⁶. Avant la création du PVCN, un simple croquis pouvait suffire. Néanmoins, on constate qu'en deuxième position de la hiérarchie des modes de preuve du bornage se place les documents issus d'un bornage antérieur. Donc **le géomètre-expert pourrait systématiquement prendre en photographie les bornes implantées** dans leur environnement, il aurait la possibilité de les faire signer par toutes les parties et par lui-même. Ainsi, l'image regrouperait l'acceptation formelle des parties sur la position de la limite. Aussi, l'image pourrait jouer le rôle de croquis en y insérant des côtes permettant de réimplanter la borne par rapport à des éléments fixes du terrain. L'image aurait le rôle d'information visuel et topographique. Donc, si l'image est considérée comme un écrit, elle serait un acte sous seing privé constatant l'accord des parties sur la position des bornes. Pour éviter qu'elle ne soit remise en cause il serait intéressant de l'annexer au PVCN. Finalement, l'image annexée au PVCN pourrait être apportée comme document issu d'un bornage antérieur et donc avoir une place au sommet de la hiérarchie des modes de preuve permettant la détermination et la fixation de la limite du bornage.

¹⁷² Le PVCN doit permettre l'identification des parties et des parcelles concernées, il doit comporter les documents qui ont permis d'établir les limites, il doit définir précisément les points essentiels des limites (sommet, jonctions, ...), il reprend les obligations liées à la procédure de bornage, il doit recueillir les signatures de toutes les parties, et enfin un plan de bornage doit être réalisé. Informations tirées du cours Mme. Morgane LANNUZEL, « *Module bornage et délimitation* », ESGT, 2015, page 31.

¹⁷³ Katel SALAÛN. TFE ESGT « *La hiérarchie des modes de preuve dans la fixation de la limite de propriété : les difficultés pratiques et théoriques d'application.* ». Page 35.

¹⁷⁴ Cour de cassation troisième chambre civile du 17 juillet 1972, pourvoi n°71-10414, Bull. civ. 1972, III, n°460.

¹⁷⁵ Isabelle PETEL-TEYSSIE. « Contrats et obligations, preuves littérales, acte authentique » JurisClasseur. Page 14 paragraphe 55.

¹⁷⁶ Ordre des Géomètres-experts, « Recueil des prestations », PUBLI-TOPEX, 2014, 71 pages. Page 1 et 2.

La réalisation du plan de bornage régulier¹⁷⁷ fait partie des obligations imposées par l'OGE pour la procédure de bornage amiable¹⁷⁸. Ce plan doit effacer toutes les ambiguïtés relatives à la position des sommets de la limite, indiquer les coordonnées des sommets de la limite, être coté, être légendé, indiquer la direction du Nord et être signé par les parties. **L'utilisation d'une orthophotographie permettrait de répondre aux objectifs imposés par l'OGE.** Néanmoins, aucun cas d'utilisation d'orthophotographie n'a été recensé alors qu'elle permet aisément d'atteindre une précision conforme à la caractéristique « régulière » du plan de bornage. En effet, la majorité des plans de bornage sont réalisés à l'échelle du 1/200¹⁷⁹, pour que ces plans soient « réguliers », il faut une précision sur les points levés inférieure à deux centimètres¹⁸⁰ ce qui est largement accessible aujourd'hui¹⁸¹. L'augmentation de la valeur probante de l'image permettrait de généraliser l'utilisation de l'orthophotographie. Elle a plusieurs avantages par rapport au plan de bornage traditionnel : elle est **plus exhaustive**, ce qui permet d'avoir plus d'éléments dans le cas où il faudrait réimplanter les bornes. Elle est également plus **simple à comprendre** qu'un plan et elle rend compte davantage du travail réalisé par le géomètre-expert. L'orthophotographie a un **coût de production inférieur** à celui du plan traditionnel. Enfin, elle **suscite moins de suspicion** qu'un plan réalisé par un tiers. Ainsi, l'orthophotographie représenterait une part plus importante du PVBN car en plus de l'éventuelle augmentation de la force probante de l'image, elle serait issue d'un expert du foncier et de la mesure.

Après avoir envisagé le cas du bornage amiable où la position de la ligne séparative est incertaine, il est intéressant de s'attarder sur le cas où la position de la ligne séparative est certaine. Dans cette éventualité, en pratique peu fréquente, les parties concernées connaissent et sont en accord sur la position de la limite séparative¹⁸². Lorsque la position de la limite n'est pas contestée, l'opération de bornage peut se limiter à l'opération matérielle d'implantation des bornes¹⁸³. Dans ce cas, les parties peuvent signer une convention qui n'est soumise à aucune forme particulière. Cela peut être un procès-verbal de bornage, un plan d'architecte signé par les parties, un acte notarié¹⁸⁴. **L'utilisation de la photographie ou de l'orthophotographie peut être adaptée à ce cas particulier où la position de ligne séparative est connue et acceptée par tous les concernés.** En effet, les parties pourraient s'accorder sur une convention contradictoire basée sur les images afin d'entériner leurs limites et leurs consentements. Cela pourrait encourager les parties à trouver un accord amiable sur la position de leurs limites. En effet, d'un point de vue financier si les parties s'accordent sur la mise en place d'un acte et qu'elles réalisent les images de base figeant les sommets de la limite, alors le coût de l'opération de bornage serait réduit puisque l'intervention du géomètre-expert serait minime voire inexistante. Elle se limiterait à l'implantation matérielle des bornes si les sommets de la limite ne sont pas déjà matérialisés. Néanmoins, aucun géomètre-expert n'accepterait de réaliser cette implantation sans réaliser auparavant un PVBN. De plus, cette éventualité ne pourra pas se généraliser puisque dans de plus en plus de cas, comme la vente et la construction, il est nécessaire de connaître précisément la position de la limite dans le système de référence légal et donc l'intervention du géomètre-expert est indispensable. Enfin, il faut que toutes les parties connaissent et s'accordent sur la position de la ligne séparative, ce qui n'est généralement pas le cas. Donc même si l'image permettrait d'augmenter l'implication des propriétaires dans la procédure de bornage, elle n'effacera jamais le regard expert et parfois indispensable du géomètre-expert dans les procédures de délimitations foncières.

¹⁷⁷ « Lever dans lequel la détermination de tous les détails est effectuée avec une erreur qui, réduite à échelle du levé est inférieure ou du même ordre de grandeur que l'erreur graphique. » et l'erreur graphique est l' « écart entre le report d'un point sur une minute et sa position vraie » Source : www.aftopo.org.

¹⁷⁸ Morgane LANNUZEL. Module de bornage et délimitation – ESGT – Page 43.

¹⁷⁹ Constat réalisé dans le cabinet HOUDRY.

¹⁸⁰ Le pouvoir séparateur d'un œil sain est de 0,0001 m à 30 cm de distance (distance de lecture d'un plan). Cette valeur de 0,0001 m sur le plan papier correspond à l'échelle du 1/200 à 0,02 m sur le terrain. ($\frac{1}{200} = \frac{0,0001}{x}$) donc $x = 0,02$ m.

¹⁸¹ Voir les précisions atteintes en partie 1.

¹⁸² Informations du cabinet HOUDRY.

¹⁸³ Lexis Nexis (auteur non précisé), JurisClasseur encyclopédie des huissiers de justice. « Bornage ». Page 3 paragraphe 4, Fascicule 10.

¹⁸⁴ Lexis Nexis (auteur non précisé), JurisClasseur encyclopédie des huissiers de justice. « Bornage ». Page 19 paragraphe 129, Fascicule 10.

Il est également nécessaire de souligner que la procédure de bornage ne revêt qu'un **statut déclaratif** car elle ne crée pas de droit nouveau¹⁸⁵. En effet, le bornage n'est pas un acte translatif de droit réel immobilier, il ne fait que constater un droit déjà existant. Il est donc impossible de fonder une action en revendication de la propriété sur un PVBN dûment rédigé¹⁸⁶. Ainsi, un PVBN réalisé sur la base de l'image ne peut pas être le support d'un droit réel immobilier puisqu'intrinsèquement le bornage ne répond pas à cette fonction. Après avoir imaginé les éventuelles conséquences de l'évolution de la force probante de l'image sur la procédure de bornage amiable, une nouvelle activité pour le géomètre-expert est envisagée.

2.5. L'authentification des images de télédétection : une nouvelle mission pour le géomètre-expert ?

Comme il a été possible de le constater précédemment, que ce soit à l'échelle nationale ou internationale, il n'existe aucun organisme voué à l'authentification des images de télédétection. Il est nécessaire de rappeler que **l'authentification** a pour objectif de valider l'authenticité d'une donnée, en d'autres termes, l'identité de son émetteur ou de son créateur. La certitude sur **l'auteur**, le **lieu**, et **l'époque** de réalisation de cette donnée fait partie du processus d'authentification. Cette notion est une des composantes de la sécurisation qui a pour objectif de limiter le vol, la diffusion, la modification, la détérioration de la donnée. La problématique de l'authenticité de l'image intervient dans tous les domaines abordés. Par conséquent, il semble difficile d'envisager les précédentes hypothèses permettant l'évolution du statut de l'image sans réfléchir à la création d'un organisme d'authentification des images de télédétection.

Le géomètre-expert étant un **professionnel de la mesure et notamment en photogrammétrie**, il semble naturel de se tourner vers cette profession pour endosser le rôle d'authentificateur d'images issues de la télédétection. De plus, il est régulièrement amené à conserver un **point de vue neutre et professionnel**, notamment lors des réunions de bornage, ce qui est indispensable pour l'authentification. Néanmoins, il n'aurait pas la mission d'authentifier toutes les images de télédétection mais principalement celles issues de la photogrammétrie. En effet, il faudrait qu'il puisse avoir les ressources nécessaires pour authentifier les images, et donc il semble intéressant de se restreindre aux images réalisables dans le respect de la législation relative aux aéronefs téléguidés¹⁸⁷. Cette législation permet de considérer uniquement les images de télédétection prises à une hauteur par rapport au sol inférieure à 150 mètres. Ainsi, comme de nombreux géomètres-experts disposent actuellement des moyens techniques et théoriques pour produire ces images, il semblerait intéressant de faire évoluer leurs compétences au-delà de la production. Le géomètre-expert pourrait alors se voir attribuer la compétence d'authentificateur d'images de télédétection.

D'un point de vue technique, la mission du géomètre-expert serait de **vérifier le caractère juste et fidèle à la réalité des images**. Pour disposer d'images de télédétection authentifiées, le géomètre-expert authentificateur devrait pouvoir s'assurer de cette justesse et de cette fidélité à la réalité. Une mission de contrôle semble indispensable. Cette mission pourrait prendre la forme d'un levé de contrôle effectué par le géomètre authentificateur. Ce dernier serait réalisé soit par une méthode topographique ordinaire, avec un tachéomètre ou une antenne GNSS en levant des points de contrôle par exemple, soit par la réalisation d'une mission photogrammétrique indépendante. La première méthode permet une authentification

¹⁸⁵ Lexis Nexis (auteur non précisé), JurisClasseur encyclopédie des huissiers de justice. « Bornage ». Page 22 paragraphe 157, Fascicule 10.

¹⁸⁶ Lexis Nexis (auteur non précisé), JurisClasseur encyclopédie des huissiers de justice. « Bornage ». Page 22 paragraphe 157, Fascicule 10.

¹⁸⁷ Arrêté du 11 avril 2012 relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent. NOR : DEVA1206042A.

ponctuelle et correspondrait à une authentification de niveau moyen. La seconde méthode permet une authentification globale et correspondrait à une authentification de niveau élevé. Selon le besoin du client, le géomètre-expert devrait donc adapter sa méthode d'authentification.

Toujours du point de vue technique, cette authentification devrait découler d'une **étude basée sur des outils statistiques** comme ceux utilisés lors des tests de délimitation¹⁸⁸. Ceci impliquerait la réalisation d'une comparaison entre les données issues du demandeur et les données issues de l'authentificateur. Ainsi, quel que soit la méthode d'authentification choisie, elle impliquerait pour le géomètre-expert authentificateur de pouvoir réaliser un premier traitement photogrammétrique utilisant les données à authentifier, puis un second traitement utilisant ses propres données ou permettant la comparaison avec les éléments issues de son lever. Par conséquent, les mêmes options de traitement devraient être appliquées aux deux calculs. L'intervention du géomètre authentificateur doit donc être prévue par le client puisqu'elle devrait se faire à un moment proche de celle du client. Aussi, son intervention permettrait d'authentifier la date et le lieu de l'acquisition puisque la réalisation d'une mission photogrammétrique par drone doit faire l'objet d'une **autorisation préfectorale** qui précise la date et le lieu où la mission peut être réalisée. À cela s'ajouterait l'intervention du géomètre authentificateur le même jour que celui de la réalisation des images à authentifier. Ainsi, le géomètre-expert authentificateur pourrait réaliser une **authentification de la date, du lieu, de l'auteur et de la fiabilité des images** vis-à-vis de la réalité. Cette fiabilité à la réalité pourrait également faire l'objet de plusieurs catégories en fonction du type de méthode utilisée et des résultats obtenus après comparaisons.

Pour l'aspect juridique, la fonction d'authentificateur devrait pouvoir être obtenue de façon réglementée. L'agrément pourrait ne concerner qu'une liste précise de professions ayant les **compétences théoriques nécessaires**. Il pourrait exiger un matériel particulier permettant d'atteindre des résultats d'une qualité suffisante à l'authentification. L'agrément pourrait éventuellement se composer d'une formation fixant l'étendue des pouvoirs de l'agrément et précisant les procédures à suivre pour authentifier une image de télédétection. Enfin, la réalisation de l'authentification pourrait suivre un certain **formalisme** qui regrouperait tous les éléments ayant permis l'authentification. Par exemple, les autorisations préfectorales de vol, les caractéristiques du matériel utilisé, l'identité détaillée de l'auteur des images, l'identité détaillée de l'authentificateur, le descriptif de la méthode d'authentification, les paramètres des calculs, les résultats obtenus, et encore tous autres éléments susceptibles de fonder l'authenticité des images.

Cette authentification réalisée par le géomètre-expert aurait forcément un coût et en conséquence elle devrait être justifiée, notamment par l'attribution d'une force probante supérieure aux images de télédétection authentifiées. L'authentification des images de télédétection, prises à une hauteur par rapport au sol inférieure à 150 mètres, représenterait un nouveau marché pour la profession et lui apporterait encore un peu plus de modernité.

Dans cette seconde partie prospective, les nombreuses hypothèses émises permettent de souligner les éventuelles besoins juridiques et techniques nécessaires à l'évolution du statut juridique de l'image. En effet, si cette évolution se réalise, cela se fera obligatoirement dans le respect de nombreuses conditions. Il est également important de rappeler qu'une telle révolution impactera de multiples domaines. Elle entraînera un changement dans les rapports et les utilisations liés à l'image et des contraintes résulteront nécessairement de cette révolution. Néanmoins de nouveaux enjeux émergeront aussi, comme nous avons pu imaginer avec l'authentification des images de télédétection par le géomètre-expert.

¹⁸⁸ Voir paragraphe 1.3.4.4.

Conclusion

La réalisation de ce sujet de mémoire m'a semblé particulièrement intéressante puisqu'il se situe à la jonction de deux domaines qui touchent particulièrement la profession du géomètre-expert : **le foncier et la mesure**. De plus, il traite de questions actuelles auxquelles la communauté des géomètres experts se confronte depuis l'arrivée du numérique. Le 43^{ème} congrès des géomètres-experts a eu lieu en Juin 2016 et il avait pour titre : « Dessinons un monde à l'air du numérique ». Ce rassemblement d'échelle nationale, montre l'intérêt de la communauté concernant les nouvelles méthodes d'acquisition et d'exploitation de la donnée. D'un point de vue technique, ce TFE se concentre sur la télédétection et notamment sur l'une de ses branches : la photogrammétrie. D'un point de vue foncier, ce mémoire s'oriente sur les délimitations et notamment sur le cas particulier du bornage. Le recours à la télédétection pour effectuer une délimitation ne semble pas évident. Néanmoins, avec la **démocratisation de la photogrammétrie**, amorcée il y a une quinzaine d'années par la photogrammétrie numérique, à laquelle s'ajoute l'arrivée de nouveaux vecteurs de télédétections tels que les drones, il semble nécessaire d'envisager les interactions entre la télédétection et la délimitation.

L'état du droit de l'image en tant que mode de preuve a permis de faire ressortir une **faible utilisation de l'image comme moyen de preuve judiciaire**. Les défauts liés à son authenticité, à la neutralité de sa source et sa place au sein de la hiérarchie des modes de preuve, sont les principaux freins à cette utilisation. À ces défauts s'additionne une réalité culturelle : le droit est un domaine peu illustré graphiquement. Cependant l'état du droit a permis, de façon ponctuelle, de faire ressortir la force de l'image comme mode de preuve dans des **cas nécessitant une intervention rapide**. En effet, les catastrophes technologiques, les catastrophes naturelles et les comportements illégaux sont des situations que l'image peut fixer et enregistrer ce qui peut permettre de les utiliser comme moyen de preuve.

L'état de l'art de l'utilisation de l'image comme outil de délimitation montre de nouveau que l'utilisation de l'image est peu répandue. La principale application concerne la **mise en place des systèmes fonciers** pour des pays en développement. L'utilisation de l'image de télédétection pour réaliser une délimitation foncière par un géomètre-expert en France est **anecdotique**. Pourtant, de plus en plus de cabinets sont équipés d'un matériel de photogrammétrie. L'obstacle principal à l'utilisation de la photogrammétrie pour réaliser une délimitation foncière réside dans une idée reçue sur cette technique. En effet, beaucoup de géomètres experts considèrent la photogrammétrie trop peu précise pour réaliser une délimitation foncière et à fortiori un levé de bornage. Cependant, la majorité des levés des limites lors d'une opération de bornage sont rattachés par une méthode GNSS en mode RTK. Ceci signifie que la position des bornes est déterminée à une précision allant de 2 à 5 cm. Comme il a été possible de le constater, la photogrammétrie peut permettre d'aboutir sans difficultés à une précision relative 3D proche du centimètre. De plus, il faut souligner que lors d'une opération de bornage, seules les coordonnées planimétriques des bornes sont déterminées. Or la photogrammétrie permet d'atteindre une **précision planimétrique relative inférieure au centimètre**. Les tests réalisés montrent qu'il est possible d'effectuer une délimitation de l'ordre du centimètre dès lors que les précautions nécessaires sont prises. Néanmoins, il faut souligner que cette méthode permet uniquement d'obtenir la surface du terrain. Il n'est donc pas judicieux de l'utiliser systématiquement. Enfin, il semble inimaginable pour les professionnels de la mesure de délaisser une méthode permettant d'atteindre des précisions de cet ordre de grandeur. L'augmentation du nombre de drones voués à la photogrammétrie au sein des cabinets de géomètre-expert conforte ce point de vue.

Dans l'état actuel du droit, **l'utilisation des images de télédétection va croître**, notamment grâce aux drones mais aussi grâce à la démocratisation de la photogrammétrie. La deuxième partie du mémoire,

consacrée à la place de l'image dans les délimitations de demain est principalement fondée sur des hypothèses. Ces dernières envisagent l'évolution progressive de la place de l'image dans la hiérarchie des modes de preuve. Les révolutions imaginées permettent **d'anticiper les éventuelles conséquences** lorsque l'on considère l'image comme un écrit au sens juridique, soit comme un acte sous seing privé soit comme un acte authentique. Systématiquement est ressortie de cet exercice une nécessité de répondre à un nombre important de règles. Néanmoins, quelle que soit l'évolution imaginée, l'utilisation de l'image serait accrue dans le cas de l'utilisation générale mais aussi dans le cas d'une utilisation pour effectuer une délimitation et notamment dans le cas du bornage. Il est intéressant de souligner que malgré les révolutions imaginées, **l'image n'est jamais le support des droits**, au mieux elle permet de les constater.

Si les hypothèses émises précédemment sont révolutionnaires, il est possible d'envisager un degré de révolution encore supérieur en proposant de transformer l'image en un **acte constitutif de droit**. L'acte constitutif de droit est un acte juridique qui crée des droits nouveaux en modifiant une situation juridique antérieure¹⁸⁹, par exemple l'acte de vente. Il s'oppose à l'acte déclaratif qui permet uniquement de constater une situation juridique, par exemple le bornage. En effet, le bornage a pour objet « de mettre le droit de propriété non en question mais en application »¹⁹⁰. C'est donc pour cette raison que la publication foncière d'un PVBN n'est pas obligatoire puisqu'elle permet uniquement d'informer les tiers¹⁹¹. Le bornage étant un acte déclaratif, il est possible d'envisager une évolution de son statut afin de pouvoir utiliser l'image de télédétection comme support de droit. Comme vu précédemment, le bornage a pour objet de mettre en application le droit de propriété. Cependant dans de nombreux cas, les actes de propriété ne mentionnent pas précisément la position des sommets des limites de propriété. Il faudrait donc remodeler l'objet du bornage afin qu'il serve, non plus à mettre en application, mais à préciser le droit de propriété. Ainsi, le bornage deviendrait un acte constitutif de droit. Il devrait donc nécessairement respecter un certain formalisme et être obligatoirement envoyé à la publicité foncière. Un tel changement pourrait permettre de conférer à l'acte de bornage une date, une force probante et une force exécutoire équivalentes à un acte authentique. Donc pour que l'image devienne un acte constitutif des droits du bornage il faudrait d'une part revoir le principe du bornage, et d'autre part il faudrait pouvoir fonder le bornage sur une image ce qui implique qu'elle soit équivalente à un acte authentique. Cette révolution semble peu probable puisque le principe de bornage n'est pas remis en question de nos jours. De plus, comme vu précédemment, faire évoluer l'image au niveau des actes authentiques nécessite des **modifications profondes de la législation**. Donc cette hypothèse semble avoir peu de chance de se produire. Néanmoins, avec l'évolution des méthodes d'acquisition et l'augmentation de la place de l'image dans notre société, des changements sont à prévoir.

L'évolution du statut et corrélativement de la place de l'image est envisageable selon plusieurs directions. Cependant, elles nécessitent toutes la mise en place de **conditions techniques**, comme la mise en place d'un organisme d'authentification, et de **conditions juridiques**, comme l'évolution de la définition de l'écrit au sens juridique. Donc quelle que soit la future évolution du statut et de la place de l'image considérée, elle nécessitera la mise en place d'un cadre législatif et d'un cadre technique précis. En effet, ces cadres représenteront **les fondations** de l'évolution du statut juridique de l'image.

¹⁸⁹ Définition disponible sur le lexique juridique disponible sur le site internet : www.droit.fr/lexique

¹⁹⁰ G. CORNU. Droit civil. « *Les biens* », Montchrestien, 13^{ème} édition 2007 Domat droit privé p.197

¹⁹¹ Gil GUILHEM. Article : « Un procès-verbal de bornage ne constitue pas un acte translatif de propriété ». « Droit de l'immobilier et urbanisme », L'ESSENTIEL, Septembre 2015, 3 pages.

Bibliographie

Ouvrages :

- Corinne RENAULT-BRAHINSKY, « *Le nouveau droit des contrats* », édition GUALINO, 2016, 79 pages.
- Dominique MONGENOT, « *Droit des obligations – La preuve* », édition LARCIER, 2002, 383 pages.
- Gérardine GOH ESCOLAR, « *Evidence from earth observation satellites* », édition Ray Purdy and Denise Leung, 2012, 466 pages.
- G. CORNU, Droit civil, « *Les biens* », Montchrestien, 13ème édition 2007 Domat droit privé, 277 pages.
- Nathalie DELEUZE Aude BERTRAND-MIRKOVIC, « *Introduction générale au droit* », STUDYRAMA, 218 pages.
- Simone COURTEIX, « *Droit télédétection et environnement* », édition SIDES, 1993, 292 pages.
- W. BELIME, « *Cours d'introduction à la science du droit* », A. DURAND et PEDONE-LAURIEL Libraires, 1869, 717 pages.
- Xavier LABBÉE, « *Introduction générale au droit pour une approche éthique* », SEPTENTRION, 2005, 194 pages.

Mémoires :

- Baptiste VARIN, Travail de fin d'étude « Les opportunités et l'utilité de l'utilisation de la photogrammétrie aérienne par drone dans la réalisation d'un procès-verbal de bornage et de reconnaissance de limite » ESGT, 2015.
- BILLION Florence, CARNEJAC Alexandre, MAUVIEL Steeve, SALAUN Katel, Projet préprofessionnel « Étude de la valeur juridique des images de télédétection en vue d'un bornage virtuelle » ESGT, 2015.
- Katel SALAÛN, TFE « La hiérarchie des modes de preuve dans la fixation de la limite de propriété : les difficultés pratiques et théoriques d'application. », ESGT, 2015.
- Ulrich MAMBOU, « étude de la valeur juridique des images de télédétection en vue d'un bornage virtuel. », Projet d'assistant recherche bénévole ESGT (ARB), 2015.

Articles de revues :

- Bernard BOULOC, professeur à l'université de Paris 1 (Panthéon – Sorbonne). « Apparence d'hydrocarbures et présomption d'innocence ». www.afcan.org/dossiers_juridiques/doctrine2.html
- Diane DUFOUR, « Images à charge - La construction de la preuve par l'image », Exposition LE BAL, édition Xavier BARRAL, 2015.
- Fédération Internationale des Géomètres (FIG) et de la Wolrd Bank, « Fit-For Purpose Land Administration » n°60, 2015, 44 pages.
- Gil GUILHEM, « Droit de l'immobilier et urbanisme », L'ESSENTIEL, Septembre 2015, 3 pages.
- Isabelle PETEL-TEYSSIE, « Contrats et obligations, preuves littérales, acte authentique ». JurisClasseur Encyclopédie des Huissiers de Justice, 2015.
- Jean-François MAYENCE, « Quelques considérations sur l'état du cadre juridique des activités d'observation satellitaire et de certaines de leurs applications », novembre 2008, 24 pages.
- Joseph RICHANI, Thèse : « Les preuves dans l'arbitrage international ». Disponible sur le site internet : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00869967/document>
- Lexis Nexis SA (auteur non précisé), Fascicule 10 : « Bornage », JurisClasseur encyclopédie des huissiers de justice, 2015.
- Michel KASSER, Jean Baptiste MONNERIE, Laurent DELGADO, Daniel ROBERT. Dossier XYZ n°122 : « La photogrammétrie au service de la justice : mesures géométriques du cratère de l'explosion AZF », mars 2010, page 31-38.
- Michel KASSER, « Les nouveaux textes réglementaires français en matière de précision des levés » Revue XYZ n°96 3ème trimestre 2003.

- Nesrine CHEHATA, Arnaud LE BRIS, Philippe LAGACHERIE, « Délimitation des parcelles agricoles par classification d'images Pléiades ». Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection. Janvier 2015 n°209.
- Ordre des Géomètres-experts, « Recueil des prestations », PUBLI-TOPEX, 2014, 71 pages.
- Pascal LEMOINE conseiller référendaire à la Cour de cassation, « La loyauté de la preuve », rapport annuel de la Cour de cassation, 2004.
- Sylvian DOROL, « Fasc. 20 : PREUVE. Modes de preuve », JurisClasseur Encyclopédie des Huissiers de Justice, 2015.
- Sylvian DOROL, « Preuves Règles générales », JurisClasseur Encyclopédie des Huissiers de Justice, 2015.

Lois, décrets, arrêtés et ordonnances :

- Loi n°2000-230 du 13 mars 2000 - art. 1 JORF 14 mars 2000. Portant sur la définition de l'écrit.
- Loi n°80-525 du 12 juillet 1980, v. init. Portant sur la preuve testimoniale.
- Loi n° 74-645 du 18 Juillet 1974. Portant « sur la mise à jour périodique de valeurs locatives servant de base aux impositions directes locales ».
- Loi 1804-02-07 promulguée le 17 février 1804. Portant sur les modes de preuve.
- Loi 1803-03-08 promulguée le 18 mars 1803. Portant sur le droit et du respect de la vie privée.
- Décret n°55-22 du 4 janvier 1955 portant réforme de la publicité foncière.
- Arrêté du 11 avril 2012 relatif à la conception des aéronefs civils qui circulent sans aucune personne à bord, aux conditions de leur emploi et sur les capacités requises des personnes qui les utilisent.
- Ordonnance n° 2016-131 du 10 février 2016. Portant réforme du droit des contrats, du régime général et de la preuve des obligations.

Ressources électroniques :

- Légifrance (www.legifrance.gouv.fr)
- Géoportail (www.geoportail.gouv.fr)
- Association française de topographie : www.aftopo.org.
- IGN : www.professionnelts.ign.fr.
- Dictionnaire Larousse (www.larousse.fr/dictionnaires/francais)
- Cours permettant de comprendre l'influence des paramètres (ouverture, temps de pose et ISO) sur la photographie disponible sur le site internet : <http://blog.deviens-photographe.com/index.php/2014/06/premier-cours-photo-comprendre-exposition/>
- Encyclopédie en ligne : www.wikipédia.org
- Centre national de ressources textuelles et lexicales : www.cntrl.fr

Autres documents :

- Laurent POLIDORI, cours de télédétection ESGT, 2014.
- Laure CHANDELIER, cours de télédétection ESGT, 2014. (Disponible : <http://cours-fad-public.ensg.eu/>)
- Laure CHANDELIER, cours de photogrammétrie ESGT 2015. (Disponible : <http://cours-fad-public.ensg.eu/>)
- Elisabeth SIMONETTO, cours de traitement numérique des images ESGT. 2015.
- Stéphane DURAND, cours de topométrie de précision ESGT, 2015.
- Olivier DE JOINVILLE, cours de télédétection ESGT : « La télédétection optique », 2014.
- Morgane LANNUZE, module de bornage et délimitation – ESGT, 2014.
- École Polytechnique Fédérale de Lausanne, cours de photogrammétrie et de photo-interprétation, 2015.

Table des équations

Équation 1 : Calcul du filé.....	27
Équation 2 : Précision de restitution planimétrique théorique	29
Équation 3 : Précision de restitution altimétrique théorique	30
Équation 4 : Précision globale 3D théorique	30
Équation 5 : Précision de restitution 3D théorique	30
Équation 6 : Calcul de la taille d'un côté de photosite	31
Équation 7 : Moyenne arithmétique	36
Équation 8 : Précision	36
Équation 9 : Intervalle de confiance	37
Équation 10 : Écart moyen quadratique.....	37
Équation 11 : Écart moyen quadratique.....	37
Équation 12 : Ellipse de confiance.....	37

Table des figures

Figure 1 : Influence du rapport B/H sur la restitution altimétrique.	24
Figure 2 : Distinction entre la précision et l'exactitude.....	36
Figure 3 : Configuration du chantier du premier test. Source : Pix4D.	38
Figure 4 : Superposition des ellipses de confiance planimétriques (68%) de l'orthophotographie et du GNSS RTK.....	39
Figure 5 : Configuration du chantier du second test. Source : Pix4D.....	40
Figure 6 : Superposition des ellipses de confiance planimétriques théorique et empirique (68%).	41
Figure 7 : Hiérarchie des modes de preuve.....	45

Table des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques principales des images de télédétection en fonction des vecteurs.....	22
Tableau 2 : Récapitulatif du nombre de points d'appui nécessaire en fonction du vecteur et de ses caractéristiques.	25
Tableau 3 : Comparaison de la précision empirique et théorique sur différents chantiers.....	30
Tableau 4 : Conséquence d'une modification des paramètres de l'appareil photographique.....	32
Tableau 5 : Taille du pixel au sol nécessaire pour atteindre une précision globale donnée.....	32
Tableau 6 : Précision globale possible en fonction de la précision sur les points d'appui et de la restitution.	33
Tableau 7 : Moyenne et écart-type des écarts sur chaque composante, test 1.	38
Tableau 8 : Ellipse de confiance planimétrique (68%), test 1.	39
Tableau 9 : Intervalle de confiance altimétrique (68%), test 1.	39
Tableau 10 : Moyenne et écart-type des écarts sur chaque composante, test 2.	40
Tableau 11 : Ellipse de confiance planimétrique (68%), test 2.	41
Tableau 12 : Intervalle de confiance altimétrique (68%), test 2.	41

Table des annexes

Annexe 1 : Calcul de la dénivelée maximum admissible	63
Annexe 2 : Influence du recouvrement sur d'autres paramètres de vol	64
Annexe 3 : Comparaison des traitements photogrammétriques : couleur / niveaux de gris	65
Annexe 4 : Comparaison des traitements photogrammétriques : photos floues / photos nettes	66
Annexe 5 : Estimation de la précision globale empirique	68
Annexe 6 : Impact d'un manque de point d'appui sur le résultat photogrammétrique	69
Annexe 7 : Apport des bandes transversales pour le traitement photogrammétrique.....	70
Annexe 8 : Paramètres adéquats pour la création d'orthophotographie sous Pix4D.....	71
Annexe 9 : Calibration géométrique d'un appareil photo numérique via Pix4D	72
Annexe 10 : Présentation du matériel photogrammétrique du cabinet HOUDRY.....	74

Annexe 1 : Calcul de la dénivelée maximum admissible¹⁹²

Pour calculer la dénivelée maximum admissible sur un chantier photogrammétrique, il faut nécessairement connaître les caractéristiques du vol réalisé et de l'appareil photo utilisé. Ensuite, il est possible de calculer deux dénivelées maximums admissibles en fonction du recouvrement longitudinal et latéral. Enfin, la dénivelée la moins élevée des deux représente la dénivelée maximum admissible sur l'ensemble du chantier.

Paramètres de vol	Paramètre appareil photo
Hauteur de vol : H = 50 m Recouvrement longitudinal : R lon = 80 % Recouvrement latéral : R lat = 60 %	Longueur du capteur : l cap = 23,5 mm Largeur du capteur : L cap = 15,6 mm Distance focale : f = 16,0 mm

$$\Delta Z \text{ max longitudinale} = (1 - 2 \times Bl \div L \text{ sol}) \times H$$

Avec ($L \text{ sol}$) la largeur du cliché au sol et ($L \text{ sol}$) = $H \times L \div f$
 (Bl) la base longitudinale et (Bl) = $L \text{ sol} \times (1 - R \text{ lon} \div 100)$

$$\Delta Z \text{ max longitudinale} = (1 - 2 \times 9,75 \div 48,75) \times 50$$

$$\Delta Z \text{ max longitudinale} = 30 \text{ m}$$

$$\Delta Z \text{ max latérale} = (R \text{ lat} \div 100) \times H$$

$$\Delta Z \text{ max latérale} = (60 \div 100) \times 50$$

$$\Delta Z \text{ max latérale} = 30 \text{ m}$$

On en déduit donc la dénivelée maximum admissible de 30 m. Si on dépasse cette valeur, la condition de stéréoscopie latérale et longitudinale n'est plus respectée.

¹⁹² Laure CHANDELIER, cours « la prise de vue photogrammétrique », ESGT, 2014, page 16. Disponible sur le site internet de l'ENSG : http://fad.ensg.eu/moodle/file.php/316/La_prise_de_vues_photogrammetriques_papier.odt

Annexe 2 : Influence du recouvrement sur d'autres paramètres de vol

Le recouvrement latéral et longitudinal influe sur de nombreux paramètres de vol. En partant d'une situation initiale, il est possible de se rendre compte des impacts causés par une variation de la valeur du recouvrement.

Situation initiale :

Paramètres de vol	Paramètre appareil photo	Paramètre du chantier
Hauteur de vol : H = 50 m Recouvrement lat : 80 % Recouvrement lon : 80 %	Longueur du capteur : l cap = 23,5 mm Largeur du capteur : L cap = 15,6 mm Distance focale : f = 16,0 mm Temps minimum entre deux clichés : 0,6 s	Longueur : 300 m Largeur : 100 m Surface : 30000 m ²

Variation du recouvrement longitudinal :

Recouvrement longitudinal	60 %	75 %	90 %
ΔZ max longitudinale	10 m	25 m	40 m
Rapport B/H	0,39	0,24	0,10
Nombre de cliché	119	182	441
Temps entre deux clichés	2,4 s	1,5 s	0,6 s

Variation du recouvrement latéral :

Recouvrement latéral	20 %	60 %	80 %
ΔZ max latéral	10 m	30 m	40 m
Nombre de cliché	96	128	224

On constate qu'il est important de prendre en compte les caractéristiques du chantier et de l'appareil photo pour choisir les valeurs de recouvrement. En effet, un choix non adapté peut entraîner l'échec total de la mission photogrammétrique.

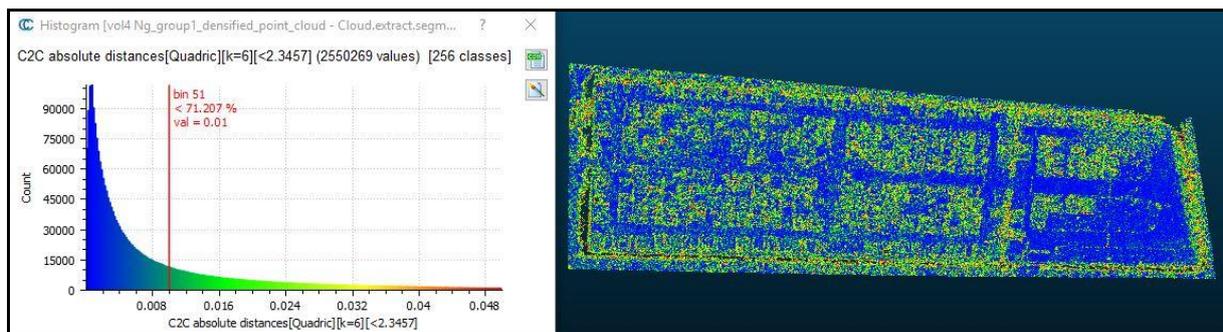
Annexe 3 : Comparaison des traitements photogrammétriques : couleur / niveaux de gris

Ce test a pour objectif de déterminer si l'utilisation de la couleur a un impact sur le traitement photogrammétrique. Pour effectuer cette comparaison, les photos couleurs d'un traitement effectué sous Pix4D ont été transformé en niveau du gris sous le logiciel GIMP. Ainsi, l'ensemble du traitement est identique, les paramètres de calcul sont identiques et le repérage des cibles est également identique. L'unique variation concerne la couleur des pixels des photographies utilisées pour l'un ou l'autre des traitements.

Voici les écarts obtenus sur 20 points de contrôle :

Type de photo	EMQ (composante E)	EMQ (composante N)	EMQ (composante h)
Couleur	0,0071 m	0,0056 m	0,0195 m
Niveau de gris	0,0071 m	0,0057 m	0,0195 m

Comme il est possible de le constater les écarts sur les points de contrôle sont minimes. Voici maintenant la comparaison effectuée avec le logiciel CloudCompare :



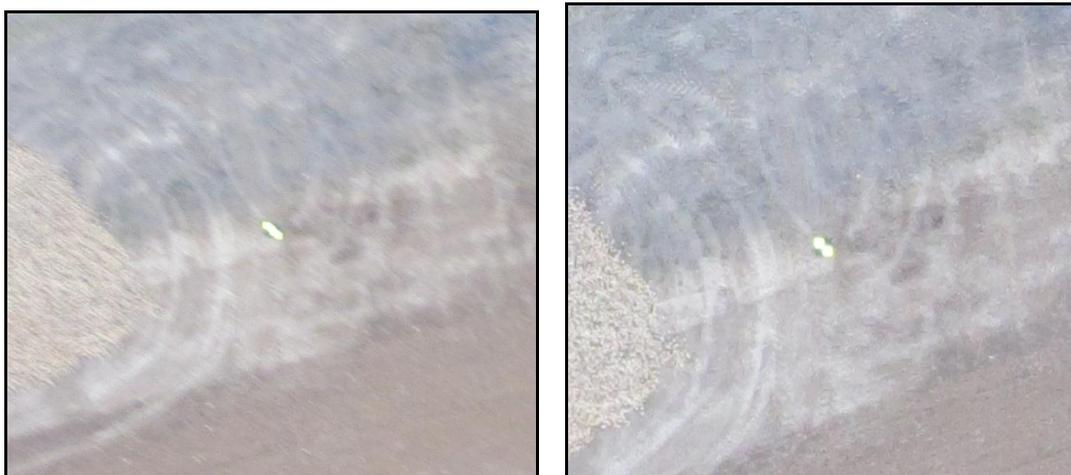
Comme on peut le voir sur la comparaison globale des deux nuages de points, les écarts sont très faibles (70 % des écarts sont inférieurs à 1 cm), avec un pic des écarts aux alentours de 2 millimètres. Les écarts les plus grands se localisent principalement sur les éléments en élévations comme la végétation par exemple.

Il est donc possible de conclure que l'utilisation de la couleur n'a pas un grand impact sur le traitement photogrammétrique. Néanmoins le rendu couleur permet une meilleure représentation de la réalité ce qui reste un avantage important.

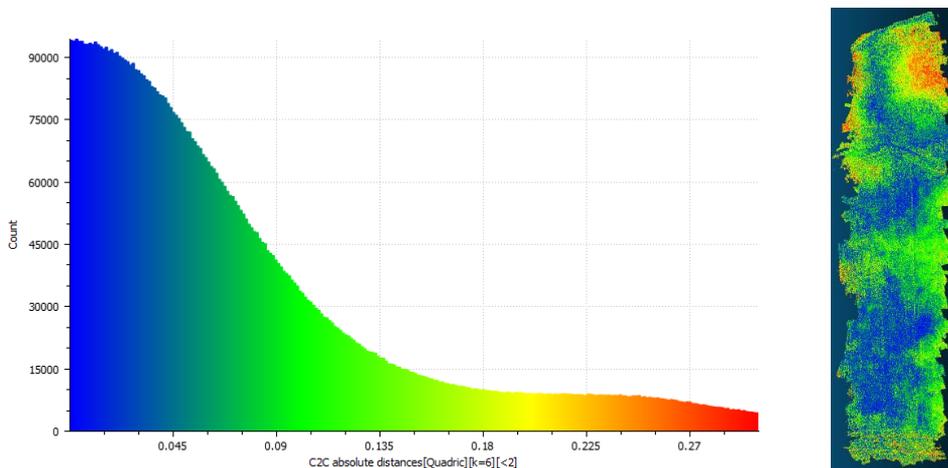
Annexe 4 : Comparaison des traitements photogrammétriques : photos floues / photos nettes

Parfois, on entend des « professionnels » affirmer que la netteté des images n'est pas importante pour réaliser un calcul photogrammétrique. Pour illustrer l'importance de la netteté des images, un chantier a été survolé deux fois. Le premier vol est configuré avec une vitesse d'obturation trop longue, les photos sont donc légèrement floues. Le second utilise une vitesse d'obturation adaptée, les photos sont nettes.

Voici les images d'une même cible obtenue pour les deux vols. À gauche le vol où les images sont floues et à droite le vol où les images sont plus nettes :



Maintenant voici la comparaison des nuages de point obtenus après traitement identique sous Pix4D. Cette comparaison est effectuée sous CloudCompare :



On constate des écarts de plusieurs centimètres en faisant varier uniquement la netteté des images d'un vol à l'autre et en utilisant les mêmes paramètres de calcul. En effet, en moyenne, on remarque un écart de près de 8 centimètres. On comprend ainsi l'importance d'utiliser des photos nettes pour réaliser un calcul photogrammétrique de qualité.

Pour le second test concernant les photos floues, le flou a été créé manuellement grâce à l'utilisation du logiciel GIMP. Le flou introduit dans les images est le flou minimal possible. Pour avoir une

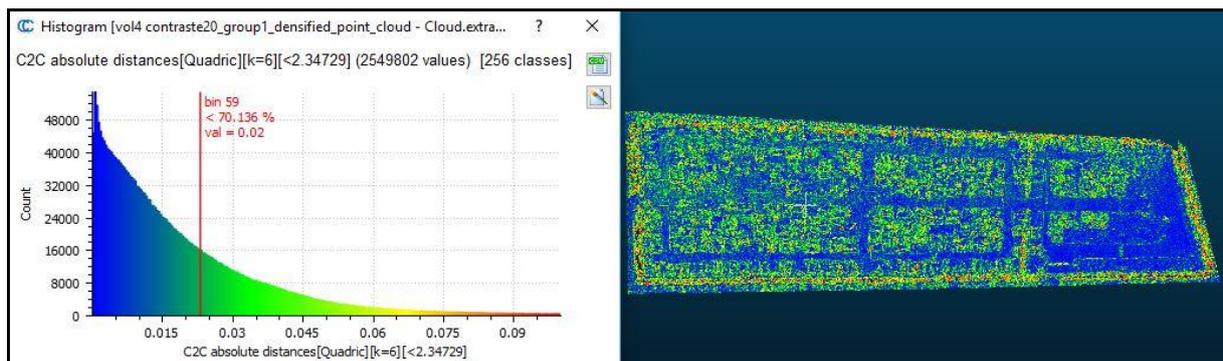
idée de l'impact de ce dernier sur les images voici une comparaison avant (photo de gauche) et après introduction du flou (photo de droite) :



Voici, dans le même ordre, un zoom sur une cible sur chaque photo :



Maintenant voici la comparaison des nuages de point obtenus après traitement identique sous Pix4D. Cette comparaison est effectuée sous CloudCompare :



On remarque un pic moins net que lors de la comparaison de l'annexe 3. On constate qu'en ajoutant de façon homogène un faible flou, les écarts deviennent nettement plus importants alors que le flou introduit ici est le moins important possible. La netteté est donc une donnée très importante pour le résultat du traitement photogrammétrique.

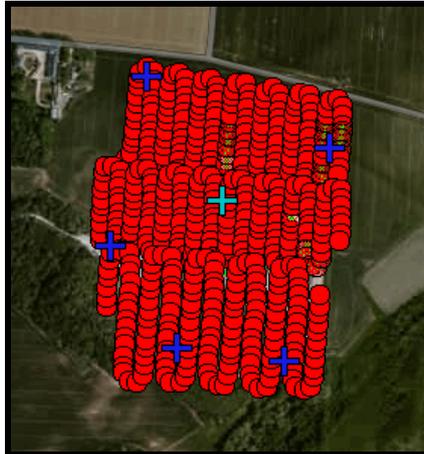
Annexe 5 : Estimation de la précision globale empirique

Chantier:	Vauci	Infir	Ebee	Lies	Everg	Everg Sans Tvs	Baro	Gunny
Nombre de point de contrôle	20	Nuage 0,0040	5	4	6	6	5	20
Taille du pixel au sol (m)	0,020	0,0040	0,028	0,018	0,02	0,02	0,023	0,011
Technique de Battachement	GNSS RTK	P20	GNSS RTK	GNSS RTK	GNSS RTK 10 mesures	GNSS RTK 10 mesures	GNSS RTK 10 mesures	TACHO
Présence de biais:								
Moyenne en X (m)	-0,005	-	0,003	0,003	0,0047	0,0036	-0,0161	-0,0014
Moyenne en Y (m)	-0,003	-	0,037	-0,001	0,0128	0,0068	0,0222	0,0004
Moyenne en Z (m)	0,001	-	0,049	-0,022	-0,0063	-0,0004	0,017	0,0192
Moyenne Planimétrique (m)	0,006	-	0,037	0,003	0,014	0,008	0,027	0,001
Moyenne 3D (m)	0,006	-	0,061	0,022	0,015	0,008	0,032	0,019
Flabilité:								
Précision du lever terrain (m)	0,05	0,0050	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,005
Précision de restitution (m)	0,028	0,006	0,040	0,025	0,028	0,028	0,033	0,016
Précision théorique (m)	0,057	0,008	0,064	0,056	0,057	0,057	0,060	0,016
Sigma X (m)	0,022	-	0,006	0,021	0,0146	0,016	0,0267	0,0043
Sigma Y (m)	0,024	-	0,020	0,017	0,0154	0,0153	0,0196	0,007
Sigma Z (m)	0,033	-	0,039	0,032	0,0262	0,0303	0,0495	0,0122
Précision plani Empirique (m)	0,033	-	0,021	0,027	0,021	0,022	0,033	0,008
Précision 3D Empirique (m)	0,046	0,0050	0,044	0,042	0,034	0,038	0,060	0,015
Précision Théorique - Empirique (m)	0,011	0,0025	0,020	0,014	0,024	0,020	0,000	0,002
Surévaluation de la précision (%)	19,3	33,8	30,6	25,4	41,3	34,7	0,2	10,0
Surévaluation moyenne (%)	30,8							
Exatitude:								
EMQ en X (m)	0,022	-	0,006	0,022	0,0154	0,0164	0,0311	0,0045
EMQ en Y (m)	0,024	-	0,020	0,017	0,0201	0,0167	0,0297	0,007
EMQ en Z (m)	0,033	-	0,039	0,039	0,0270	0,0303	0,0524	0,0227
EMQ Planimétrique (m)	0,033	-	0,021	0,028	0,025	0,023	0,043	0,008
EMQ 3D (m)	0,046	-	0,044	0,048	0,037	0,038	0,068	0,024
Facteur Z	1,014	-	1,868	1,403	1,066	1,295	1,219	2,728

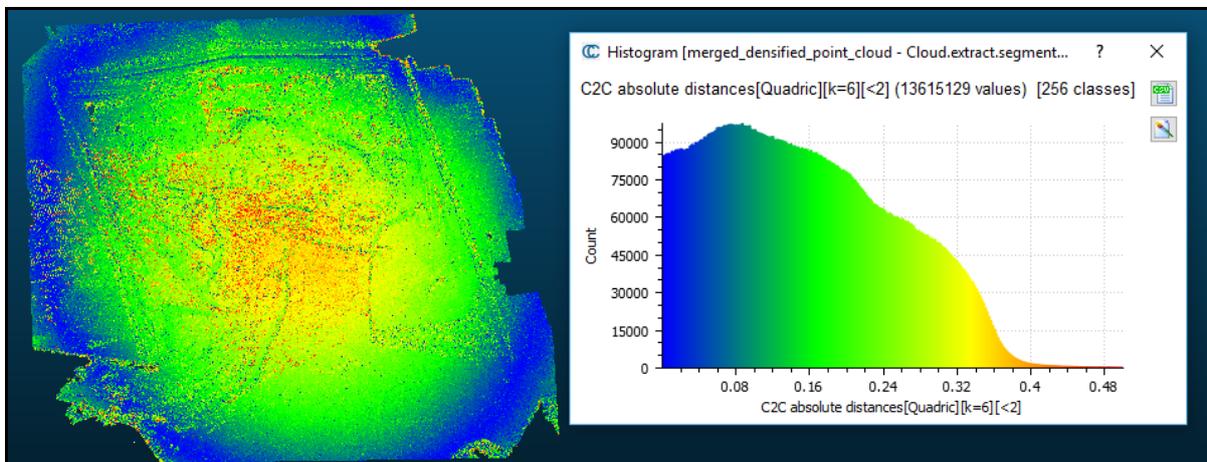
Annexe 6 : Impact d'un manque de point d'appui sur le résultat photogrammétrique

La répartition des points d'appui sur un chantier photogrammétrique a un impact important sur le résultat final. L'exemple suivant met en exergue les conséquences d'une mauvaise répartition des points d'appui.

Sur le schéma suivant, issu de Pix4D, la croix cyan représente un point de contrôle (n'intervenant pas dans le calcul). Les croix bleu marine représentent les points d'appui (base du calcul).



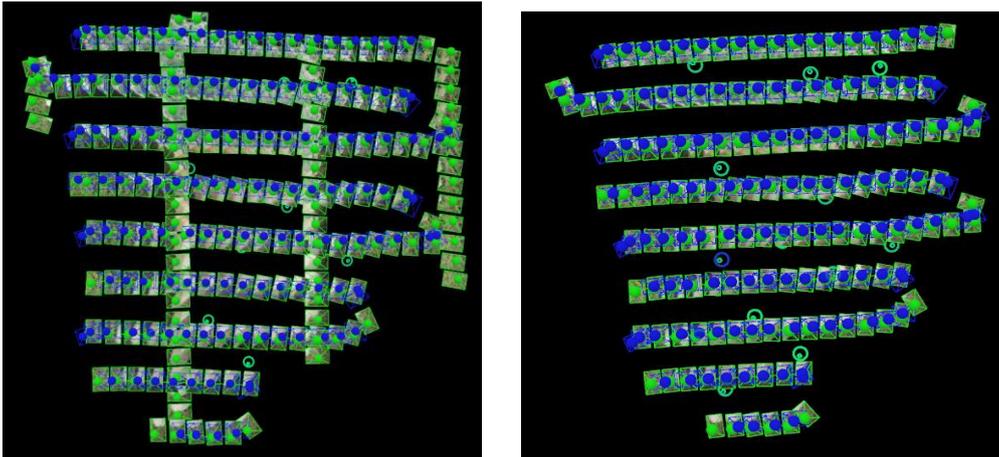
Voici la comparaison effectuée sous CloudCompare entre le nuage de point réalisé avec le point central en point de contrôle et le nuage réalisé exactement avec les mêmes paramètres mais avec le point central en d'appui :



On remarque des écarts croissant au fur et à mesure que l'on se rapproche du point central. Ces écarts peuvent parfois atteindre près de 40 centimètres ce qui est considérable. Cet exemple illustre bien l'importance de disposer de points d'appui en nombre suffisant et bien répartis. Il fait également ressortir l'importance des points de contrôle qui peuvent alerter sur ce genre de phénomène.

Annexe 7 : Apport des bandes transversales pour le traitement photogrammétrique

D'après la littérature photogrammétrique, les bandes transversales permettent de réduire le nombre de point d'appui altimétrique nécessaire au traitement photogrammétrique. Pour se rendre compte de l'intérêt de cette dernière, un même calcul photogrammétrique a été réalisé avec et sans bandes transversales. Voici, la configuration des deux vols en question, à gauche avec les bandes transversales et à droite sans les bandes transversales :



Voici les résultats obtenus sur les mêmes 6 points de contrôle :

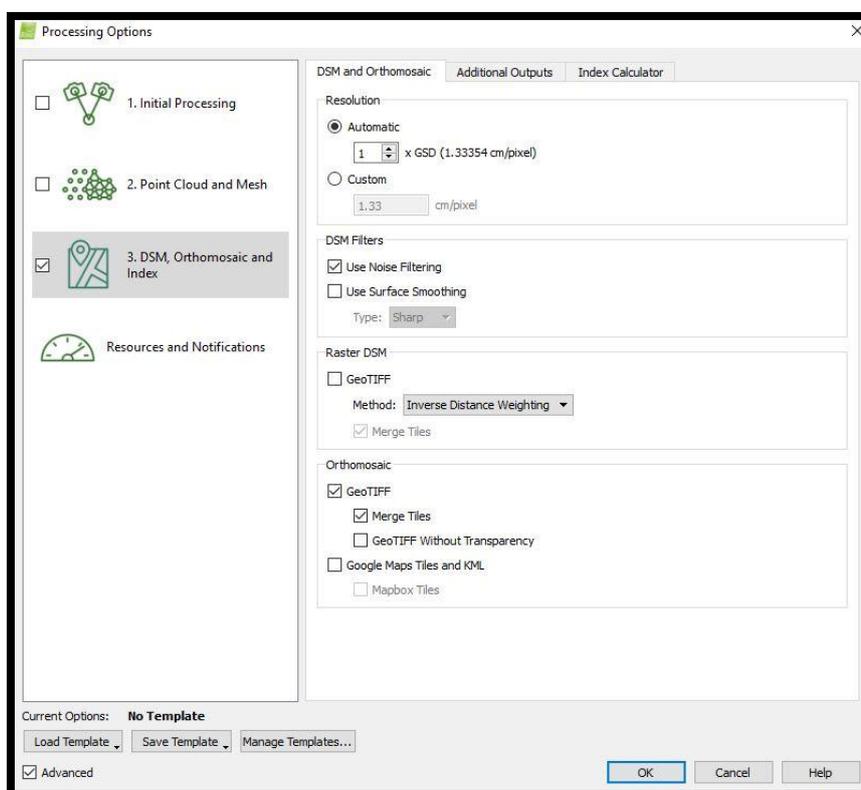
Type de vol	EMQ (composante E)	EMQ (composante N)	EMQ (composante h)
Avec bandes transversales	0,0154 m	0,0201 m	0,0270 m
Sans bande transversale	0,0164 m	0,0167 m	0,0303 m

Comme il est possible de constater dans le tableau ci-dessus, l'intérêt des bandes transversales n'apparaît pas clairement. Néanmoins, il aurait fallu utiliser un nombre de point de contrôle plus important pour avoir des résultats réellement interprétables. De plus le chantier en question n'est pas d'une très grande surface ce qui peut également réduire l'impact des bandes transversales sur le calcul photogrammétrique.

Annexe 8 : Paramètres adéquats pour la création d'orthophotographie sous Pix4D

Pour réaliser une orthophotographie sous le logiciel Pix4D, plusieurs paramètres sont accessibles. Afin de réaliser une orthophotographie permettant une délimitation virtuelle les paramètres suivants sont préconisés :

- La résolution à choisir est la plus petite. Ceci permet d'avoir plus de détails et donc de mieux représenter la scène. De plus, une plus petite résolution peut permettre d'obtenir une meilleure précision. Le choix « Automatic » de Pix4D correspond à la résolution la plus petite.
- Pix4D propose plusieurs types de filtre pour réaliser le MNT (ou DSM) servant de support à la création de l'orthophotographie. Il est préférable d'utiliser un filtre anti bruit « Use Noise Filtering » pour supprimer les points aberrants. Ensuite, il est possible d'utiliser un filtre permettant de lisser la surface du nuage de points « Use Surface Smoothing ». Ce filtre doit être utilisé avec précaution puisqu'il peut entraîner la perte de nombreuses informations topographiques et même entraîner des erreurs dans le MNT obtenu. Dans notre cas, il vaut mieux ne pas l'utiliser ou au maximum utiliser le niveau le moins fort : « Sharp » qui lisse uniquement les parties d'un nuage passant vraisemblablement par un même plan.
- Ensuite, Pix4D propose la création d'un MNT raster : « Raster DSM », cette étape n'est pas nécessaire pour la création de l'orthophotographie. Il ne faut donc pas la réaliser.
- Enfin, Pix4D permet la création de l'orthophotographie dans la partie « Orthomosaic ». Afin d'obtenir une mosaïque dans le système de coordonnées des points d'appui il faut sélectionner « GeoTIFF ». Pour finir, l'option de création « Merge Tiles » permet de créer la mosaïque d'orthophotographie. Il faut donc choisir cette option afin de pouvoir travailler sur une même image. Voici une capture d'écran sous Pix4D résumant les paramètres à choisir pour réaliser la mosaïque d'orthophotographie :



Annexe 9 : Calibration géométrique d'un appareil photo numérique via Pix4D

Afin de constater si une calibration géométrique d'appareil photo numérique peut être réalisée sous Pix4D de façon « manuelle », un essai a été mis en place. Rappelons que cette calibration a pour objectif de déterminer les paramètres internes de l'appareil photo à savoir : les coordonnées du PPS (Point Principal de Symétrie), la distance focale (f) et les coefficients du polynôme de distorsion.

Pour réaliser cette opération, plusieurs traitements successifs sont réalisés sur une même campagne photogrammétrique. L'objectif est de parvenir aux paramètres internes optimisés en répétant itérativement l'initialisation sous Pix4D. Voici les paramètres internes de l'appareil photo à l'itération 0 :

PPS	X pps = 3000 pixel (demi longueur du capteur)
	Y pps = 2000 pixel (demi largeur du capteur)
Distance focale	f = 16 mm (distance focale à priori)
Coefficients du polynôme de distorsion	R1 = 0
	R2 = 0
	R3 = 0
	T1 = 0
	T2 = 0

Voici les paramètres internes de l'appareil photo après la première itération :

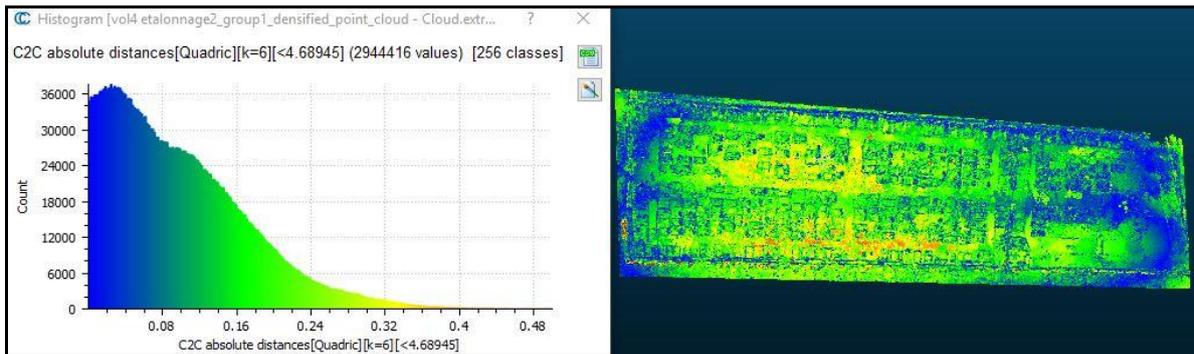
PPS	X pps = 3028,240 pixel	Delta ité0 / ité1 = -28, 240 pixel
	Y pps = 2003,442 pixel	Delta ité0 / ité1 = -3,442 pixel
Distance focale	f = 15,998 mm	Delta ité0 / ité1 = 0,002 mm
Coefficients du polynôme de distorsion	R1 = -0,079	Delta ité0 / ité1 = 0,079
	R2 = 0,118	Delta ité0 / ité1 = -0,118
	R3 = -0,021	Delta ité0 / ité1 = 0,021
	T1 = -0,001	Delta ité0 / ité1 = 0,001
	T2 = 0,001	Delta ité0 / ité1 = -0,001

Dès la première itération on remarque que les écarts sont tous inférieurs à 1%. On obtient ainsi les paramètres internes de l'appareil photo de façon approchée. Il faut noter que ces paramètres sont optimisés à chaque nouvelle initialisation, donc le fichier de calibration n'a pas besoin d'être très précis. En effet, un fichier de calibration très précis est sensé pouvoir permettre le géoréférencement direct. Cependant le matériel embarqué sur le drone Fox6, la centrale inertielle principalement, n'est pas assez précise pour effectuer une telle opération de manière efficace. Il est donc inutile d'avoir un fichier de calibration très précis aujourd'hui.

Lors du calcul sous Pix4D il est possible de fixer les paramètres internes de la caméra. Ce sont donc les paramètres externes qui sont optimisés. Afin d'évaluer l'impact de l'utilisation des paramètres internes non optimisés la comparaison entre cinq traitements est effectuées. Le premier est effectué avec le fichier de calibration de l'itération 0 et les paramètres internes sont fixés. Le second calcul est réalisé avec le fichier de calibration de l'itération 1 et les paramètres internes sont également fixés. Le troisième est effectué avec le fichier de calibration fourni par la société Hélicéo et les paramètres internes sont fixes. Enfin, les deux derniers traitements utilisent le fichier de calibration Hélicéo et itération 1 avec optimisation des paramètres internes (ils ne sont pas fixés). Voici les résultats obtenus sur 20 points de contrôle :

Type de fichier de calibration	EMQ (composante E)	EMQ (composante N)	EMQ (composante h)
Itération 0	0,0095 m	0,0217 m	0,1285 m
Itération 1	0,0055 m	0,0066 m	0,0278 m
Hélicéo	0,0062 m	0,0090 m	0,0209 m
Hélicéo optimisé	0,0045 m	0,0070 m	0,0227 m
Itération 1 optimisé	0,0051 m	0,0067 m	0,0227 m

On remarque que le principal impact de l'utilisation d'un fichier de calibration grossier sans effectué d'optimisation concerne la composante altimétrique.



Ci-dessus, la comparaison entre le nuage de l'itération 0 et de l'itération 1 permet de mettre avant la nécessité d'effectuer une nouvelle optimisation des paramètres internes à chaque calcul. On remarque aussi, avec les deux dernières lignes du tableau ci-dessus, que l'utilisation d'un fichier de calibration approché et optimisé permet d'aboutir au même résultat que le traitement avec le fichier de calibration Hélicéo optimisé. Enfin, cette comparaison permet de mettre en exergue la précision nécessaire au fichier de calibration pour envisager de ne pas effectuer une optimisation des paramètres internes. En effet, il faut être certain de son fichier car une erreur apparemment faible peut lourdement impacter le résultat final.

En conclusion, il est tout à fait possible et simple de réaliser son fichier de calibration « approché » en utilisant Pix4D pour un appareil photo numérique.

Annexe 10 : Présentation du matériel photogrammétrique du cabinet HOUDRY

L'équipement photogrammétrique du cabinet Houdry se compose des éléments suivants :

Matériel		Caractéristiques
Vecteur : FOX6 Hélicéo		Récepteur GNSS (GPS et GLONASS), Centrale inertielle basique, Nacelle gyroscope sur deux axes, ...
Appareil photo numérique : Sony Alpha 6000		Capteur CMOS (23,5 x 15,6 mm) Nombre de mégapixel : 24 (6000 x 4000 pixels) Taille d'un côté de photosite : 3,9 µm Focale fixe : 16 mm Vitesse d'obturation minimum : 1/4000 s Temps minimum entre deux images : 0,6 s ISO : 100 - 25600
Logiciel de photogrammétrie : Pix4D		Calcul de nuage de points 3D, Réalisation d'orthophotographie, Réalisation de mosaïque, ...
Cibles de géoréférencement		Cible bois 50 x 50 cm noir et jaune, Cible peinte à la bombe de peinture

Il est également possible de spécifier les conditions de vol habituellement rencontrées :

- Hauteur de vol : 70 m,
- Recouvrements : longitudinal 80%, transversal 60%,
- Vitesse de vol maximale : 10 m/s.

**« Étude de la valeur juridique des images de télédétection.
Application à la délimitation virtuelle »**

Mémoire d'ingénieur CNAM – ESGT, Le Mans 2016. Par André GOUYER.

Synthèse

Depuis l'avènement de l'ère du numérique dans les années 2000, les images prennent une part de plus en plus importante dans notre quotidien. Si l'image nous semble familière, elle possède cependant de nombreux atouts peu exploités notamment dans le domaine de la mesure ainsi que dans le domaine juridique.

Concernant les images de télédétection, il est possible de se poser plusieurs questions. Premièrement, quelle est leur valeur juridique ? Mais aussi, quelles sont les principales utilisations de l'image de télédétection comme outil de délimitation ? Ces deux questions conduisent à s'interroger sur la délimitation virtuelle puis à valider différents essais de délimitations via l'orthophotographie. Ensuite, il semble intéressant d'imaginer quelles seraient les conséquences de l'évolution de la place de l'image dans la hiérarchie des modes preuve. Après avoir identifié la place actuelle de l'image dans cette hiérarchie, les éventuelles conséquences de cette évolution sont imaginées, notamment sur la procédure du bornage amiable et sur la profession du géomètre-expert en France.

Mots clefs : Image, délimitation, virtuelle, télédétection, preuve, mode de preuve, photogrammétrie, bornage.

**« Study of the remote-sensing images legal value.
Application to the virtual delimitation »**

Engineer dissertation CNAM – ESGT, Le Mans 2016. By André GOUYER.

Abstract

Since the emergence of the digital era in the early 2000s, images are taking an increasing part of our daily lives. The image seems familiar to us but it possesses many benefits insufficiently exploited in particular for the measurement domain and the for the legal area.

Concerning the remote-sensing images, several questions are possible. Primarily, what is the legal value of those ? But also, what are the main uses of remote-sensing images as delimitation tool ? These two points, raise questions about the virtual delimitation and confirm various delimitation tests based on the orthophotography. Then, it seems interesting to imagine the consequences of the evolution of the image place in the hierarchy mode of proof. After having determined the current position in this hierarchy, the potential consequences of this evolution are imagined, in particular to the boundaries procedure and for the chartered land surveyor job in France.

Keywords : Image, delimitation, virtual, remote sensing, proof, mode of proof, photogrammetry, boundaries.