

Photo-interprétation appliquée à la recherche d'indices de cavités souterraines

ORSI PRECAS 11R124 – Axe 3



*Fermeture d'un puits d'aération d'une ancienne carrière souterraine,
Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2012*

Historique des versions des documents

Version	Date	Commentaire
V0	22/12/14	Rédaction initiale
VF	20/08/15	Prise en compte remarques relecteurs

Affaire suivie par :

- Nathalie BÉRENGER – Cerema / Direction territoriale Ouest
DLRC Angers – Groupe Environnement / Risques / Géotechnique
nathalie.berenger@cerema.fr – Tél : 02 41 79 13 37

Rédacteur :

- Nathalie BÉRENGER – Cerema / Direction territoriale Ouest
DLRC Angers – Groupe Environnement / Risques / Géotechnique
nathalie.berenger@cerema.fr – Tél : 02 41 79 13 37

Validation :

Date	Nom du valideur	Commentaire
06/01/15	Nicolas FLOUEST - Cerema DTerSO	Remarques transmises au rédacteur
20/18/15	Sébastien HERVÉ - Cerema DTerOuest	Remarques transmises au rédacteur

Mots-clés : cavités souterraines – indices – photo-interprétation – photographies aériennes – Maine-et-Loire – Sarthe

Résumé

Dans le cadre du sujet 3 de l'opération de recherche Prévention des risques d'effondrement des cavités souterraines (Precas), la direction territoriale Ouest (DTERouest) du Cerema, Département laboratoire et CECP d'Angers a proposé de travailler, en partenariat avec le Pôle de compétences et innovation (PCI) « Applications satellitaires et télécommunications » du Cerema, direction territoriale Sud-Ouest, sur les potentialités des images satellitaires pour la recherche et la localisation d'indices de présence de cavités souterraines.

Le présent rapport rend compte de l'état de l'art actuel de la photo-interprétation d'images aériennes verticales pour la recherche et la localisation de ces indices.

À partir de deux études de cas réalisées sur des territoires communaux de la région Pays de la Loire (Saint-Cyr-en-Bourg, 49 et Thoiré-sur-Dinan, 72), cette étude montre que la photo-interprétation est une technique pertinente pour la recherche d'indices de cavités souterraines.

Pour obtenir les meilleurs résultats possibles, la photo-interprétation doit faire l'objet d'une préparation soignée en amont, pour bien connaître le contexte territorial ainsi que la typologie des cavités recherchées.

Cette préparation permet de choisir les photographies aériennes adaptées ainsi que les modes d'exploitation susceptibles d'être les plus efficaces. Dans la majorité des cas, les meilleurs résultats seront atteints par :

- une analyse stéréoscopique,
- une analyse multi-dates,
- une analyse de missions à grande échelle,
- l'utilisation d'images noir et blanc (panchromatique et infrarouge proche).

Il est à noter toutefois un certain nombre de limites, inhérentes aux photographies aériennes, aux indices recherchés ou au photo-interprète, dont les principales sont :

- nombreux objets correspondant à des leurres non liés à des cavités souterraines (en lien avec l'occupation du sol, notamment agricole),
- zones masquées (forêts, zones urbaines...),
- indices visibles à certaines dates et invisibles à d'autres,
- erreurs métriques à plurimétriques sur la position réelle des objets,
- rendement qualitatif et quantitatif très dépendant de la compétence du photo-interprète.

Préambule

Dans le cadre de l'opération de recherche Precas du programme de recherche et développement de l'Institut français des sciences et technologies des transports de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), la direction territoriale Ouest (DTERouest) du Cerema, Département laboratoire et CECIP d'Angers, participe au sujet 3, intitulé « Localisation des cavités par méthodes autres que géophysiques », piloté par le Cerema, direction territoriale Méditerranée.

La DTERouest a proposé de travailler, en partenariat avec le PCI « Applications satellitaires et télécommunications » du Cerema, direction territoriale Sud-Ouest, sur les potentialités des images satellitaires pour la recherche et la localisation d'indices de présence de cavités souterraines.

Dans le cadre de cet axe de travail, il est prévu de comparer les apports de l'imagerie aérienne classique (photo-interprétation d'images aériennes verticales prises à partir de vecteurs aéroportés « classiques » de type avion) à ceux de l'imagerie satellitaire, s'il s'avère que celles-ci sont susceptibles de donner des informations utiles et exploitables.

Le présent rapport rend compte de l'état de l'art actuel de la photo-interprétation d'images aériennes verticales pour la recherche et la localisation d'indices de cavités souterraines.

Ce travail sera ensuite utilisé pour définir, dans le cadre de l'utilisation d'images satellitaires :

- quelles images utiliser (résolution spatiale, longueurs d'ondes, stéréoscopie...),
- quels types de traitement mettre en œuvre sur ces images (automatiques, semi-automatiques, manuels),
- quels résultats sont obtenus en termes de qualification et de repérage d'indices de cavités souterraines.

Une analyse comparative des deux méthodes sera ensuite menée afin de mettre en évidence les avantages et inconvénients de chacune. Cette analyse doit aboutir à la rédaction de recommandations (guide ou note méthodologique) sur l'utilisation des images aériennes et satellitaires pour la recherche et la localisation de cavités souterraines.

Sommaire

Introduction.....	5
1 - La télédétection appliquée à la recherche de cavités souterraines.....	7
1.1 - Principes de la télédétection.....	7
1.2 - L'apport de la photo-interprétation d'images aériennes pour la recherche de cavités souterraines.....	11
2 - Études de cas.....	17
2.1 - Présentation des sites.....	17
2.2 - Typologie des cavités recherchées.....	19
2.3 - Typologie des formes de surface associées aux cavités souterraines.....	24
2.4 - L'investigation de photo-interprétation.....	25
3 - Apports et limites de la photo-interprétation.....	43
3.1 - Les types d'indices identifiables.....	43
3.2 - Les caractéristiques des images aériennes et les modes d'exploitation recommandés.....	44
3.3 - Les limites de la photo-interprétation.....	46
4 - Conclusion.....	49
5 - Bibliographie.....	51
Annexes.....	53
Annexe 1 : extrait de la photo-interprétation réalisée sur Thoiré-sur-Dinan – objets non liés à des cavités souterraines.....	55
Annexe 2 : extrait de la photo-interprétation réalisée sur Saint-Cyr-en-Bourg – objets potentiellement liés à des cavités souterraines.....	57

Introduction

Afin de réaliser le travail de recherche sur les images satellitaires, il est nécessaire dans un premier temps de qualifier le type d'indices visibles et interprétables en termes de cavités souterraines par photo-interprétation d'images aériennes verticales.

La photo-interprétation constitue l'une des étapes finales de la télédétection, dont les principes sont rappelés en section 1 de ce rapport. Est présenté également l'intérêt d'étudier des images aériennes dans le cadre de la recherche et la localisation de cavités souterraines.

Le Cerema pratique depuis plusieurs décennies la photo-interprétation d'images aériennes (verticales ou obliques) pour rechercher des indices de la présence de cavités souterraines sur un territoire donné. Il s'agit d'une investigation à part entière des études préalables (cartes informatives des événements, cartes d'aléas) réalisées dans le cadre des Plans de prévention des risques naturels (PPRN) mouvements de terrain (dont font partie les cavités). Lorsqu'une collectivité réalise la cartographie des cavités présentes sur son territoire, cette investigation est très souvent pratiquée également. Ainsi, les résultats présentés dans ce rapport s'appuient sur deux études de cas locales, réalisées dans deux contextes géomorphologiques sensiblement différents :

- contexte de **plateau** (commune de Thoiré-sur-Dinan dans la Sarthe),
- contexte de **versant sous-cavé** (commune de Saint-Cyr-en-Bourg dans le Maine-et-Loire).

La section 2 de ce rapport présente pour chacun des deux sites d'études, la typologie des cavités qui y sont rencontrées et les résultats de la photo-interprétation réalisée.

À partir de ces deux études de cas, sont définis en section 3 quels types d'indices peuvent être mis en évidence par la photo-interprétation d'images aériennes ainsi que les limites de cette technique. Ce sont ces types d'indices qui devront être recherchés sur les images satellitaires, en utilisant des traitements ou en réalisant l'interprétation de ces images.

1 - La télédétection appliquée à la recherche de cavités souterraines

1.1 - Principes de la télédétection

La télédétection est une technique qui permet d'obtenir de l'information sur la Terre sans contact direct avec celle-ci. Cette technique englobe plusieurs processus qui se succèdent :

- 1 **captage et enregistrement de l'énergie d'un rayonnement électro-magnétique** émis ou réfléchi par une cible (la Terre en l'occurrence),
- 2 **traitement et analyse** de l'information,
- 3 **mise en application** de cette information.

Une source d'énergie est donc nécessaire pour initier le processus : le soleil est l'une des principales sources, la Terre elle-même peut en être une pour certaines longueurs d'onde.

La télédétection utilise les propriétés du rayonnement électro-magnétique, seul rayonnement à pouvoir se déplacer dans le vide et, en fonction de sa longueur d'onde, dans la matière. Caractérisé par une longueur d'onde et une fréquence, ce rayonnement se déplace à la vitesse de la lumière. Le spectre électromagnétique (illustration 1.1) s'étend des plus courtes longueurs d'onde (rayons gamma, rayons X) aux plus grandes (micro-ondes, ondes radio).

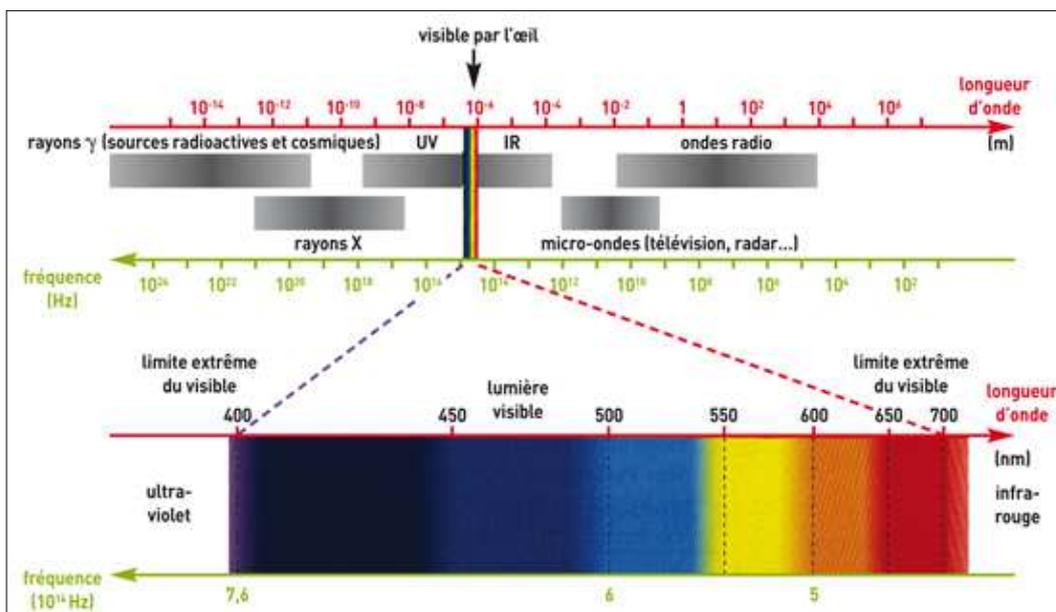


Illustration 1.1 : Spectre électromagnétique [educonline.net, site consulté le 17/12/2014]

En raison d'interactions entre les rayonnements et l'atmosphère, seules certaines longueurs d'ondes, peu influencées par l'absorption atmosphérique, seront pleinement utiles pour la télédétection. Ces régions du spectre, appelées fenêtres atmosphériques sont :

- le **rayonnement visible**, seule partie du spectre associée à des couleurs et que nous pouvons directement déceler par la vue,
- le **rayonnement infrarouge émis** (infrarouge thermique, qui correspond à la chaleur émise par la surface de la Terre),
- le **rayonnement hyperfréquences**, pour les longueurs d'onde supérieures à 1 millimètre.

D'autres rayonnements, plus influencés par leurs interactions avec l'atmosphère, peuvent être toutefois utilisés en télédétection, avec de moins bons résultats : l'ultraviolet, le rayonnement infra-rouge réfléchi (le plus proche du visible), les hyperfréquences en dessous de 1 millimètre.

L'illustration 1.2 montre l'influence de l'atmosphère sur chacun des domaines de rayonnement.

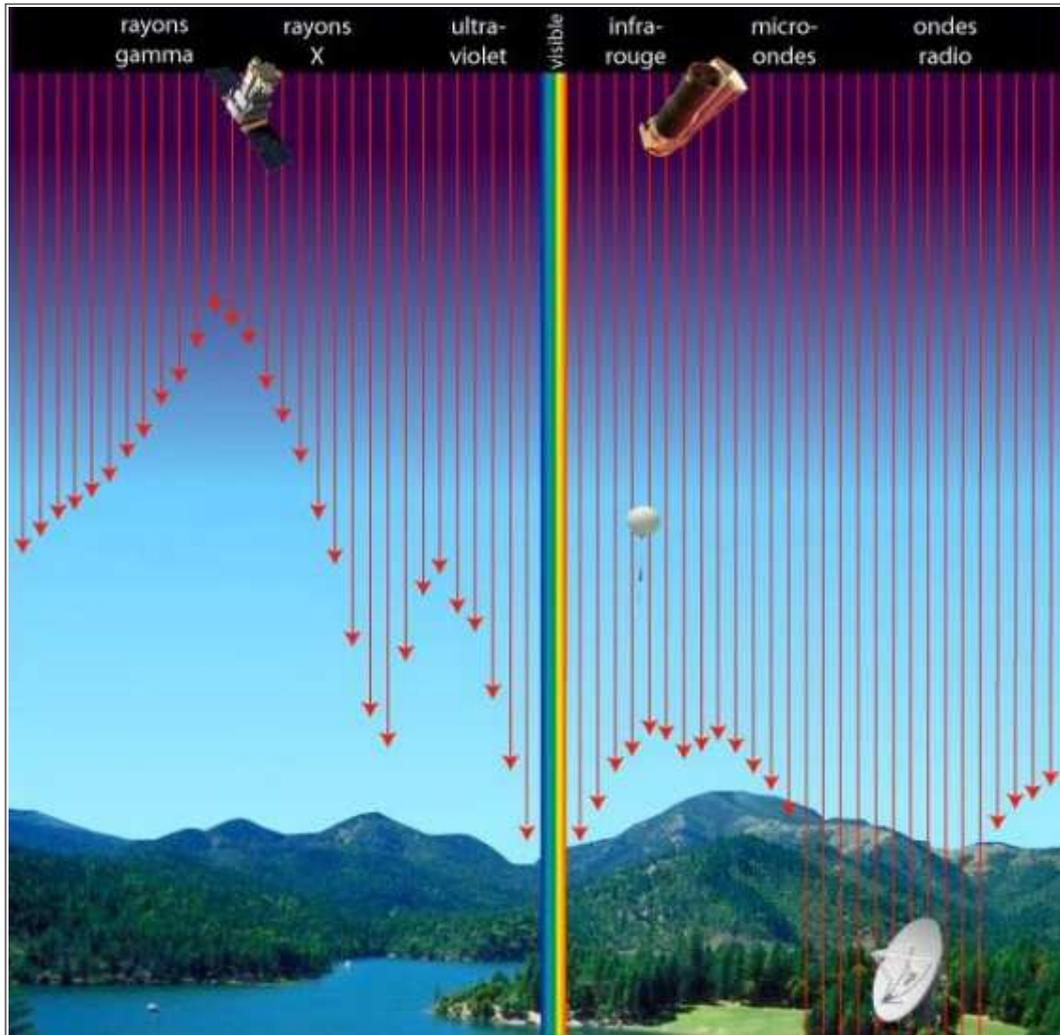


Illustration 1.2 : Traversée de l'atmosphère par les différents domaines de rayonnement [educonline.net, site consulté le 17/12/2014]

En fonction de la source d'émission, on pourra détecter différents types de réponses (illustration 1.3) :

- une **réflexion** par la cible d'un rayonnement émis par la source d'énergie (soleil ou source type radar),
- une **émission** d'un rayonnement émanant de la cible elle-même (par exemple, émission de chaleur par la Terre).

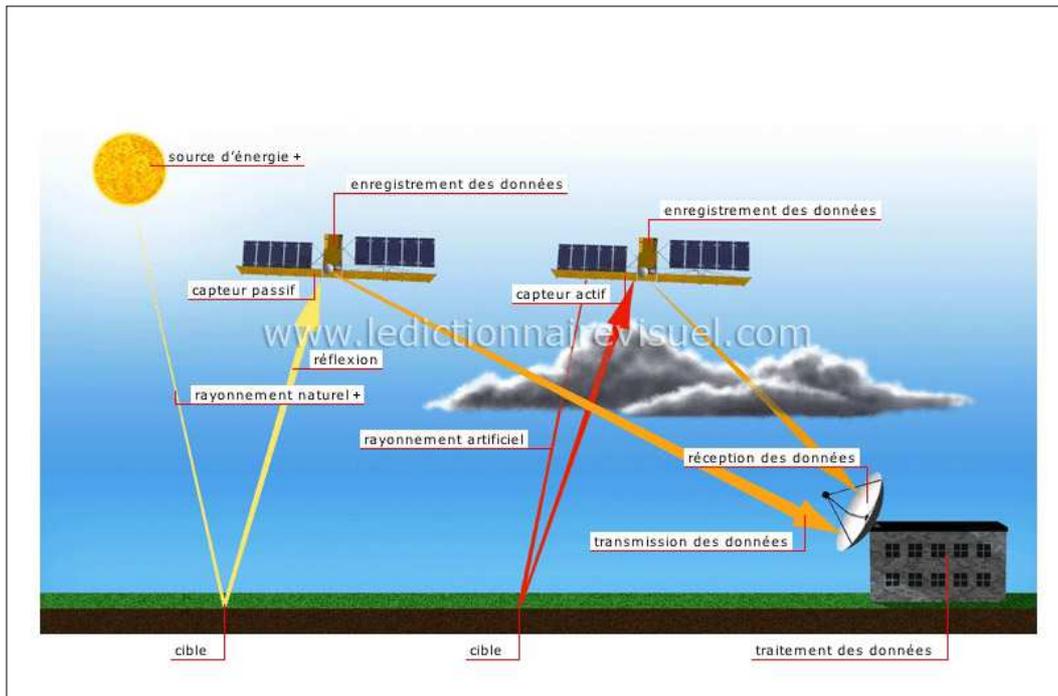


Illustration 1.3 : Les différents types de détection [ledictionnairevisuel.com, site consulté le 18/12/2014]

Les objets observés sur la Terre pourront être discriminés grâce à leur réponse spécifique aux différentes longueurs d’ondes. Cette propriété, appelée **signature spectrale**, permet par exemple de différencier l’eau et la végétation, qui donnent dans certaines conditions une réponse très proche dans les longueurs d’onde du visible ; en revanche, ces deux objets ont une signature bien différenciée dans les longueurs d’onde du proche infrarouge, quelles que soient les conditions d’observation.

1.1.1 - Les capteurs

Pour recevoir le rayonnement et l’enregistrer, des capteurs, situés à distance de la cible, sont nécessaires. Ces appareils sont caractérisés par leurs résolutions :

- **résolution spatiale** : plus petit objet que le capteur est capable de détecter, ce qui va conditionner l’échelle à laquelle l’image sera exploitable ;
- **résolution spectrale** : capacité qu’a le capteur à utiliser des petites fenêtres de longueur d’ondes, lui permettant de mieux discriminer certains objets ;
- **résolution radiométrique** : capacité du capteur à reconnaître des petites différences dans l’intensité de l’énergie reçue, lui permettant de « voir » plus de détails ;
- **résolution temporelle** : fréquence du retour de l’observation d’une même zone par le capteur, ce qui conditionne la qualité du suivi de l’évolution de cette zone.

Les capteurs les plus connus et les plus utilisés pour la recherche d’indices liés aux cavités souterraines sont les **chambres photographiques**, qui produisent des images analogiques couleur ou noir et blanc, dans les longueurs d’onde du visible ou de l’infrarouge proche. Les traitements, après avoir été exclusivement optiques (donnant les photographies aériennes classiques) sont aujourd’hui numériques, mais le rendu est toujours une image analogique, ne permettant pas des traitements des données.

Les autres capteurs existants sont :

- les **radiomètres multispectraux** : embarqués dans les satellites, qui peuvent capter dans beaucoup plus de longueurs d’onde que les chambres photographiques et qui ont une meilleure résolution spectrale ;

- les **capteurs dans l'infrarouge thermique** : spécifiques pour enregistrer le rayonnement infrarouge lointain (la chaleur) de la Terre ;
- les **radars** : ces systèmes actifs (ils émettent l'énergie et enregistrent le signal revenant de la cible) donnent des images délicates à interpréter mais possèdent certains avantages, notamment celui de pouvoir détecter 24 heures sur 24, quelle que soit la couverture nuageuse.

1.1.2 - Les vecteurs

Les vecteurs sont les porteurs dans lesquels sont embarqués les capteurs, des plus éloignés de la Terre (satellites) aux plus proches (échelles, ballons captifs...), en passant par les intermédiaires (avions, hélicoptères, ULM...).

En fonction du capteur et de ses caractéristiques, les axes de prise de vue pourront varier, conduisant à des rendus et des modes d'analyse des images différents :

- **axe vertical**, permettant des prises de vues :
 - simples : lors de l'interprétation, les images sont regardées en deux dimensions ;
 - avec recouvrement (illustration 1.4) : lors de l'interprétation, les images peuvent être regardées en trois dimensions, en utilisant un stéréoscope ;
- **axe oblique**, permettant des prises de vues simples.

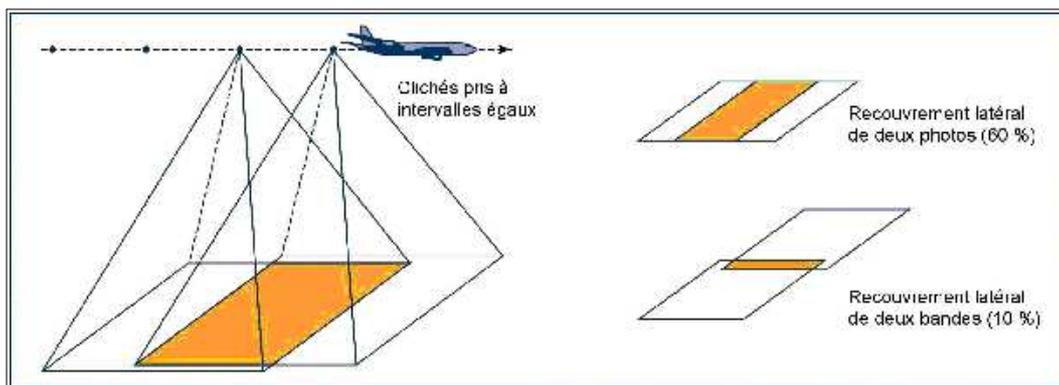


Illustration 1.4 : Technique de prises de vues stéréoscopiques [LCPC, 1999]

Pour la recherche d'indices de cavités souterraines, les vecteurs les plus utilisés jusqu'à aujourd'hui sont les **avions et hélicoptères**, avec des **prises de vues verticales et obliques**, chacune ayant ses avantages et ses inconvénients.

1.1.3 - L'analyse des images

Le but de cette analyse est d'**interpréter les objets** mis en évidence par l'enregistrement du rayonnement électro-magnétique.

Cette analyse peut être **visuelle** : c'est l'interprétation réalisée par un **thématicien** de la problématique étudiée. Le thématique s'attachera à **reconnaître les objets**, en prenant en compte leurs caractéristiques visuelles :

- **leur ton**, qui se réfère à la couleur de l'objet dans l'image,
- **leur forme**, qui se réfère à l'allure générale, la structure ou le contour de l'objet,
- **leur taille**, à rapporter à l'échelle de l'image,
- **leur relief**, qui donnera des indications sur leur hauteur ou leur profondeur.

Le thématique s'attachera également à **repérer des caractéristiques d'ensemble**, telles que :

- **le patron**, qui se réfère à l'agencement spatial des objets,
- **la texture**, qui se réfère à des variations de ton dans l'image,
- **les ombres**, qui donnent une idée du profil et de la hauteur des objets,
- **l'association d'objets**, qui permet d'identifier des éléments par rapport à des objets reconnaissables à proximité.

L'analyse peut être également **automatique ou semi-automatique**, lorsque des traitements informatiques sont mis en œuvre sur les données sources, selon divers procédés : formatage et correction des données, rehaussement numérique pour aider l'analyse visuelle, classification automatique des objets... Ces traitements numériques concernent exclusivement les images satellites.

Il est important de rappeler que les traitements automatisés doivent être calibrés par des analyses visuelles contrôlées sur le terrain.

1.2 - L'apport de la photo-interprétation d'images aériennes pour la recherche de cavités souterraines

S'agissant d'un état de l'art de la photo-interprétation appliquée à la recherche d'indices de cavités souterraines, la suite du rapport ne traitera que des images classiquement utilisées pour cette analyse : **photographies aériennes** (issues de chambres photographiques) prises à partir des vecteurs historiquement utilisés pour les prises de vues aériennes (**avions, hélicoptères, ULM**).

1.2.1 - Les cavités souterraines et leurs formes de surface associées

Les cavités souterraines sont différenciées par leur origine, anthropique (creusées par l'homme) ou naturelle (creusées par l'eau dans leur immense majorité).

Les cavités anthropiques

L'homme a de tout temps creusé le sous-sol pour divers usages, dont les plus courants sont **l'extraction de matériaux, l'habitat, le stockage et l'abri des personnes**.

Si les plus anciennes exploitations souterraines datent de la préhistoire, l'activité extractive s'est considérablement développée à partir du Moyen Âge et est restée importante jusqu'à la fin du ^{XIX}^e siècle, en lien avec l'urbanisation progressive du territoire.

Aujourd'hui, les extractions de matériaux en souterrain sont relativement rares, la plupart des anciennes carrières sont abandonnées, quelques-unes sont réutilisées pour l'agriculture, le tourisme ou le stockage.

Si plusieurs facteurs conditionnent l'existence de ces cavités, le principal d'entre eux est un **contexte géologique favorable**, c'est-à-dire la présence à faible ou moyenne profondeur (jusqu'à quelques dizaines de mètres généralement) d'un matériau utile et extractible. Cette prédisposition géologique explique la répartition spatiale des cavités anthropiques en France, qui concernent plus particulièrement certaines régions :

- **le Bassin parisien et sa périphérie** : substratum calcaire, gypseux, sableux ou argileux ;
- **le Bassin aquitain et sa périphérie** : substratum calcaire ;
- **régions Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Languedoc-Roussillon** : substratum calcaire ou gypseux ;
- **régions Rhône-Alpes et Franche-Comté** : substratum calcaire.

En lien avec les caractéristiques des formations géologiques exploitées, leur profondeur, le contexte morphologique, les usages de la cavité, différents types de cavités et d'accès à celles-ci sont rencontrés.

Les accès peuvent être **horizontaux**, lorsque la formation à exploiter est peu profonde ou si la topographie le permet : entrées en cavage, descenderies... (illustrations 1.5 et 1.6). En plateau, les accès se font par des **puits plus ou moins larges** (illustration 1.7). Dans certaines régions (par exemple en Touraine ou en Anjou), les deux modes d'accès cohabitent.



Illustration 1.5 : Entrée en cavage sur versant rocheux, Thoiré-sur-Dinan (72), 2009



Illustration 1.6 : Descenderie, Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2013



Illustration 1.7 : Puits d'accès à une extraction souterraine, Thoiré-sur-Dinan (72), 2009

Les modes d'extraction des cavités diffèrent également, en fonction notamment de la taille de la cavité, de son usage et également de l'époque de l'exploitation : **extractions artisanales** (puits et chambre par exemple, illustration 1.8) ou **plus élaborées**, comme celles utilisant la technique des chambres et piliers tournés (illustration 1.9).



Illustration 1.8 : Chambre souterraine artisanale, Thoiré-sur-Dinan (72), 2009



Illustration 1.9 : Chambres et galeries d'une carrière exploitée industriellement selon la méthode des chambres et piliers, Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2012

Les caractéristiques géométriques (largeur, hauteur, extension, volume) des cavités anthropiques vont principalement dépendre de facteurs géologiques, tels que l'épaisseur de la formation exploitable, la qualité du toit de la future cavité, la profondeur de la nappe phréatique ; le mode d'extraction mis en œuvre va également avoir une influence sur ces caractéristiques. Il est donc impossible de définir des caractéristiques géométriques moyennes sur le territoire métropolitain, tout au plus peut-on donner des ordres de grandeur (tableau 1.1).

CARACTERISTIQUE	DIMENSION
Profondeur	De 5 à 50 m, exceptionnellement 70 m
Hauteur	De 2 à 15-20 m
Largeur	De 3 à 15 m
Surface	De quelques m ² à plusieurs dizaines d'hectares

Tableau 1.1 : Ordres de grandeur des caractéristiques géométriques des cavités anthropiques hors mines [LCPC – 2002]

À noter que certaines cavités atypiques n'entrent pas dans ces ordres de grandeur : par exemple, les cavités d'origine minière peuvent descendre beaucoup plus profondément (jusqu'à plus de 1 000 m), tandis que les sapes de guerre, très présentes dans le nord et l'est de la France, peuvent se développer à moins de 5 m de profondeur.

Les cavités naturelles

Les cavités naturelles se forment principalement par **dissolution de roches sédimentaires**. L'eau est l'agent à l'origine de leur dissolution, par infiltration et circulation dans les discontinuités (fissures, fractures, interfaces entre couches, etc.) préexistantes de la roche.

Dans les **roches carbonatées** (calcaire et craie pour les plus courantes), la dissolution du carbonate de calcium par les eaux conduit lentement, en quelques milliers d'années à quelques dizaines de milliers d'années, à la formation d'un réseau de cavités (**réseau karstique**) se développant dans les trois dimensions. En fonction de différents facteurs (nature de la roche, fracturations préexistantes, caractéristiques physico-chimiques de l'eau, temps de contact entre l'eau et la roche, etc.), différentes formes peuvent se présenter (illustration 1.10) :

- en **souterrain**, se développent des **cavités plus ou moins grandes** reliées entre elles par des galeries et des boyaux de tailles diverses ; en fonction des fluctuations saisonnières du niveau de l'eau souterraine et des apports des eaux de surface, les cavités sont vides, en eau ou plus ou moins comblées de matériaux. Ces formes souterraines sont reliées à la surface, soit lorsque la topographie le permet (résurgences à flanc de versant telles que les grottes), soit grâce à l'existence de conduits verticaux, issus d'effondrements des cavités ou liés à l'infiltration des eaux de surface.
- en **surface**, sont rencontrées les **zones d'infiltration des eaux de surface**, par lesquelles les eaux météoriques rejoindront le réseau profond.

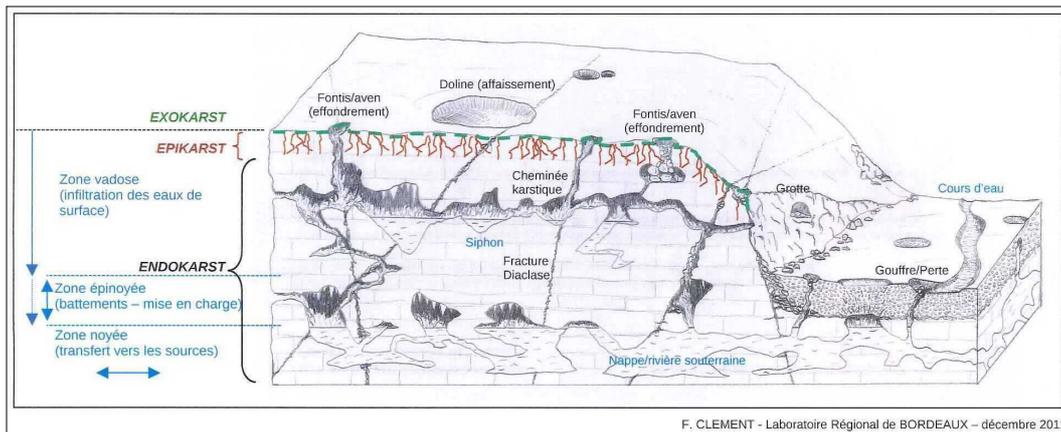


Illustration 1.10 : Système et modelé karstique en formation calcaire [Cerema DTerSO, 2011]

Dans les **roches évaporitiques**, représentées principalement en France par les roches gypseuses et salines, des réseaux de grandes cavités peuvent également se développer, beaucoup plus rapidement que dans les calcaires (parfois en quelques dizaines d'années) en raison d'une solubilité plus importante.

La répartition spatiale des cavités naturelles est directement liée à la présence en sous-sol de matériaux solubles. Ainsi, c'est dans les régions à substratum calcaire, crayeux ou gypseux, déjà potentiellement concernées par le creusement anthropique de cavités, qu'on peut rencontrer ces réseaux de cavités naturelles.

Les désordres associés aux cavités souterraines

Les cavités évoluent avec le temps et leur **dégradation est inéluctable**. À terme, des événements se produisent, à **l'intérieur de la cavité** (chutes de pierres, de blocs), ou à **l'extérieur** (désordres de terrain à l'aplomb des cavités, dégradation de bâtiments, etc.), quelle que soit l'origine des cavités.

Dans un premier temps, les cavités subissent un processus de dégradation interne. Différents **facteurs aggravants, intrinsèques** (lithologie de l'encaissant, discontinuités du matériau, géométrie de la cavité...) ou **externes** (eau, végétation, action de l'homme...) vont ensuite jouer un rôle dans leur évolution, représentée dans leur stade ultime par **leur ruine**, qui pourra dans certains cas se manifester en surface.

Ces conséquences en surface seront de plus ou moins grande ampleur et surviendront plus ou moins brutalement : **affaissements** ponctuels ou de grandes dimensions (illustrations 1.11 et 1.12), **effondrements** localisés (petits fontis, débouchages de puits remblayés...) ou généralisés (illustration 1.13 à 1.15).



Illustration 1.11 : Affaissement ponctuel, Sarcé (72), 2010



Illustration 1.12 : Affaissement de grandes dimensions, Meigné (49), 2010



Illustration 1.13 : Fontis, Vernantes (49), 2013



Illustration 1.14 : Tassement du remblai d'un puits d'accès à une carrière souterraine, Thoiré-sur-Dinan (72), 2009



Illustration 1.15 : Effondrement généralisé d'une cavité naturelle gypseuse, La Clappe (83) [Cerema DTer Méditerranée, 2010]

Les zones d'infiltration des eaux de surface en relation avec les réseaux karstiques constituent également des désordres de formes et tailles très diverses, du **point d'infiltration** de taille centimétrique à métrique jusqu'aux **dépressions et effondrements** pouvant atteindre plusieurs mètres (illustrations 1.16 et 1.17) à plusieurs dizaines de mètres de diamètre et de profondeur.



Illustration 1.16 : Point d'infiltration naturel des eaux de surface, Graimbouville (76) [Cerema DTerNC, 2003]



Illustration 1.17 : Effondrement lié à l'infiltration des eaux de surface, Graimbouville (76), [Cerema DTerNC, 2003]

1.2.2 - Les objets identifiables sur les images aériennes

Plusieurs types d'objets associés à la présence de cavités souterraines peuvent être recherchés sur des images aériennes :

- les objets liés à des **structures géologiques** propices au développement de réseaux karstiques ou à l'effondrement de cavités : alignement et intersection de discontinuités (failles, fractures), alignement de désordres de surface ;
- les objets indiquant un **contexte géomorphologique** propice à la présence de cavités : versant rocheux suffisamment pentu (pour les entrées en cavage), talwegs secs (zones d'infiltration des eaux de surface vers les réseaux karstiques) ;
- les objets liés à la **présence** (ancienne ou actuelle) de cavités : entrées à flanc de coteau, puits d'extraction, cheminées d'aération, chemins permettant l'accès aux entrées, dépôts des matériaux extraits, bâtiments utiles à l'extraction (fours à chaux, chevalements...), gouffres et cheminées karstiques ;
- les objets liés à l'**effondrement** de cavités : affaissements, dépressions, effondrements ;
- les objets liés aux moyens mis en œuvre par les hommes pour **se prémunir des conséquences** en surface : protections mises en place autour d'un désordre ou d'un accès (bosquet, végétation...), remblais de comblement de désordres ou d'accès.

2 - Études de cas

2.1 - Présentation des sites

Les deux sites tests sont localisés en **région Pays de la Loire** (illustration 2.1), l'un dans le département du **Maine-et-Loire** (commune de **Saint-Cyr-en-Bourg**, illustration 2.2), l'autre dans le département de la **Sarthe** (commune de **Thoiré-sur-Dinan**, illustration 2.3).

Ces deux sites font tous les deux l'objet d'un recensement des indices de cavités souterraines mené par le Cerema DTerOuest, en cours de réalisation pour Saint-Cyr-en-Bourg et terminé (2009) pour Thoiré-sur-Dinan.

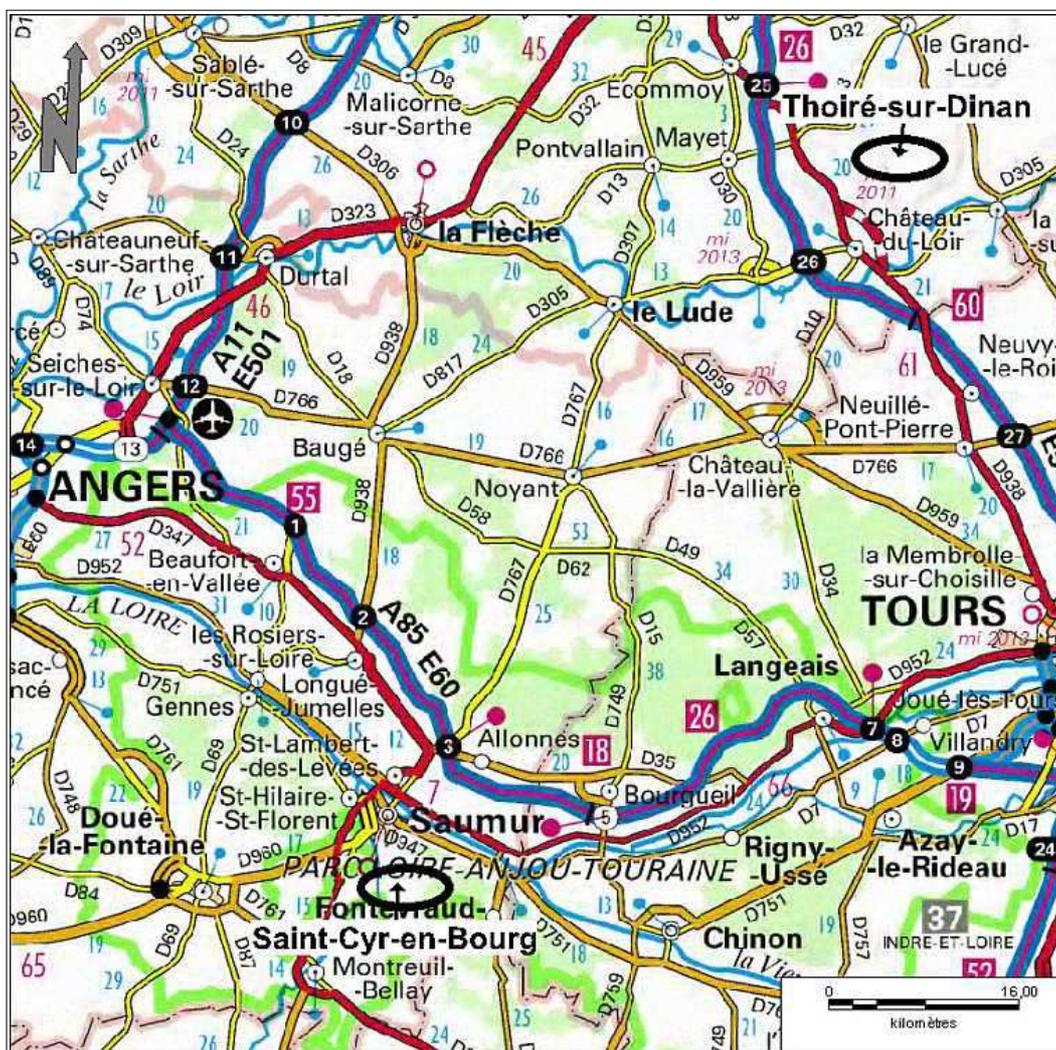


Illustration 2.1 : Localisation des sites d'études [support SCAN 1000®v2 IGN]

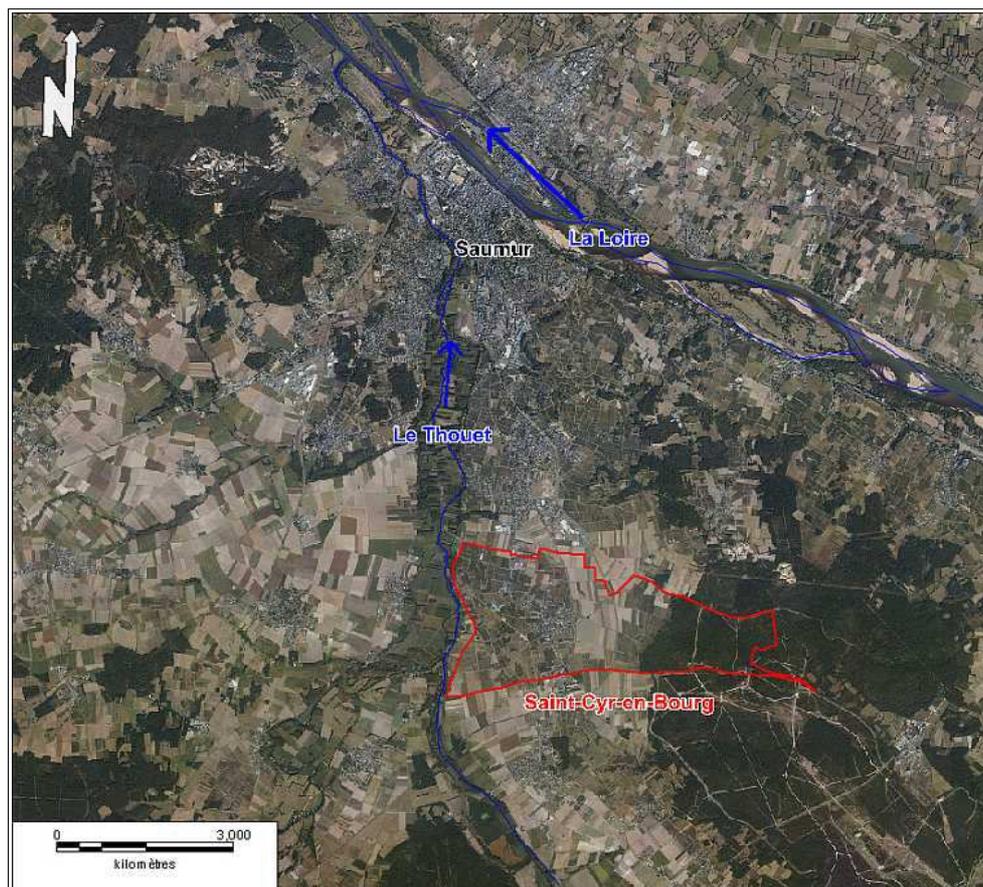


Illustration 2.2 : Localisation Saint-Cyr-en-Bourg [support BD ORTHO®v2 IGN]

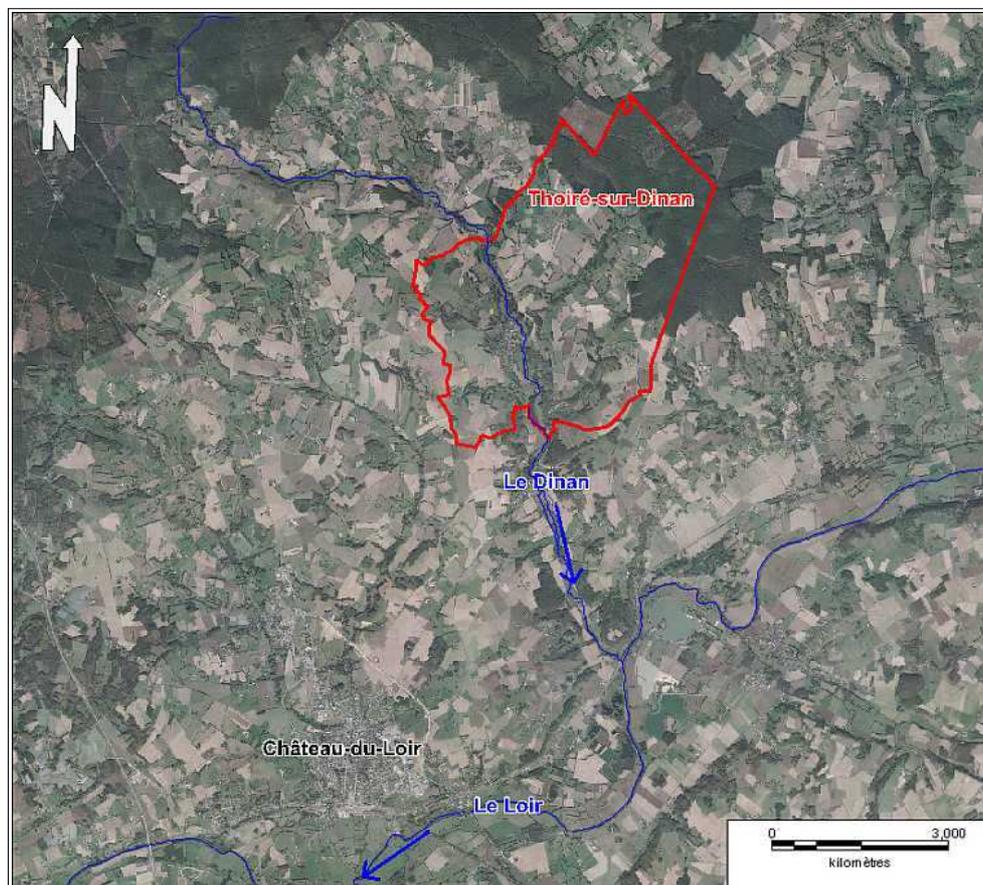


Illustration 2.3 : Localisation Thoiré-sur-Dinan [support BD ORTHO®v2 IGN]

Au recensement INSEE de 2011, Saint-Cyr-en-Bourg compte un peu moins de 1000 habitants, Thoiré-sur-Dinan moins de 500. Ce sont donc **deux communes rurales**, dont l'économie repose majoritairement sur l'agriculture (Thoiré-sur-Dinan) et la viticulture (Saint-Cyr-en-Bourg).

Géologiquement, les deux sites font partie du **Bassin parisien**, caractérisé par une alternance de dépôts sédimentaires (argile, calcaire, sable...) durant les ères secondaires et tertiaires ; une importante phase sédimentaire calcaire survenue il y a 80 millions d'années (étage géologique Turonien) est à l'origine de la formation de la **craie dite tuffeau** (de Touraine et d'Anjou), qui constitue le **substratum des deux sites** d'étude. Son épaisseur moyenne est de **quelques dizaines de mètres**.

Ce substrat calcaire affleure dans les versants des vallées affluentes de la Loire (Saint-Cyr-en-Bourg) et du Loir (Thoiré-sur-Dinan).

A Saint-Cyr-en-Bourg, le tuffeau n'est recouvert que par **un à quelques mètres de formations superficielles** argileuses, issues de la décalcification du tuffeau.

A Thoiré-sur-Dinan, cette configuration s'observe également en bordure de plateau, au niveau des vallées et valls traversant la commune. En s'éloignant des versants, des dépôts superficiels argileux, sableux et limoneux survenus postérieurement à la sédimentation du tuffeau, viennent s'ajouter à l'argile de décalcification (illustration 2.4) : les terrains de recouvrement peuvent atteindre, en sommet de plateau, de **15 à 20 m d'épaisseur cumulée**.

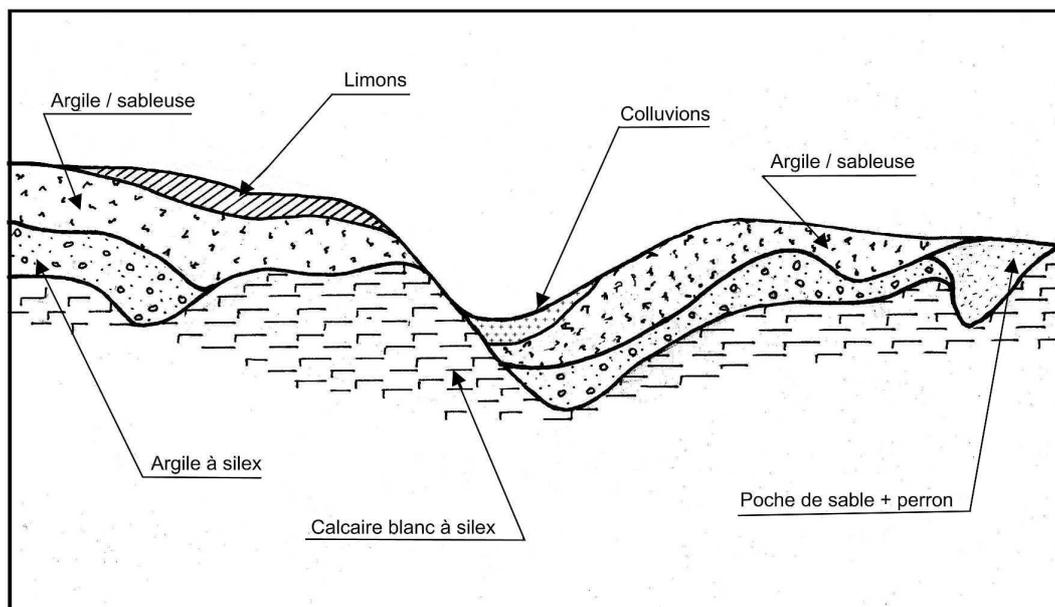


Illustration 2.4 : Coupe géologique simplifiée du secteur de Thoiré-sur-Dinan

2.2 - Typologie des cavités recherchées

2.2.1 - Cavités naturelles

Le massif crayeux du Turonien est le siège d'une nappe d'eau souterraine. A Saint-Cyr-en-Bourg, ce massif n'est pas karstifié et on n'observe pas de formes de surface d'introduction des eaux météoriques. A Thoiré-sur-Dinan en revanche, le massif calcaire est karstifié, il est donc possible *a priori* de trouver sur ce site des formes souterraines et de surface liées à des cavités naturelles, comme cet effondrement ponctuel survenu dans un fossé (illustration 2.5).



Illustration 2.5 : Point d'infiltration naturel des eaux de surface, Thoiré-sur-Dinan (72), 2008

2.2.2 - Cavités anthropiques

Plusieurs facteurs favorables expliquent la présence de cavités anthropiques accessibles à flanc de coteau sur les deux sites d'étude :

- affleurement de la craie en **flanc de versant** des vallées et vals, permettant d'accéder facilement à la ressource,
- matériau relativement **tendre** donc facilement extractible,
- matériau pouvant servir à **divers usages** : construction, fabrication du salpêtre (base de la poudre à canon), amendement des terres agricoles, etc.

Le tuffeau a donc été extrait en souterrain depuis plusieurs siècles à partir des versants des vallées, pour des usages qui se sont diversifiés au cours des siècles, accompagnant l'expansion économique des territoires :

- **refuges** contre les invasions,
- **habitations** et dépendances,
- utilisation du matériau pour la **construction**,
- réutilisation des carrières souterraines pour des **usages agricoles** : stockage viticole, culture des champignons, etc.

La diversité des usages explique la diversité de typologies de cavités accessibles en cavage sur les deux sites :

- **habitations troglodytiques** (illustration 2.6) comportant plusieurs pièces, creusées spécifiquement ou réutilisant les entrées d'anciennes carrières,
- **caves utilisées en dépendances**, constituées généralement d'une galerie principale de 10 à 30 m de long, avec souvent une ou deux pièces annexes (illustration 2.7),
- **carrières d'extraction de pierres de taille** (illustration 1.9), exploitées majoritairement selon la méthode des chambres et piliers (tournés ou en voiles, illustration 2.8), pouvant atteindre des surfaces de plusieurs hectares voire plusieurs dizaines d'hectares.

À l'est de la commune de Saint-Cyr-en-Bourg, il n'est pas rare que deux voire trois niveaux de cavités se **superposent**, en raison de la hauteur importante du versant rocheux de la vallée du Thouet (illustration 2.9).

À noter que les cavités ayant été creusées pour la protection des populations (les souterrains-refuges, cavités anthropiques parmi les plus anciennes) ont en grande majorité disparu aujourd'hui, soit parce

qu'elles se sont effondrées, soit parce qu'elles ont été reprises lors du creusement de caves, d'habitations troglodytiques ou de carrières plus récentes.



Illustration 2.6 : Ancienne habitation troglodytique, Thoiré-sur-Dinan (72), 2009



Illustration 2.7 : Cave-dépendance servant au stockage viticole, Thoiré-sur-Dinan (72), 2009

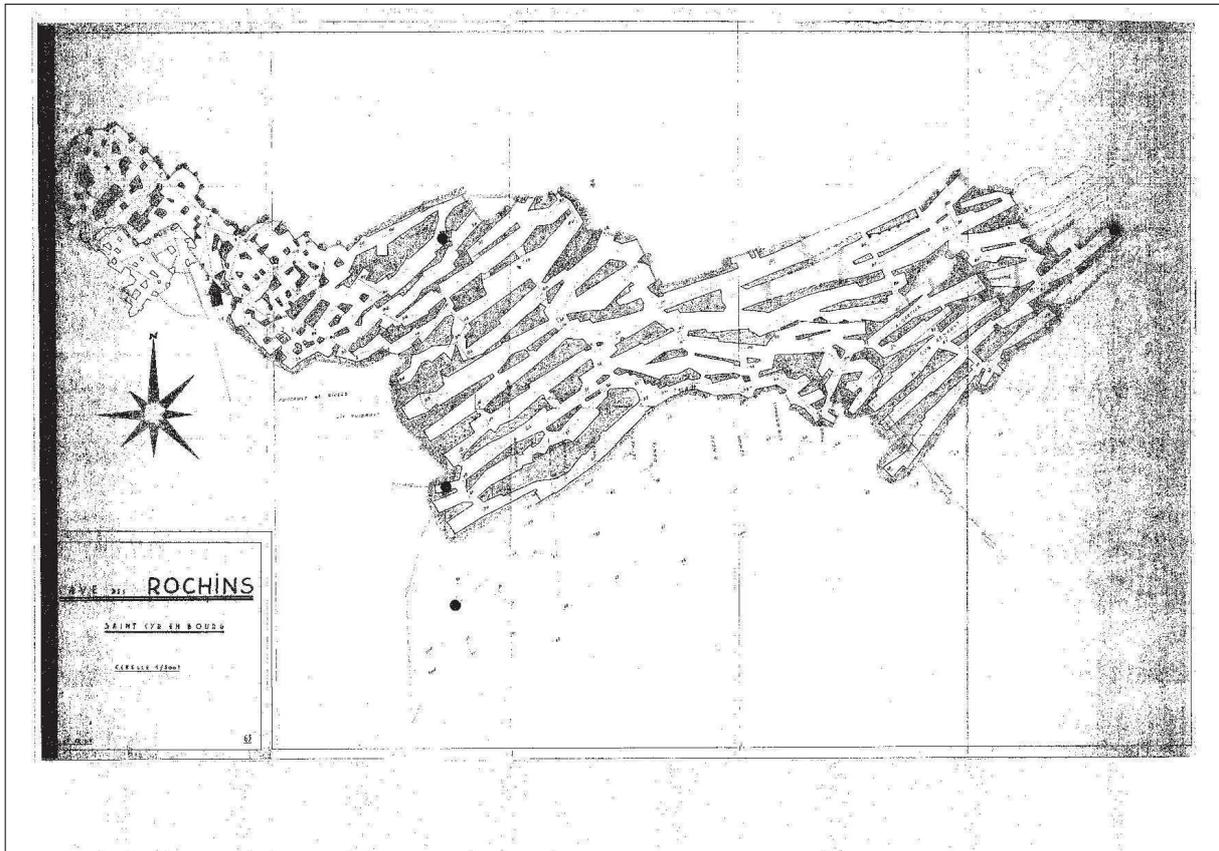


Illustration 2.8 : Plan d'une ancienne carrière d'extraction de pierre de taille, exploitée par la méthode des chambres et piliers (à gauche, piliers tournés, à droite, piliers en voile), Saint-Cyr-en-Bourg (49) [Plan réalisé par l'exploitant le 17/12/1964, fourni par le CG 49]

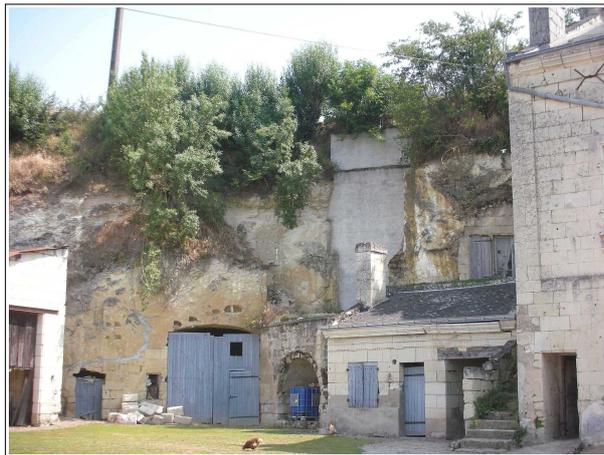


Illustration 2.9 : Entrées à flanc de coteau se superposant, Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2010

Sur les deux sites, sont également rencontrées des **cavités accessibles en plateau**.

À Saint-Cyr-en-Bourg, la faible épaisseur des terrains de recouvrement du tuffeau sur le plateau a permis aux hommes de créer facilement des accès sur le plateau, par **tranchée descendante** (descenderie, illustration 2.10) ou en **creusant des cours** (les carries, illustration 2.11). Les fronts de taille ainsi créés étaient les points de départ de chambres et galeries souterraines creusées à l'horizontale. Ces cavités de plateau étant destinées aux mêmes usages que celles creusées à flanc de versant, on retrouve la même diversité de typologies.



Illustration 2.10 : Descenderie permettant l'accès à une carrière souterraine, Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2013



Illustration 2.11 : Carrie permettant l'accès à plusieurs caves et dépendances souterraines, Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2013

Sur le territoire de Thoiré-sur-Dinan, l'épaisseur plus importante des terrains recouvrant la craie sur le plateau a empêché la création de ces descenderies et carries, qui auraient nécessité la mise en œuvre de moyens de terrassement beaucoup trop lourds. L'extraction du tuffeau, nécessaire à l'amendement des terres agricoles, a donc été menée par le biais de puits de diamètres limités (1,50 à 2 m maximum, soit la taille d'un homme, illustration 2.12), foncés par des moyens manuels au travers des formations superficielles et d'une certaine épaisseur de craie ; une fois le puits creusé, l'extraction était poursuivie à l'horizontale, par le creusement de chambres (illustration 2.13) de tailles limitées (volumes maximaux de l'ordre de 200 m³). Ce type d'exploitation est appelé **marnière**, en référence au terme « marne », appellation locale de la craie utilisée pour l'amendement.

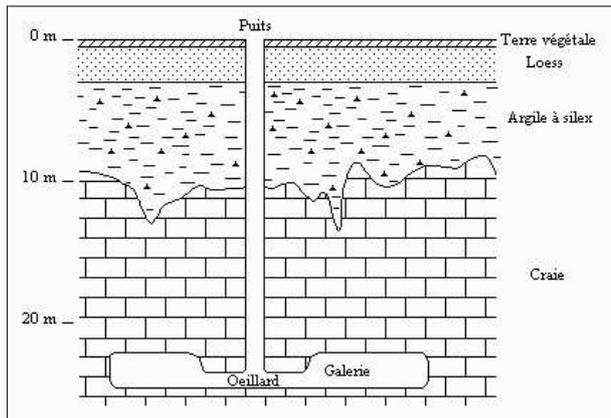


Illustration 2.12 : Schéma en coupe d'une extraction souterraine accessible par puits [LCPC, 2008]

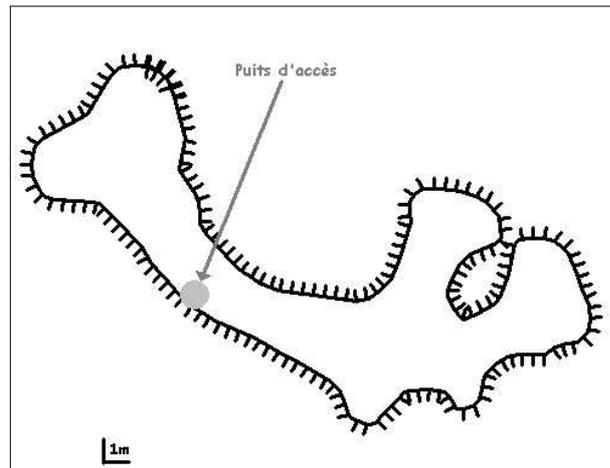


Illustration 2.13 : Schéma d'une exploitation par puits et chambres [Bérenger, 2004]

Afin de faciliter la mise en œuvre des matériaux extraits tout en limitant l'impact sur la surface des terres agricoles, les puits étaient généralement implantés sur les limites de parcelles (illustration 2.14). Ces marnières, d'accès relativement difficiles et non exploitables de façon industrielle, sont aujourd'hui toutes abandonnées. Leur abandon, survenu généralement dans la première moitié du xx^e siècle, n'a quasiment jamais été accompagné d'un remblaiement des cavités ; les puits d'accès ont parfois été comblés, sur une partie ou toute leur hauteur (illustration 2.15), et leur emplacement matérialisé par la plantation d'un arbre ou quelques arbustes (illustration 2.14).



Illustration 2.14 : Puits de marnière implanté sur une ancienne limite entre parcelles agricoles, Thoiré-sur-Dinan (72), 2008

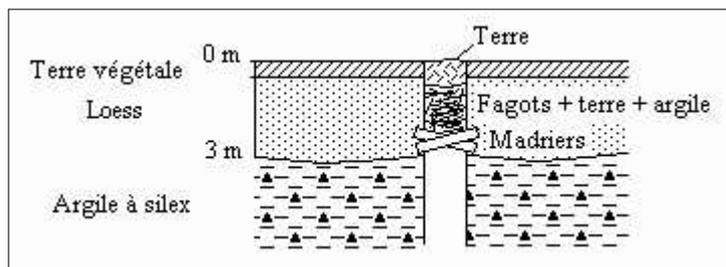


Illustration 2.15 : Bouchon mis en place sur un puits de marnière [d'après LCPC, 2008]

À noter que des puits sont également rencontrés sur le territoire de Saint-Cyr-en-Bourg. Ils ont été creusés principalement pour permettre l'aération des carrières d'extraction de pierres de taille et plus rarement pour extraire directement les matériaux, afin de limiter leur transport dans les galeries souterraines. Certains de ces puits sont ouverts et relativement entretenus (illustration 2.16), avec parfois la construction d'appareillages en maçonnerie pour les protéger (illustration 2.17) ; d'autres sont fermés en surface (illustration 2.18) et certains ont été remblayés en totalité avec parfois le maintien d'une aération limitée (illustration 2.19).



Illustration 2.16 : Puits d'aération d'une carrière souterraine, ouvert et protégé, Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2012



Illustration 2.17 : Appareillage édifié autour d'un puits d'aération, Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2012



Illustration 2.18 : Fermeture de surface d'un puits d'aération, Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2012



Illustration 2.19 : Puits d'aération comblé, aération maintenue par mise en place d'un tuyau béton, Saint-Cyr-en-Bourg (49), 2012

2.3 - Typologie des formes de surface associées aux cavités souterraines

En se référant aux contextes des deux sites d'études ainsi qu'à la typologie des cavités susceptibles d'être rencontrée, les formes de surface suivantes doivent pouvoir être mises en évidence sur des photographies aériennes :

- **linéaments structuraux, alignement de désordres de surface** : structures géologiques propices au développement de cavités karstiques ;
- **versants rocheux suffisamment pentus** pour permettre des entrées en cavage : versant naturel ou artificiel (carrière, descenderie, front de taille d'une carrière à ciel ouvert) ;

- **talwegs secs** : sièges possibles d'infiltrations préférentielles des eaux de surface ;
- différentes formes liées aux **accès à ces cavités** : entrées à flanc de coteau, puits, descenderies, carries, cheminées d'aération, chemins permettant l'accès aux entrées ;
- différentes formes liées à **l'activité extractive** : dépôts de matériaux extraits, bâtiments utiles à l'extraction ou à la valorisation du matériau (bâtiments de stockage...) ;
- les formes consécutives à **l'effondrement des cavités** ou à **l'infiltration des eaux de surface** : affaissements, dépressions, effondrements ;
- les formes liées aux **mesures de protection et de sûreté** : arbres ou bosquets matérialisant un puits ou un ancien effondrement remblayé, désordres remblayés.

Les objets potentiellement identifiables sont donc d'une grande diversité :

- **différentes formes** :
 - linéaires (alignements structuraux, descenderies, versant naturel...),
 - ponctuels (petits effondrements, puits, arbres...),
 - surfaciques (effondrements généralisés, carries, zone remblayée importante...);
- **différentes tailles** :
 - métrique à plurimétrique : puits, cheminées, petits désordres, arbres...
 - plurimétrique à pluridécamétrique : versants naturels, désordres liés à l'effondrement généralisé d'une cavité...
- **visibles à certaines époques et invisibles à d'autres**, pour diverses raisons :
 - intervention humaine : désordres remblayés, entrées de cavités comblées, arbres marquant les puits arrachés, haies disparues suite aux remembrements...
 - époque de prise de vue non propice : sol masqué par la végétation,
 - modifications d'occupation du sol : urbanisation, remembrement, défrichement...
- **évolutifs** :
 - désordres se manifestant à plusieurs reprises, remblayés régulièrement,
 - désordres s'accroissant dans le temps,
 - désordres remblayés ;
- présentant des **contrastes colorimétriques** avec l'environnement :
 - zones humides (points d'infiltration des eaux, désordres remblayés...),
 - zones remblayées dans les terres agricoles.

2.4 - L'investigation de photo-interprétation

2.4.1 - Objectifs

La photo-interprétation réalisée sur les deux sites est l'une des investigations menées dans le cadre d'une étude plus large visant à une connaissance territoriale des cavités : les deux communes ont fait l'objet d'un **inventaire des cavités et indices¹ de cavités**, visant à recenser le plus exhaustivement possible les cavités existantes sur l'ensemble de leur territoire, en faisant appel à des méthodes légères, ne nécessitant pas la mise en œuvre de moyens coûteux et/ou destructifs (type sondages).

Les investigations menées pour ces inventaires sont les suivantes :

¹Un indice de cavité correspond à toute source (archive, témoignage...) ou objet (forme de surface issue de la reconnaissance terrain ou de la photo-interprétation) qui peut laisser suspecter l'existence d'une cavité souterraine à proximité ; un indice doit faire l'objet de reconnaissances complémentaires pour confirmer l'existence de cette cavité et la localiser en souterrain.

- **recherche bibliographique** : collecte des archives écrites ou numériques anciennes et récentes ;
- **enquête orale** : collecte des archives orales auprès de personnes ressources ;
- **photo-interprétation** : recherche de formes de surface pouvant être associées à des cavités souterraines ;
- **reconnaissance visuelle du territoire** : recherche de formes de surface visibles sur le terrain.

Une fois ces investigations réalisées, l'ensemble des indices et cavités recensés est **cartographié** sur un plan à l'échelle du cadastre (généralement 1/5000) ; chaque indice fait l'objet en parallèle de la création d'une **fiche informative** sur laquelle est synthétisé l'ensemble des informations recueillies à son sujet, permettant sa localisation et sa caractérisation. Pour assurer la traçabilité des informations, toutes les sources ayant permis de répertorier l'indice sont également reportées sur la fiche.

Une telle cartographie pourra ensuite être utilisée par la commune dans le cadre de ses obligations relatives à la prévention des risques associés aux cavités souterraines :

- **mieux connaître et localiser le risque** sur le territoire communal, en croisant cette cartographie avec les enjeux existants,
- prendre en compte ce risque dans **l'aménagement du territoire** et dans les décisions d'urbanisme,
- prendre en compte l'aléa lors de l'élaboration d'un **Plan communal de sauvegarde**,
- **informer les habitants** de l'existence de ce risque et des moyens de s'en prémunir ;
- **informer les acquéreurs de biens** (et les locataires) de l'existence de ce risque.

Le but d'un recensement est donc d'obtenir le **maximum d'informations sur les cavités** présentes sur un territoire donné sans que les techniques utilisées soient invasives ou ne coûtent trop cher. Appliqué à la photo-interprétation, ce prérequis implique que les photographies étudiées soient **facilement accessibles et ne soient pas d'un coût prohibitif**, ce qui exclut un survol aérien spécifique pour acquérir des images verticales avec recouvrement. En revanche, un survol aérien sur vecteur léger type ULM pour obtenir des photographies aériennes obliques et, éventuellement, un film vidéo, peut être envisagé.

À noter que pour les deux études de cas, il n'a pas été réalisé de prises de vues aériennes obliques. L'ensemble des photographies étudiées a été acquis auprès de l'Institut géographique national (IGN), les clichés sont issus des missions aériennes réalisées régulièrement par cet organisme depuis 70 ans pour couvrir le territoire national.

2.4.2 - Définition de la méthodologie

Compte-tenu du type d'objet recherché (voir section 2.3), la méthodologie retenue pour l'investigation par photo-interprétation pour les études de cas est la suivante :

- réaliser une étude **multi-dates** (indices évolutifs),
- réaliser une étude **multi-scalaire**, avec plusieurs missions à grande échelle (recherche de petits indices) et une mission à petite échelle (recherche d'indices structuraux),
- étudier la mission **la plus ancienne** qui existe (généralement réalisée juste après ou juste avant la deuxième guerre mondiale), qui montre des sites peu modifiés voire inchangés par rapport à l'époque où les cavités souterraines étaient exploitées,
- étudier une à deux missions de bonne qualité réalisées **avant les remembrements** (années 1970) et les urbanisations récentes (à définir au préalable),
- étudier la mission **la plus récente possible**, pour avoir une vue d'ensemble correspondant le plus possible à l'état actuel du territoire (préparation de la reconnaissance visuelle de terrain),
- étudier préférentiellement des missions **panchromatiques noir et blanc** (indices colorimétriques),
- étudier au moins une mission **infrarouge noir et blanc** (indices d'humidité),

- privilégier des photographies prises en **hiver ou au début du printemps** (terrain le plus nu possible).

Le tableau 2.1 présente pour chacun des deux sites les caractéristiques des missions choisies, avec l'analyse de leur pertinence vis-à-vis des critères ci-dessus.

Caractéristiques missions Date prise de vue Longueur d'onde Échelle	Multi-dates		Multi-échelles		Longueurs d'ondes		Saison propice
	Vue ancienne	Vue récente	Grande échelle	Petite échelle	Panchro NB	IR NB	
Saint-Cyr-en-Bourg							
23/05/1927 NB 1/10 128	++	--	++	--	++	--	--
08/06/1950 NB 1/26 369	+	--	--	+	++	--	--
10/06/1968 NB 1/16 135	+	--	+	-	++	--	--
17/09/1979 NB 1/14 749	-	-	+	-	++	--	-
20/09/2008 C 1/68	--	++	++	--	--	--	-
Atteinte du critère	Oui	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non
Thoiré-sur-Dinan							
23/04/1949 NB 1/25 609	++	--	--	+	++	--	--
31/05/1957 NB 1/24 790	+	--	--	+	++	--	--
03/09/1980 NB 1/14 409	-	-	+	-	++	--	-
20/07/1995 C 1/20 159	--	+	+	-	--	--	--
19/07/2000 NB 1/25 291	--	++	--	+	++	--	--
Atteinte du critère	Oui	Oui	Partielle	Non	Oui	Non	Non

Tableau 2.1: Caractéristiques des photographies aériennes interprétées et analyse de leur pertinence, avec : totalement adaptées (++), adaptées avec limites (+), peu adaptées (-), non adaptées (- -)

Ce tableau montre que, si certains critères sont bien respectés (notamment l'étude multi-dates et le choix de longueurs d'ondes panchromatiques noir et blanc), d'autres ne le sont pas. Ceci s'explique principalement par le fait que le choix des photographies ne peut se faire que dans l'inventaire proposé

par l'IGN via le site Internet Géoportail², qui propose les missions photographiques existantes, réalisées pour des objectifs sans rapport avec la recherche de cavités.

Un compromis doit donc nécessairement être fait, entre les missions disponibles et les critères les plus importants à respecter.

2.4.3 - Résultats de la photo-interprétation

Typologie des objets identifiés en photo-interprétation

Deux sortes d'objets ont été identifiés sur les photographies aériennes :

1. des objets liés à l'**occupation du sol**, sans lien avec la présence de cavités souterraines : boisements, vergers, voiries et chemins, bâtis divers, mares, bassins (voir extrait de la photo-interprétation en annexe 1) ;
2. des objets interprétés comme **pouvant être en relation avec des cavités souterraines** (voir extrait de la photo-interprétation en annexe 2) :
 - versants rocheux suffisamment pentus pour permettre des entrées en cavage,
 - talwegs secs,
 - fronts de taille localisés, fermés ou ouverts,
 - dépressions et cuvettes, de petites ou grandes tailles,
 - trous ponctuels, de formes arrondies ou anguleuses,
 - objets linéaires en creux aboutissant à un front de taille,
 - tâches claires ou sombres par rapport à l'environnement.

Les objets ont été recherchés sur l'ensemble des missions photographiques, en partant de la plus ancienne, afin de ne pas perdre d'informations en étudiant les photographies les plus récentes (remembrements faisant disparaître haies et limites de parcelles, aménagements nouveaux masquant des terres nues, indices évolutifs, etc.).

Les objets repérés ont ensuite été confrontés aux résultats des autres investigations pour le recensement des indices de cavités souterraines, notamment la reconnaissance visuelle de terrain.

Résultats des études de cas

- *Saint-Cyr-en-Bourg*

Sur cette commune, dont la superficie atteint 8,6 km², 189 objets ont été repérés par photo-interprétation. 113 de ces objets (soit presque **60%**) s'avèrent avoir un **lien avec la présence d'une ou plusieurs cavités souterraines** (illustration 2.20).

Sur ces 113 objets, la majeure partie (**93%**) s'avère correspondre à des **formes de liaison entre la cavité et la surface** : versant rocheux, fronts de taille, aux niveaux desquels seront recherchés d'éventuelles entrées en cavage (illustrations 2.21, 2.22 et 2.25), descenderies (illustrations 2.23 et 2.26), puits (illustrations 2.24 et 2.27). Les quelques pour-cents restants ont été mis en relation avec des désordres remblayés ou non.

²<http://www.geoportail.gouv.fr/>

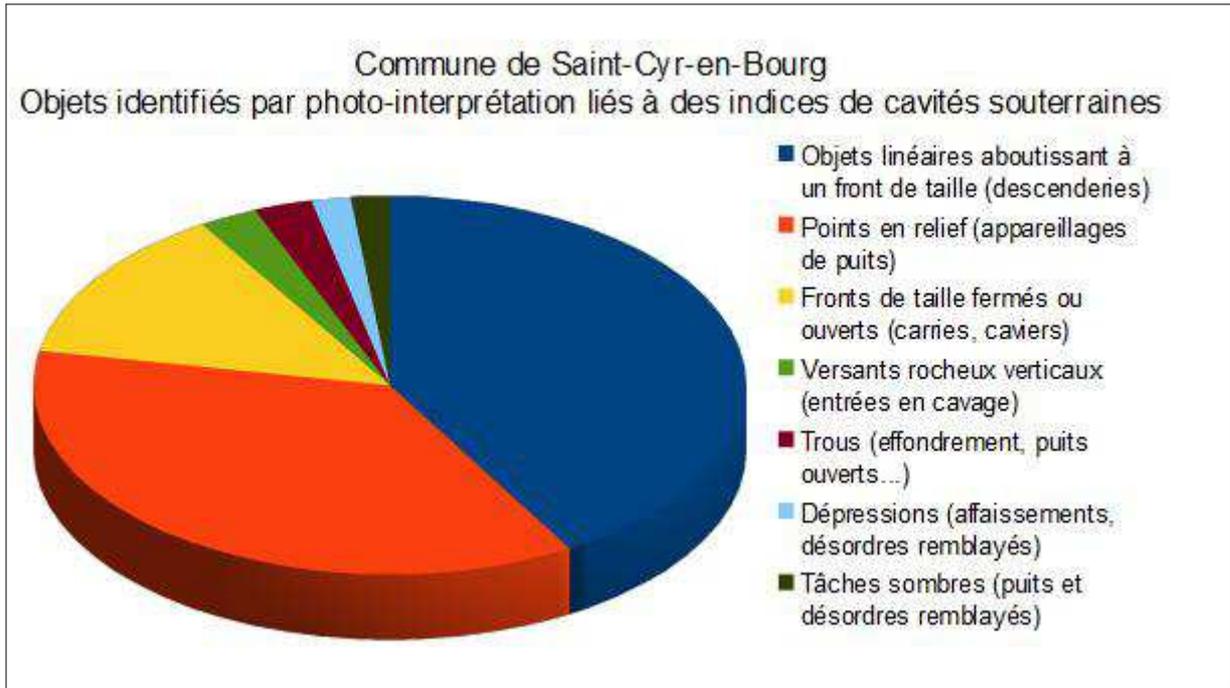


Illustration 2.20 : Répartition par types d'indices des objets validés

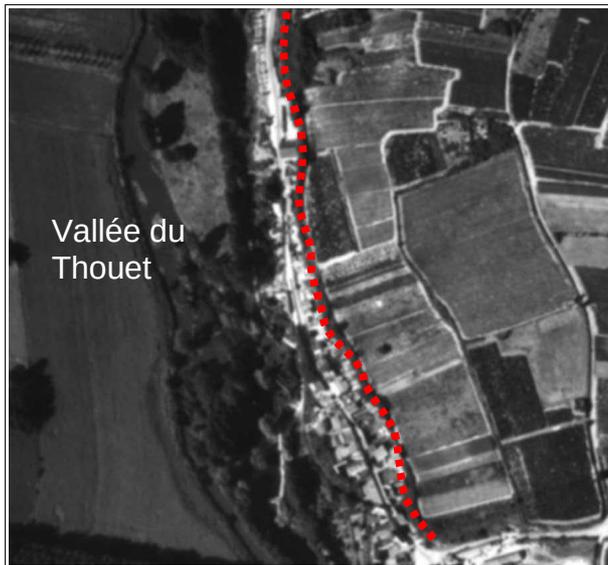


Illustration 2.21 : Versant rocheux surplombant la vallée du Thouet (crête en pointillé rouge) [support cliché IGN, 1979]

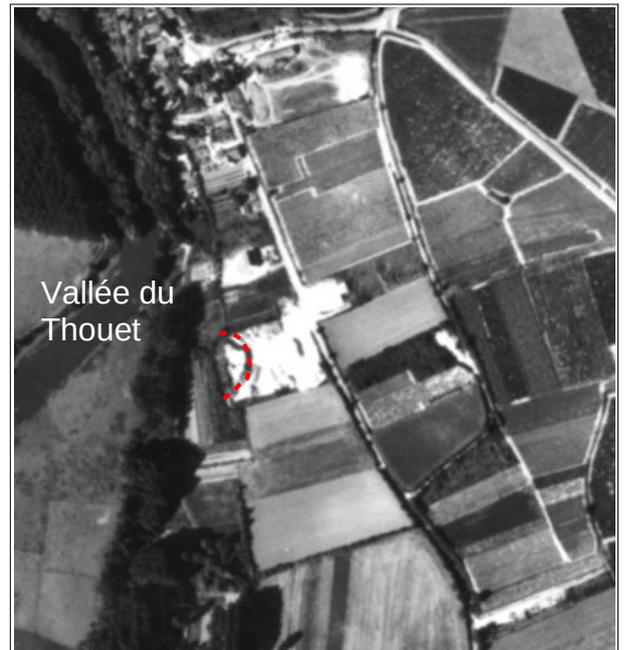


Illustration 2.22 : Front de taille [support cliché IGN, 1979]



Illustration 2.23 : Objet linéaire aboutissant à un front de taille [support cliché IGN, 1979]



Illustration 2.24 : Zones non cultivées + points en relief dans parcelles viticoles [support cliché IGN, 2008]



Illustration 2.25 : Deux entrées en cavage repérées en 2012 sur le front de taille de l'illustration 2.22

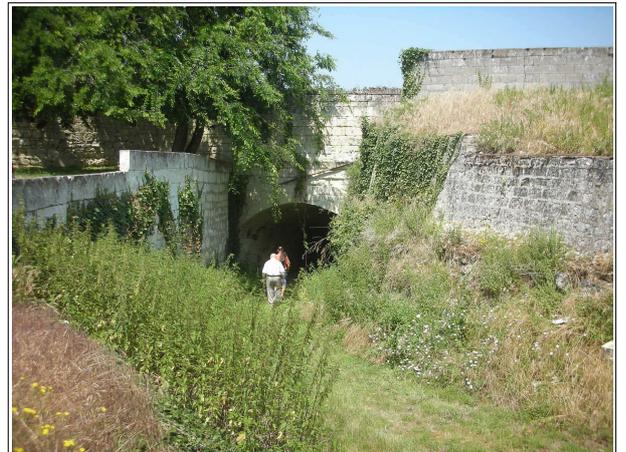


Illustration 2.26 : Descenderie visible en 2010, correspondant à l'objet de l'illustration 2.23



Illustration 2.27 : Puits d'aération d'une carrière visible en 2012, correspondant à l'un des objets de l'illustration 2.24

Parmi les quelques objets interprétés en désordres, ont été identifiés :

- des **dépressions**, visibles sur certaines missions et invisibles sur d'autres (illustrations 2.28, 2.29 et 2.30), correspondant à d'anciens effondrements partiels de carrières souterraines,
- des **trous**, correspondant probablement à des fontis (illustration 2.31),
- des **tâches sombres**, à l'emplacement de puits ou d'anciens désordres remblayés.

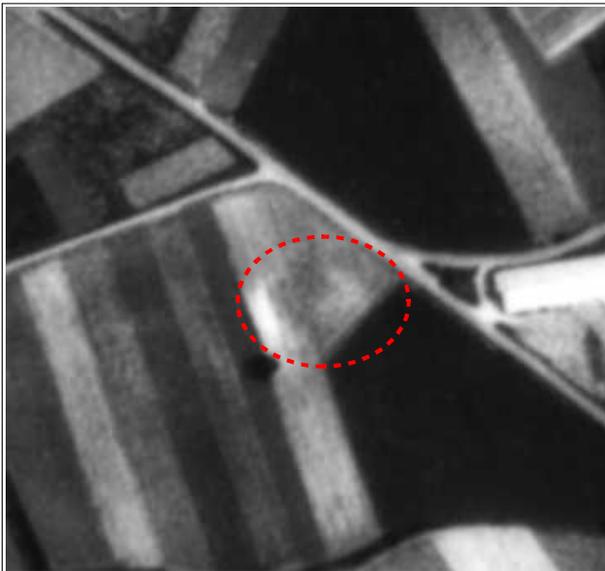


Illustration 2.28 : Dépression [cliché IGN 1968]



Illustration 2.29 : Dépression présentant un contraste colorimétrique avec son encaissant ; nota : la dépression de l'illustration 2.28 n'est pas visible [cliché IGN 1979]



Illustration 2.30 : Affaissement visible en 2012, correspondant à la dépression visible sur l'illustration 2.28



Illustration 2.31 : Trou à proximité d'une descenderie à une carrière souterraine [cliché IGN 1968)

60 % des indices validés ont été repérés sur **au moins deux missions**, ce qui confirme l'intérêt de réaliser une étude multi-dates (illustration 2.32).

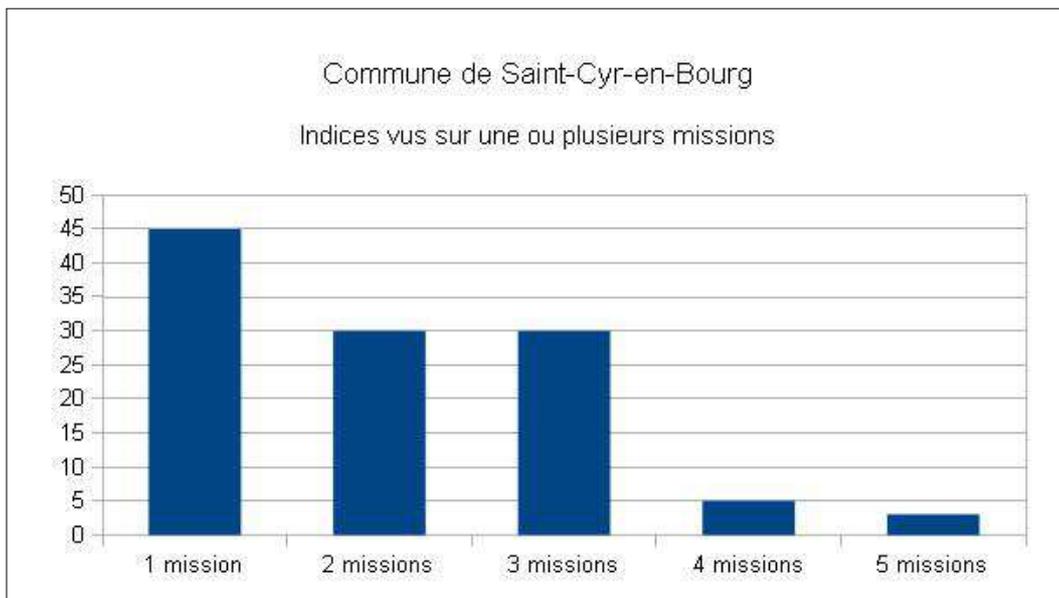


Illustration 2.32 : Nombre d'indices vus sur une ou plusieurs missions

Environ **20 %** des indices ne sont visibles que sur les **missions les plus anciennes** (avant 1979), antérieures aux modifications importantes de l'occupation du sol (remembrement agricole, urbanisation). Il s'agit en majorité d'**indices géomorphologiques** : versant rocheux, descenderies, caviars et carrières.

Environ **35 %** des indices ne sont visibles que sur les **missions les plus récentes** (1979 à 2008), avec une grande majorité d'**indices ponctuels en relief**, correspondant aux **puits d'aération ou d'accès** des anciennes carrières d'extraction de pierres de taille, à côté desquels se sont parfois développés des arbustes ou des ronciers. Ces indices ponctuels en relief sont particulièrement bien identifiables sur la mission la plus récente en couleur (presque 50 % de ces indices n'ont été repérés que sur cette mission de 2008). Plusieurs raisons peuvent expliquer ce point :

- photographie de **résolution spatiale élevée** (échelle 1/68),
- **contraste de relief important** entre les appareillages de cheminée et le sol environnant,

- **contraste colorimétrique fort** entre la zone où est implanté le puits, non cultivée sur quelques mètres autour de celui-ci, et le reste des parcelles cultivé en vignes.

Dans ce **contexte très particulier** (appareillages de puits en relief au sein de cultures viticoles), une mission de bonne résolution spatiale en **couleurs** peut apporter des résultats intéressants.

15 % des indices sont visibles sur la mission la plus ancienne (1927), un indice visible sur cette mission et disparu ensuite s'est avéré être en relation avec une cavité souterraine (petite carrié située dans le bourg). On s'aperçoit que cette mission pourtant de bonne résolution spatiale (échelle 1/10 000) a donné peu de résultats, en lien avec la **mauvaise qualité des clichés**.

La mission à petite échelle (1950) n'a donné que peu d'objets validés en tant qu'indices de cavités souterraines (15 % de l'ensemble des objets validés) ; *a contrario*, les **missions à grande échelle de bonne qualité** (1968-1979-2008) ont été plus intéressantes, puisque chaque mission prise séparément fournit environ 60 % d'objets validés.

Environ **5 %** des indices ont **évolué dans le temps** :

- des zones paraissant remblayées (zones non cultivées) sur certaines années et interprétées en dépressions ou trous d'autres années,
- des zones paraissant remblayées ou non cultivées sur certaines années et interprétées comme des puits (points en relief) sur d'autres années,
- des trous visibles sur des missions anciennes et interprétés comme des puits (points en relief) sur des missions plus récentes, indiquant la fermeture de ces puits.

Les **40 % d'objets non liés à des cavités souterraines** ont été pour certains interprétés comme des leurres, liés à l'occupation du sol, à la présence de mares ou à des artefacts agricoles ; les autres n'ont pu être interprétés mais n'ont pas été conservés, trop d'incertitudes restant attachées à leur signification.

Les indices ayant fait l'objet d'une validation terrain ont été relevés par GPS, de précision planimétrique métrique. La superposition du report réalisé après photo-interprétation et de celui issu des mesures GPS fait apparaître des **différences métriques à plurimétriques**, en fonction de la taille de l'objet :

- les **objets étendus** de type dépression, tâches, carriés, descenderies présentent des décalages planimétriques plurimétriques, compris en moyenne entre **7 m et 15 m** selon les types d'objets,
- les **objets ponctuels** de type points en relief (puits d'aération) présentent un décalage planimétrique **inférieur à 5 m** (moyenne à 3,75 m).

Outre le problème lié à la distorsion des photographies aériennes, d'autres raisons peuvent être avancées pour expliquer ces variations dans les incertitudes :

- objets ponctuels correspondant aux puits identifiables seulement sur les missions de hautes résolutions spatiales, dont la meilleure échelle permet un repérage plus précis,
- relevé terrain des coordonnées réalisé ponctuellement sur les objets étendus (linéaires ou surfaciques), le point levé sur le terrain pouvant être différent de l'objet cartographié à partir de la photographie aérienne (bord ou axe d'une dépression par exemple).

• *Thoiré-sur-Dinan*

Lors du recensement mené par le Cerema DTerOuest en 2009, la photo-interprétation a été réalisée par un chargé d'études débutant dans cette technique. Sur les 278 indices répertoriés sur l'ensemble du territoire communal, seuls 14 objets observés sur images aériennes ont pu être mis en relation avec des cavités souterraines, ce qui représente **5 % des indices**.

Pour cette présente étude, il a été décidé de refaire la photo-interprétation afin de vérifier si le manque d'expérience du photo-interprète a pu limiter les résultats. Par manque de temps, seule une partie du territoire communal, contenant 71 indices de cavités souterraines à l'issue du recensement, a été réinterprétée (illustration 2.33).

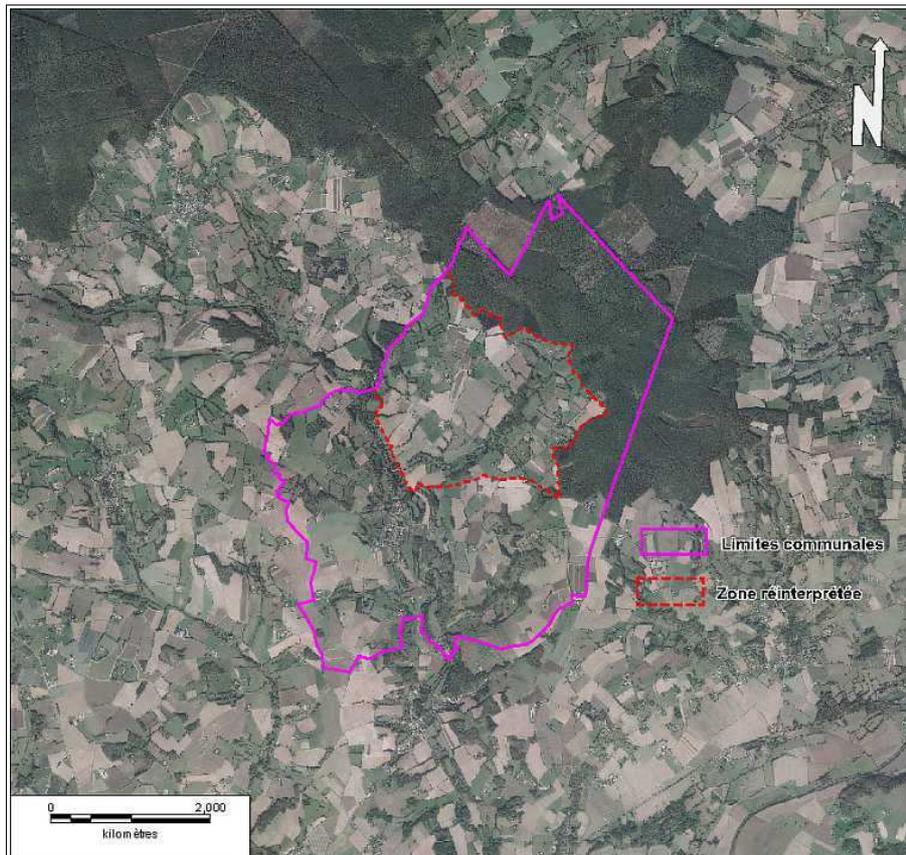


Illustration 2.33 : Localisation de la zone réinterprétée [support BD ORTHO®v2 IGN]

Sur cette partie (superficie d'environ 4,8 km²), 141 objets ont été repérés par photo-interprétation. 14 d'entre eux ont pu être mis en relation avec des indices de cavités souterraines issus du recensement (illustration 2.34), ce qui représente **10 % d'objets confirmés**. On peut donc supposer que ce chiffre de 10 % est applicable sur l'ensemble du territoire communal. Cet exemple montre l'importance de l'**expérience du photo-interprète** vis-à-vis des types d'objets recherchés.

Sur ces 14 objets confirmés, un peu plus de la moitié (**57%**) correspond à des **formes de liaison entre la surface et la cavité** : caviers (illustrations 2.35 et 2.36), trous ou végétation arborée marquant l'emplacement d'un puits d'accès à une marnière (illustrations 2.37 et 2.38). Les autres objets correspondent à des **désordres**, dont certains apparaissent remblayés (effondrements, affaissements, illustrations 2.39 à 2.44).



Illustration 2.34 : Répartition par types d'indices des objets validés



Illustration 2.35 : Front de taille [Cliché IGN 1980]



Illustration 2.36 : Cavier repéré en 2009 au niveau du front de taille de l'illustration 2.35



Illustration 2.37 : Arbre isolé sur ancienne haie [Cliché IGN 2000]



Illustration 2.38 : Effondrement au pied d'un arbre isolé, puits de marnière probable repéré en 2009, situé à l'emplacement de l'objet de l'illustration 2.37



Illustration 2.39 : Bosquet dans dépression [Cliché IGN 1995]



Illustration 2.40 : Affaissement visible en 2008, situé à l'emplacement de l'objet de l'illustration 2.39



Illustration 2.41 : Trou avec arbre en bordure [Cliché IGN 1995]



Illustration 2.42 : Affaissement bordé par des arbustes repéré en 2008, correspondant à l'objet de l'illustration 2.41



Illustration 2.43 : Tâche sombre [Cliché IGN 2000]



Illustration 2.44 : Effondrement repéré en 2008 à l'emplacement de l'objet visible sur l'illustration 2.43

85 % des indices ont été repérés sur au moins deux missions, confirmant **l'intérêt de l'étude multi-dates** (illustration 2.45).

Environ **20 %** des indices ne sont visibles que sur les **missions les plus anciennes** (avant 1980), antérieures aux modifications importantes de l'occupation du sol (remembrement agricole, urbanisation).

Environ **43 %** des indices ne sont visibles que sur les **missions les plus récentes** (1980 à 2000), avec une majorité d'indices ponctuels en relief, correspondant à des arbres isolés ou des bosquets marquant l'emplacement d'anciens puits d'accès aux marnières.

14 % des indices ne sont visibles que sur la **mission la plus ancienne**, datée de 1949 : une tâche sombre pouvant correspondre à un désordre remblayé à l'époque ainsi qu'un arbre isolé arraché depuis 1949 mais à l'emplacement duquel un affaissement est visible sur le terrain.



Illustration 2.45 : Nombre d'indices vus sur une ou plusieurs missions

Les missions à petite échelle donnent sensiblement moins d'objets validés que les missions à grande échelle, mais compte-tenu de la qualité des photographies, certaines **missions à petite échelle ont donné de bons résultats** : la mission de 1995 dont l'échelle est *a priori* peu adaptée pour la recherche d'indices de cavités souterraines, a montré **65 % des objets validés** en termes de cavités souterraines ; sa bonne qualité est probablement à l'origine de cette réussite.

35 % des indices ont subi une **évolution dans le temps** ; la majorité correspond à d'anciens puits d'accès à des marnières, remblayés plus ou moins récemment. Pour certains, des tassements du remblai se sont produits, occasionnant affaissements et effondrements parfois visibles sur le terrain (illustrations 2.46 à 2.48).



Illustration 2.46 : Trou [Cliché IGN 1980]



Illustration 2.47 : Arbre isolé correspondant à l'objet de l'illustration 2.35 [Cliché IGN 1995]



Illustration 2.48 : Bosquet arbustif poussant en 2009 dans un effondrement de puits de marnière, correspondant aux objets des illustrations 2.46 et 2.47

Les **90 %** d'objets non liés à des cavités souterraines ont été pour le quart d'entre eux interprétés comme des leurres, liés à l'occupation du sol (anciennes haies arrachées, anciens boisements défrichés), à la présence de mares ou bassins ou à des artefacts agricoles ; l'autre partie n'a pu être interprétée mais n'a pas été conservée en termes d'indices de cavités souterraines, trop d'incertitudes restant attachées à leur signification.

Les indices ayant fait l'objet d'une validation terrain ont été relevés par GPS, de précision planimétrique métrique. La superposition du report réalisé après photo-interprétation et de celui issu des mesures GPS fait apparaître des différences de l'ordre d'une **dizaine de mètres en moyenne**, en relation avec :

- la **distorsion géométrique des photographies** (les indices repérés sur les missions à petite échelle présentent le plus de décalage, pouvant aller jusqu'à une vingtaine de mètres),
- la **précision de la source d'information** quand l'indice n'est pas visible sur le terrain (témoignage oral ou écrit (archive) peu précis),
- l'**extension en planimétrie de l'indice de terrain** (le point relevé par GPS sur les affaissements et effondrements de dimensions plurimétriques ne correspond pas forcément au point relevé sur les photographies aériennes).

À noter toutefois la **très bonne corrélation** (1,5 à 2,5 m de décalage) pour trois objets :

- deux correspondent à des **indices très ponctuels** sur le terrain (puits de marnières marqués par un arbre isolé),
- un est relatif à un **témoignage oral** (effondrement remblayé) localisé avec une grande précision par l'informateur.

Analyse comparative des résultats

Les résultats des photo-interprétations font apparaître des points communs quant aux types d'indices identifiés et aux caractéristiques des photographies :

- une majorité d'objets identifiés est liée aux **communications fond / surface** (notamment à St-Cyr-en-Bourg),
- *a contrario*, relativement peu d'objets liés à des désordres de surface (fontis, affaissements, désordres remblayés...) ont été mis en évidence, hormis les tassements et effondrements du remblai des puits d'accès aux marnières à Thoiré-sur-Dinan,

- les indices sont généralement **visibles sur plusieurs missions** ;
- le quart des objets n'est visible que sur les anciennes missions, réalisées avant le remembrement agricole ;
- la **mission la plus ancienne** apporte des **résultats moyens**, puisque seulement 15 % des objets ne sont visibles uniquement que sur cette mission³ ;
- plus d'objets ont été identifiés sur les photographies à **grande (> à 1/15 000) et moyenne échelle** (entre 1/15 000 et 1/20 000), avec toutefois des particularités :
 - les objets en relation avec des désordres de surface de petites dimensions (petits fontis, puits ouverts) sont généralement identifiables sur les photographies d'échelle > à 1/15 000,
 - les objets en relation avec des désordres de surface de grandes dimensions (grands affaissements, grands effondrements remblayés...) sont identifiables sur l'ensemble des missions,
 - les objets très ponctuels en relief (arbre isolé, superstructures de puits) sont particulièrement visibles sur les missions récentes de bonne résolution spatiale quelle que soit les longueurs d'onde utilisées pour ces photographies ;
- **aucun indice structural n'a été repéré**, en lien avec un substratum non affleurant (sauf dans les versants des vallées) et recouvert de formations superficielles meubles d'une épaisseur suffisante pour masquer tout linéament d'origine structural.

Au niveau des différences entre les deux territoires, ont été relevés les éléments suivants :

- **plus d'indices** ont été repérés sur les **missions récentes de Thoiré-sur-Dinan** que sur les missions récentes de Saint-Cyr-en-Bourg : la qualité et l'échelle médiocres des missions anciennes étudiées à Thoiré-sur-Dinan en est probablement la cause ;
- il a été relevé **plus d'indices évolutifs à Thoiré-sur-Dinan**, en lien avec l'abandon total des marnières de plateau, le comblement des anciens puits d'accès et, le cas échéant, l'apparition de désordres dans ces remblais de surface ;
- la **mission couleur a donné de très bons résultats** sur Saint-Cyr-en-Bourg pour le repérage des puits d'aération des anciennes carrières.

La photo-interprétation a été **beaucoup plus fructueuse sur la commune de Saint-Cyr-en-Bourg** : 60 % d'objets validés en termes d'indices de cavités souterraines contre 10 % sur Thoiré-sur-Dinan. Les raisons qui peuvent être avancées sont les suivantes :

- **contextes géologique et géomorphologique** :
 - la géomorphologie du territoire de Saint-Cyr-en-Bourg a favorisé les **accès horizontaux** aux cavités souterraines, bien visibles sur les photographies aériennes (fronts de taille, versants rocheux),
 - l'épaisseur moindre de formations superficielles qui recouvre le massif calcaire à Saint-Cyr-en-Bourg a facilité sur le plateau la création d'**accès horizontaux** au matériau exploité (descenderies, carrières), également bien visibles sur les photographies ;
- **typologie des cavités** :
 - les anciennes carrières de pierres de taille sur Saint-Cyr-en-Bourg sont très étendues et ont nécessité le creusement de **nombreux puits d'aération** ; ces puits, majoritairement fermés aujourd'hui par des superstructures en pierres de taille ou bétonnées de formes cylindriques, sont parfaitement identifiables sur les photographies récentes en couleur,

³La mauvaise qualité de ces photos est ici avancée, car sur Saint-Cyr-en-Bourg il était attendu de meilleurs résultats, en lien avec la bonne résolution spatiale des images de 1927 (1/10 000).

- les anciennes marnières sur Thoiré-sur-Dinan étaient de plus petites extensions, un seul puits permettait l'accès, l'extraction et l'aération ; ces puits, dont l'emplacement a longtemps été matérialisé par de la végétation (arbre, arbuste, bosquet...), sont pour beaucoup aujourd'hui **remblayés et non repérables** ; dans ce cas, seuls les désordres associés aux puits ou aux chambres souterraines, qu'ils soient ouverts ou remblayés, peuvent être identifiés sur les photographies, sous certaines conditions en lien avec les caractéristiques des photographies aériennes (époque de la prise de vue, échelle...) ;
- **modes d'agriculture** :
 - à Saint-Cyr-en-Bourg, les **parties non cultivées** autour des anciens puits d'aération des carrières, ressortent nettement sur les photographies aériennes couleur,
 - à Thoiré-sur-Dinan, les remembrements ont très souvent été l'occasion **d'arracher les haies**, dans lesquelles se trouvaient préférentiellement les puits de marnières, qui ont été alors remblayés ;
- **usages actuels des cavités** :
 - à Saint-Cyr-en-Bourg, un **grand nombre de cavités est encore utilisée** (caves de particuliers, habitations troglodytiques...), ce qui fait que leurs accès sont encore entretenus et donc souvent visibles sur les photographies aériennes,
 - à Thoiré-sur-Dinan, mis à part les cavités des caves encore utilisées par des particuliers, les marnières de plateau sont **toutes abandonnées** et leurs accès le plus souvent remblayés ;
- **caractéristiques des photographies étudiées** :
 - **nombreuses missions à bonne résolution spatiale** sur Saint-Cyr-en-Bourg (3 missions d'échelle supérieure à 1/15 000 pour une seule à Thoiré-sur-Dinan),
 - **missions anciennes de meilleure résolution spatiale** à Saint-Cyr-en-Bourg (mission de 1927 à 1/10 000, mission de 1968 à 1/16 000),
 - **mission récente de meilleure résolution spatiale** à Saint-Cyr-en-Bourg : 1/68 pour 2008 contre 1/25 000 pour 2000 à Thoiré-sur-Dinan ;
- **expérience du photo-interprète** :
 - l'exemple de Thoiré-sur-Dinan, dont une partie du territoire a été interprétée par deux personnes ne possédant pas la même expérience dans la recherche d'indices de cavités souterraines par photo-interprétation, montre que les résultats peuvent varier considérablement en fonction de ce critère (du simple au double sur cet exemple).

3 - Apports et limites de la photo-interprétation

Les études de cas réalisées montrent tout l'intérêt de **réaliser une photo-interprétation sur images aériennes verticales ou obliques**⁴ pour la recherche d'indices de cavités souterraines. Ces études de cas démontrent également que différents facteurs vont conditionner :

- le **type d'objets** à rechercher,
- les **caractéristiques des photographies** à privilégier,
- les **modes d'exploitation** à privilégier.

Ces différents facteurs sont :

- le **contexte de la zone d'étude** (géologie, géomorphologie),
- la **typologie des cavités** recherchées (profondeurs, dimensions, modes d'évolution),
- la **typologie des formes de surface** associées (accès, désordres...),
- les **usages actuels et anciens** de ces cavités,
- l'**occupation du sol** actuelle et ancienne.

3.1 - Les types d'indices identifiables

Différents types d'objets peuvent donc être recherchés :

- **indices morphologiques** :
 - **versants sub-verticaux** naturels (coteau, falaise) ou anthropiques (fronts de taille de carrière, de descenderies...) → recherche d'entrées de cavités à flanc de coteau,
 - **talwegs** secs ou humides → identification des secteurs favorables à la présence de points d'infiltration des eaux de surface,
 - **points ou zones en relief** (structures bâties, arbres isolés, bosquets, dépôts de matériaux, remblais...) → recherche de communications surface / fond verticales, de désordres de surface remblayés, de dépôts de matériaux extraits...,
 - **points ou zones en relief inversé** (trous, dépressions, cuvettes) → recherche de communications surface / fond verticales, d'affaissements, d'effondrements... ;
- **indices structuraux** : linéaments, discontinuités, alignements de formes ponctuelles → recherche de structures géologiques propices à la présence de cavités naturelles en profondeur (pour les territoires dont le substratum rocheux n'est pas masqué par des formations superficielles) ;
- **indices hydriques et hydromorphologiques** :
 - **points ou tâches** de teintes plus foncées que les alentours, pouvant signaler une infiltration ou un drainage préférentiel des eaux de surface → recherche de points d'infiltration, de communications fond / surface remblayées, de désordres remblayés,
 - **alignements de linéaments** ou formes linéaires de teintes plus foncées que les alentours, pouvant signaler des sous-écoulements de surface → recherche de zones d'infiltration des eaux de surface en lien avec un réseau karstique ;
- **indices phytographiques** : différences de pousse de la végétation ou absence de végétation au sein d'une zone végétalisée, se manifestant par des contrastes de teintes ou de rugosité → recherche de zones remblayées pouvant correspondre à l'emplacement d'anciens désordres de surface ;

⁴Bien qu'aucune photographie aérienne oblique n'ait été étudiée pour les études de cas, ce type d'image peut apporter des informations utiles, notamment en accentuant les reliefs (ombres portées) et en autorisant des photographies très proches de la surface, aidant à l'interprétation des objets.

- **indices d'occupation du sol** : structures construites, arbres ou bosquets, voies d'accès, zones non cultivées au sein de cultures → recherche de communications surface / fond verticales ou horizontales, de protections mises en place autour de désordres ou de ces dispositifs de communication, de désordres remblayés ;
- **indices sciographiques** : micro-reliefs en liaison avec les ombres portées (principalement visibles sur photographies obliques), qui vont accentuer les dépressions et trous → recherche de communications surface / fond verticales, d'affaissements, d'effondrements... ;
- **indices thermographiques** : points ou tâches présentant des contrastes de teintes avec leur environnement, traduisant des différences de chaleur dans le sol → recherche de désordres de surface remblayés, d'accès verticaux fermés ou remblayés...

L'identification préalable des facteurs permet de sélectionner dans cette liste les types d'indices pertinents à rechercher et d'éliminer ceux non pertinents (par exemple, les indices structuraux non visibles dans des contextes où le substratum rocheux n'affleure pas).

3.2 - Les caractéristiques des images aériennes et les modes d'exploitation recommandés

La spécificité des indices recherchés permet de définir les principaux critères que doivent idéalement posséder les images aériennes qui seront étudiées :

- permettre la **caractérisation du relief** (en hauteur ou en profondeur) :
 - analyse stéréoscopique sur images aériennes verticales,
 - étude de photographies obliques prises à basse altitude et aux moments de la journée les plus propices (petit matin, soirée) pour tirer le meilleur profit des ombres portées ;
- permettre de **voir des objets de petite taille** (désordres remblayés ou non, communications fond / surface...) :
 - images avec une bonne résolution spatiale (grande échelle, de 1/1 000 à 1/15 000), donc prises à basse altitude,
 - images les plus nettes possibles, donc prises en période de beau temps, sans voile nuageux ou brumeux ;
- permettre de **détecter des indices structuraux linéaires de grande taille** :
 - images d'ensemble (petite échelle, inférieure à 1/40 000) ;
- permettre de **caractériser l'humidité dans les sols** :
 - longueurs d'onde dans l'infrarouge permettant de discriminer les zones plus humides,
 - dates de prise de vue favorables (après une période pluvieuse importante, une forte sécheresse, lors de la fonte des neiges...) ;
- permettre de **voir des contrastes colorimétriques relativement simples** (teinte foncée dans environnement clair, ou inversement) :
 - longueurs d'onde dans le visible panchromatique noir et blanc généralement suffisant ;
- permettre d'**observer l'évolution d'un site dans le temps**, certains indices pouvant disparaître (remembrement, urbanisation...), d'autres évoluer avec le temps (désordre récurrent, remblayé périodiquement) ou pour identifier des leurres interprétables facilement sur images anciennes :
 - étude multi-dates ;
- permettre une **bonne vision de la surface des terrains**, notamment pour les désordres remblayés ou ceux de petite taille :
 - images prises à des périodes propices (hiver, début du printemps) pour que la végétation ne masque pas complètement le sol.

Certains de ces critères sont **contradictaires** en termes de types de photographies à étudier : par exemple, la nécessité d'observer des images à petite échelle (pour la recherche d'indices linéaires de grande taille) alors que la recherche d'indices ponctuels donnera de bons résultats uniquement sur des images à grande échelle.

Un compromis doit donc être recherché lors de toute étude de photo-interprétation, en fonction des objectifs de l'étude, des moyens à disposition et de la typologie locale des cavités (géologie, géomorphologie, profondeur et taille des cavités...).

Ainsi, pour un recensement d'indices de cavités souterraines pour lequel on ne disposerait que de missions IGN (pas de survol spécifique), les éléments suivants sont au minimum requis :

- **analyse stéréoscopique** :
 - images aériennes verticales avec recouvrement,
 - utilisation d'un stéréoscope à miroir doté d'oculaires de fort grossissement (x8) ;
- **analyse multi-dates** de missions IGN existantes :
 - étude systématique de la mission la plus ancienne⁵ (généralement années 1930-1940) et de la plus récente,
 - répartition des autres années le plus régulièrement possible entre les deux extrêmes,
 - étudier des missions avant et après les grandes modifications du territoire (remembrement, urbanisation...);
- **analyse multi-scalaire** :
 - 1/5 000 à 1/20 000 pour la recherche des indices de petite taille,
 - < à 1/25 000 pour les observations d'ensemble et la recherche d'indices structuraux linéaires (si l'analyse préalable montre la pertinence de cette analyse à petite échelle) ;
- **longueurs d'ondes du rayonnement** :
 - privilégier le panchromatique Noir et Blanc pour les contrastes colorimétriques,
 - dans la mesure du possible, étudier une mission couvrant les longueurs d'onde de l'infrarouge proche noir et blanc.

Il sera possible d'obtenir de meilleurs résultats (nombre et caractérisation d'indices) en mettant en œuvre des **survolés spécifiques en complément**, qui permettront de rechercher des indices non détectables sur les missions IGN classiques, grâce par exemple à des photographies verticales ou obliques prises à basse altitude, dans des longueurs d'ondes adaptées (infrarouge proche par exemple), à des époques ou dans des conditions météorologiques particulièrement propices, etc.

Les **photographies obliques** permettent en outre d'obtenir des **vues de détail** de l'ensemble du territoire étudié, ce qui permet de couvrir l'intégralité de la zone d'étude, d'interpréter facilement certains objets (dépôts agricoles, abreuvoirs...) et de préparer la reconnaissance de terrain.

Enfin, il peut être utile de faire réaliser la photo-interprétation par **deux thématiciens**, afin de croiser leur perception et leur approche.

⁵Comme vu dans les résultats des études de cas, les clichés les plus anciens sont souvent de mauvaise qualité et d'une échelle médiocre ; néanmoins, ces clichés sont contemporains des dernières carrières souterraines en exploitation et il est donc fortement conseillé de les étudier, même sommairement.

3.3 - Les limites de la photo-interprétation

Les indices recherchés sont très divers et pour certains d'entre eux peuvent n'avoir aucun lien avec la présence de cavités souterraines. Parmi les plus courants peuvent être cités :

- les **dépressions** peuvent correspondre à d'anciennes mares asséchées, d'anciens impacts des bombardements de la seconde guerre mondiale...,
- les **points en relief** peuvent correspondre à des pylônes de réseaux aériens, des dépôts d'origine agricole, des petits bâtiments...,
- les **points ou tâches sombres** peuvent correspondre à des mares ou des points d'eau, à des arbres arrachés dans les zones de déboisement, à un ancien point d'eau remblayé...,
- les **linéaments** peuvent correspondre à d'anciennes voies de communication, d'anciennes limites parcellaires...,
- les **arbres isolés** qui peuvent être les reliquats de vergers, haies ou boisements aujourd'hui disparus.

La photo-interprétation peut permettre dans certains cas d'interpréter en termes de leurres ces faux indices, grâce notamment à l'étude d'images d'un même site prises à plusieurs dates différentes, certaines missions permettant d'identifier ces leurres ; par exemple, l'identification d'une zone boisée sur une mission des années 1940 permettra de ne pas conserver en tant qu'indices des tâches ponctuelles sombres visibles sur cette zone sur une mission plus récente, réalisée après déboisement du site. Autre exemple, une mission prise à très basse altitude peut permettre de bien identifier des pylônes, qui apparaîtront comme des indices (points sombres) sur d'autres missions d'échelles plus petites.

Mais très souvent, seules des **investigations complémentaires permettront de lever le doute** : archive ou témoignage confirmant l'existence d'une cavité, désordre visible sur le terrain à l'emplacement de l'indice photographique, reconnaissance spécifique validant ou infirmant la présence d'une cavité, etc.

Ainsi et d'une manière générale, toute étude de photo-interprétation doit faire l'objet d'une validation terrain.

À noter que l'identification et le report cartographique des objets concernant l'**occupation ancienne du sol** (parcellaire, boisements, vergers, chemins...) sont préconisés lors de l'étude de la mission la plus ancienne, ces informations pouvant apporter une aide précieuse, non seulement pour éliminer des leurres sur les missions photographiques plus récentes, mais également lors de la recherche bibliographique, par exemple pour le report d'archives à partir de plans cadastraux anciens, dont le parcellaire correspond souvent à celui visible sur les clichés aériens les plus anciens.

Outre la génération de leurres, la photo-interprétation présente des **limites**, qui ne garantissent pas un repérage le plus exhaustif possible des indices :

- les missions IGN disponibles sur le site Geoportail ont rarement les **caractéristiques requises pour l'identification de cavités** : la photothèque de l'IGN à Saint-Mandé possédant de nombreuses missions non proposées sur le Géoportail, il est conseillé de prendre contact avec elle pour connaître les différentes missions existantes sur un territoire donné ;
- de nombreuses **zones sont masquées** et ne permettent pas de voir les éventuels indices présents : zones boisées, urbaines, agricoles avec végétation développée ;
- certains indices sont **visibles à certaines époques et invisibles à d'autres** : végétation, urbanisation... ;
- certains indices peuvent être **visibles sur certaines photographies et invisibles sur d'autres**, en fonction de leurs caractéristiques : longueurs d'onde utilisées, hauteur de prise de vue... ;

- des **incertitudes sur le positionnement** des indices subsistent, en lien avec les échelles des photographies, leur distorsion, leur qualité, le calage des photographies sur le plan ainsi que la possibilité d'erreur par le photo-interprète lors du report ;
- la **compétence et l'expérience** du photo-interprète vont grandement jouer sur le nombre, la nature et la qualité des indices repérés.

4 - Conclusion

La photo-interprétation d'images aériennes non satellitaires (photographies aériennes prises à partir de moyens aéroportés volant à basse altitude) est une **technique pertinente pour la recherche d'indices de cavités souterraines**, dans des contextes géologiques et géomorphologiques variés et pour des typologies de cavités souterraines également variées.

Cette technique, **non destructive et relativement peu onéreuse** (vis-à-vis d'investigations de type sondages par exemple), trouve toute sa place dans des études d'ensemble d'un territoire, visant à recenser et localiser les cavités, à partir de recherches bibliographiques et d'enquêtes de terrain. Dans ce cadre, la photo-interprétation apporte des **indices**, qui devront faire l'objet d'une **validation** : archives ou témoignages attestant de l'existence d'une cavité, formes de surface visibles sur le terrain, etc.

Pour obtenir les meilleurs résultats possibles, la photo-interprétation doit faire l'objet d'une **préparation soignée** :

- étude du **contexte territorial**,
- définition de la **typologie des cavités** recherchées et de ses formes de surface associées.

Cette phase préparatoire permettra de sélectionner les photographies aériennes les plus adaptées, en termes de :

- **types de photographies** : verticales et éventuellement obliques ;
- **longueurs d'onde du rayonnement électro-magnétique** : noir et blanc, infrarouge proche, éventuellement couleur ;
- **résolution spatiale** (échelle de la photographie) : grande échelle et éventuellement petite échelle (< 1/25 000) ;
- **date de prise de vue** : choix des périodes les plus propices (peu de végétation, après des intempéries importantes...) ;
- **modes d'exploitation** : stéréoscopie et éventuellement vision directe (photos obliques), études multi-dates, multi-scalaire, éventuellement multi-interprètes.

Si les missions disponibles immédiatement (missions IGN consultables sur le Géoportail) ne permettent pas d'atteindre les objectifs attendus, un survol spécifique peut être nécessaire.

Les études de cas réalisées montrent que les principaux critères qualitatifs à remplir, pour que la photo-interprétation soit utile, sont les suivants :

- **analyse stéréoscopique** avec fort grossissement,
- **analyse multi-dates** en partant des années les plus anciennes,
- **analyse multi-scalaire** privilégiant les grandes échelles,
- **images noir et blanc** (panchromatique et, le cas échéant infrarouge).

Suivant les contextes et les types de photographies utilisés, la photo-interprétation donne de plus ou moins bons résultats : les études de cas montrent ainsi des variations dans le nombre d'objets repérés sur les photographies aériennes, associés après validation à des indices de cavités souterraines : 10 % à Thoiré-sur-Dinan, 60 % à Saint-Cyr-en-Bourg.

Le pourcentage d'objets non associés après validation à des cavités souterraines (de 40 à 90 % pour les études de cas) est à mettre en relation principalement avec les **limites** de la technique de photo-interprétation :

- un certain nombre d'objets s'avère correspondre à des **leurres** : artefacts agricoles, dépôts agricoles, mares asséchées... ; si certains pourront être facilement qualifiés en leurres à l'issue des investigations d'ensemble, d'autres ne trouveront pas d'explications sans investigations destructives à leur aplomb (sondages) ;
- certaines zones des images aériennes sont **masquées** : les forêts et boisements, les zones urbaines, les terres agricoles en période de végétation haute... ; la photo-interprétation ne donnera pas d'informations sur ces zones, qui présenteront un déficit d'objets visibles ;
- les images aériennes ont rarement l'ensemble des **caractéristiques requises pour une efficacité optimale** : choisies parmi celles rendues disponibles par l'IGN, un compromis doit être recherché entre les différents critères à privilégier.

D'autres limites sont à l'origine d'erreurs et de la non exhaustivité du repérage d'indices :

- des **incertitudes sur la localisation** des indices subsistent, en lien avec les échelles des photographies, la distorsion des images, leur qualité, le calage des photographies sur le plan et la possibilité d'erreur humaine lors du report ;
- la **compétence et l'expérience du photo-interprète** va grandement jouer sur le nombre et la qualité des indices repérés.

Cet état de l'art constitue la base sur laquelle s'appuiera le PCI « Applications satellitaires et télécommunications » du Cerema pour déterminer l'apport possible des images satellitaires dans la recherche d'indices de cavités souterraines. Ces images satellitaires doivent notamment apporter des éléments prouvant leur intérêt pour :

- le **repérage d'indices ponctuels de dimensions métriques** (puits, petits fontis, arbres...),
- le **repérage d'indices en relief** (normal ou inversé),
- le **repérage d'indices colorimétriques**,
- le **repérage d'indices évolutifs dans le temps**, identifiables par la photo-interprétation classique grâce à l'étude multi-dates,
- le **repérage automatique ou semi-automatique** d'indices.

Parallèlement au travail mené par le PCI, la DTer Ouest va mener en 2015 une photo-interprétation stéréoscopique numérique (logiciel Geoview) d'images Pléiades acquises en 2014 sur les deux territoires des études de cas, afin de déterminer quels types d'indices y sont visibles.

Les résultats de ces travaux conditionneront la suite de l'action qui idéalement devrait aboutir à la rédaction de recommandations pour l'utilisation d'images aériennes et satellitaires dans le cadre de la recherche et la localisation de cavités souterraines.

L'Ingénieur chargée d'études

Le Chef du Groupe Environnement-Risques-Géotechnique

N. BÉRENGER

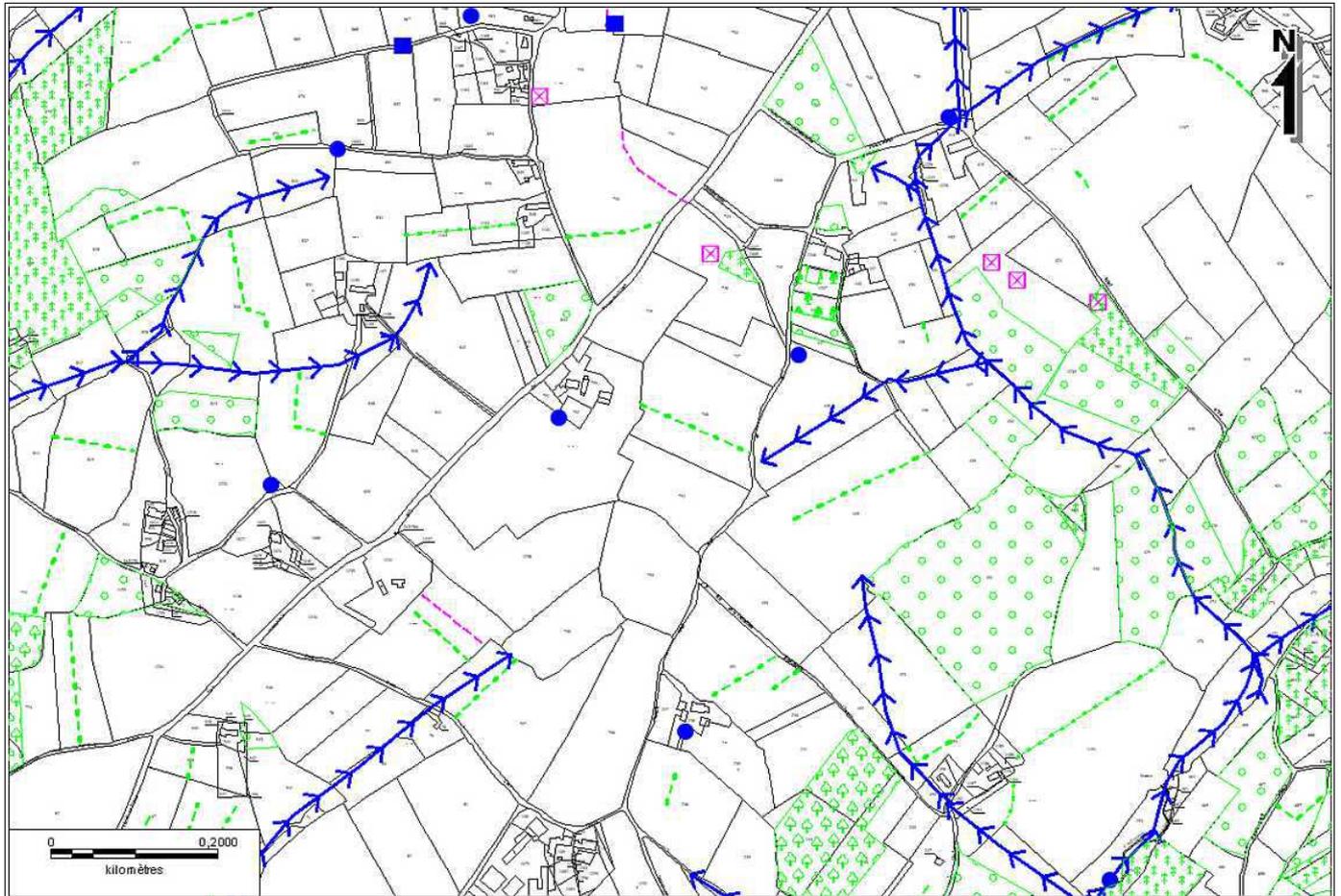
S. HERVÉ

5 - Bibliographie

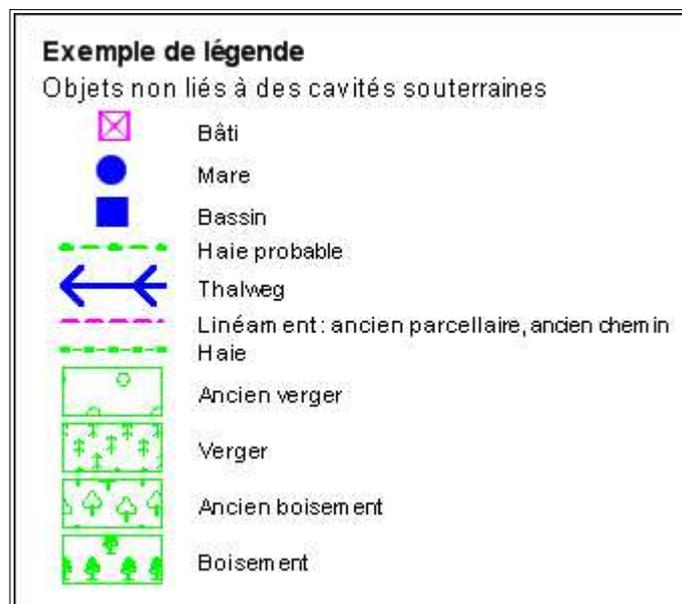
- [1] ADAM C., MANIER A., BÉRENGER N., DURVILLE J.-L., *Les marnières de Haute-Normandie – Méthodologies d'étude et de prévention*, guide technique LCPC, 112 p., **2008**.
- [2] BARRAUD D., *Recensement et carte d'indices de cavités souterraines Saint-Cyr-en-Bourg (49)*, Rapport Cerema DterOuest n° C13OA0043, **à paraître**.
- [3] BÉRENGER N., *Méthode de recherche et de localisation des cavités souterraines de Haute-Normandie : une réponse adaptée à une problématique spécifique*, Mémoire Ingénieur CNAM, 188 p., **2004**.
- [4] BÉRENGER N., *Définition d'une méthodologie de recensement des cavités adaptée au contexte saumurois – Opération de recherche PRECAS sujet 6*, Rapport CETE de l'Ouest DLRC Angers n° 32201242NBE01, 43 p., **2013**.
- [5] CENTRE CANADIEN DE TÉLÉDÉTECTION, *Notions fondamentales de télédétection*, Cours Tutoriel téléchargeable sur le site Internet rncan.gc.ca, 266 p., **2014**.
- [6] DORIDOT M., CHAHINE M., *L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain*, guide technique LCPC, 131 p., **1999**.
- [7] DURVILLE J.-L., POTHÉRAT P., TOULEMONT M., TRITSCH J.-J., *Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines*, guide technique LCPC, 130 p., **2002**.
- [8] GAMBERT J.-L., *Thoiré-sur-Dinan – recensement et carte d'indices de cavités souterraines*, Rapport CETE de l'Ouest LRPC d'Angers n° 430772104, 24 p., **2009**.

Annexes

Annexe 1 : extrait de la photo-interprétation réalisée sur Thoiré-sur-Dinan – objets non liés à des cavités souterraines



Report des objets sur fonds cadastral numérique



Annexe 2 : extrait de la photo-interprétation réalisée sur Saint-Cyr-en-Bourg – objets potentiellement liés à des cavités souterraines



Report des indices sur fonds cadastral numérique

Exemple de légende	
Indices potentiellement liés à des cavités souterraines	
⊕	Puisard
○	Dépression
→	Descenderie
●	Trou
---	Coteau
●	Tâche sombre
●	Arbre isolé
●	Tâche claire

Connaissance et prévention des risques – Développement des infrastructures – Énergie et climat – Gestion du patrimoine d'infrastructures – Impacts sur la santé – Mobilités et transports – Territoires durables et ressources naturelles – Ville et bâtiments durables

Document consultable et téléchargeable sur le site <http://www.cete-ouest.developpement-durable.gouv.fr/>

*Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable de l'auteur devra être demandé.*

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Direction territoriale Ouest : MAN – 9 rue Viviani – BP 46223 – 44262 Nantes cedex – Tél : +33(0)2 40 12 83 01

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

Établissement public : Siret 130 018 310 00 222 www.cerema.fr