

Portion visible d'une cible éloignée au-dessus de la mer

Mesure quantitative de la fraction visible d'un objet de dimensions connues, et confrontation aux prédictions de modèles géométriques concurrents

Rédacteur	Contact	Version	Date	Licence
Terre Étendue	terre-etendue-islam.fr	1.0	3 septembre 2026	CC BY 4.0

02 Résumé

Le bloc-titre ci-dessus constitue la rubrique 01. La numérotation suit celle du cahier des charges, où le titre est la première rubrique.

Ce protocole définit une expérience photographique destinée à mesurer, sur une cible éloignée observée au-dessus de la mer, la **fraction de sa hauteur qui reste visible**, puis à confronter cette mesure aux prédictions de modèles géométriques concurrents. La grandeur mesurée est continue, ce qui la rend beaucoup plus discriminante que la seule alternative visible ou invisible.

La cible peut être un navire, un phare, une éolienne, un bâtiment ou un relief. Sa nature n'entre pas dans les calculs : seules comptent sa hauteur, l'altitude de sa base, sa position, la distance, et la géométrie de la ligne de visée. Toutes ces grandeurs sont établies par des sources indépendantes de la photographie.

L'acquisition et l'analyse sont séparées. Au moment du déclenchement, l'opérateur n'a besoin de connaître ni la distance, ni la hauteur de la cible, ni la prédiction attendue. Les paramètres sont reconstitués ensuite ; une donnée reconstruite a posteriori n'est jamais présentée comme une mesure directe.

Les critères de sélection, de qualité d'image, de mesure, de modélisation atmosphérique et de décision sont fixés et déposés **avant** l'examen des résultats. La conclusion prend exactement trois valeurs : compatible, incompatible, indéterminé. Aucun résultat n'est traité différemment selon le sens dans lequel il va.

CE QUE LE PROTOCOLE NE FAIT PAS

Il ne mesure pas le rayon de la Terre, il ne démontre aucun modèle, et il ne considère aucun modèle comme établi d'avance. Il produit une mesure et une comparaison, avec leurs incertitudes. Un résultat indéterminé — le plus fréquent quand les données atmosphériques manquent — n'est une preuve ni pour ni contre quoi que ce soit.

– Écarts au cahier des charges

Le cahier des charges demande que toute erreur scientifique ou méthodologique soit signalée avant intégration. Sept points ont été corrigés. Le protocole qui suit intègre les corrections de la troisième colonne.

N°	Point	Ce qui ne va pas	Correction retenue
01	Seuils géométriques fixes (§ 3 du cahier)	Le cahier impose au moins 100 m d'altitude et au moins 50 km de distance. Ces valeurs ne garantissent pas un signal mesurable. Depuis 100 m à 50 km, la hauteur occultée vaut 16,1 m sans réfraction, 6,4 m à $k = 0,20$, et zéro dès $k \geq 0,49$. Un seuil en kilomètres ne peut donc pas définir la validité d'une observation.	Les deux seuils sont supprimés. Aucune altitude ni aucune distance minimale n'est posée a priori. L'admissibilité d'une configuration se calcule, observation par observation, à partir des données récoltées et des enveloppes de prédiction : elle est admise si l'écart entre les prédictions des modèles, pris au bord d'enveloppe le plus défavorable, atteint cinq fois l'incertitude de mesure (§ 28.2).
02	Conduit d'évaporation en optique (§ 7 du cahier)	Le cahier range le <i>ducting</i> parmi les régimes à traiter, sans distinguer le domaine radio du domaine optique. Le conduit d'évaporation marin est piloté par le gradient d'humidité, dont le terme dans la réfractivité vaut 89,8 N en radioélectrique à $e = 20$ hPa et $T = 288$ K, contre -0,78 N en optique : un rapport de 115. Transposer un raisonnement radio à une expérience optique est une erreur de domaine.	Le protocole traite séparément le conduit optique, qui exige une inversion thermique d'environ +12,9 K/100 m, et le conduit radio, qui n'est pas le sujet. Les critères de reconnaissance sont établis sur les signatures visibles (§ 11).
03	Coefficient de réfraction moyen (§ 9 du cahier)	Le cahier envisage un coefficient global. Le tracé de rayon montre qu'une couche d'inversion de 60 m à $k = 0,80$ surmontée d'une atmosphère standard à $k = 0,13$ se comporte comme un k homogène de 0,563 , et non comme la moyenne pondérée en hauteur, qui vaut 0,180. Le rayon rasant passe l'essentiel de son trajet à faible pente dans la couche basse.	Le protocole exige un profil vertical résolu dans les premières dizaines de mètres au-dessus de l'eau, et non une valeur moyenne ; à défaut, l'incertitude reportée couvre l'écart entre les deux traitements.
04	Photographie vide (§ 14 du cahier)	Le cahier écarte les photographies où la cible n'apparaît pas. Écarter systématiquement les non-détections introduit un biais de sélection : une cible absente est une information, à condition que sa taille apparente prédite ait dépassé la limite de détection du système.	Une non-détection est retenue et classée <i>informative</i> si la taille angulaire prédite de la partie attendue excède trois fois la résolution effective mesurée ; sinon elle est classée <i>indéterminée</i> . Les deux cas sont publiés (§ 19).
05	Modèle concurrent non spécifié (§ 23 du cahier)	Comparer à « un modèle de surface plane » n'a de sens que si ce modèle est complètement spécifié. Un modèle plan assorti d'une loi de réfraction libre reproduit n'importe quelle observation, et cesse d'être réfutable.	Chaque modèle comparé est déclaré avec sa géométrie et sa loi de propagation, déposées avant l'observation, avec le même nombre de paramètres libres autorisés (§ 29).
06	Hauteur de cible et altitude de base confondues (§ 5 et 6 du cahier)	L'exemple numérique demandé ne précise pas l'altitude de la base de la cible. Une cible de 100 m dont la base est à 20 m d'altitude n'est pas une cible de 100 m au niveau de la mer : son horizon propre vaut celui de 120 m, pas celui de 100 m.	Les équations du § 9 sont écrites avec une altitude de base explicite. L'exemple du § 10 déclare que la base est au niveau moyen de la mer, conformément à l'énoncé.
07	Quatre verdicts (versions antérieures de ce document)	Les documents préparatoires distinguaient recevabilité et conclusion en quatre catégories. Le cahier en demande exactement trois.	La recevabilité devient un filtre préalable, sans valeur de conclusion. La conclusion scientifique prend exactement trois valeurs : compatible, incompatible, indéterminé (§ 28).

Tableau 1 — corrections apportées au cahier des charges, et où elles sont intégrées.

03 Question scientifique

Pour une cible dont la position, l'altitude de base et la hauteur sont établies indépendamment de la photographie, et pour un observateur dont la position et l'altitude sont établies de même :

QUESTION

Quelle fraction de la hauteur de la cible est effectivement observable sur l'image, quelle fraction chaque modèle géométrique considéré prédit visible, et l'écart est-il assez grand pour discriminer ces modèles compte tenu de toutes les incertitudes ?

La question n'est pas « l'objet est-il visible ? ». Une réponse binaire perd l'essentiel de l'information et se laisse expliquer par trop de causes. La fraction visible est continue, bornée entre 0 et 1, mesurable avec une incertitude quantifiable, et prédite différemment par les modèles en concurrence.

04 Hypothèses

Deux modèles au moins sont mis en concurrence. Aucun n'est tenu pour établi, aucun ne reçoit le statut de référence, et les deux subissent exactement le même traitement.

4.1 Modèle S — surface sphérique

La surface de référence est une sphère de rayon $R = 6\,371\,008,8\text{m}$, valeur R_1 de l'IUGG déduite de l'ellipsoïde GRS80. La lumière se propage selon un rayon dont la courbure est celle qu'impose le profil vertical d'indice de réfraction, paramétrée par le coefficient k défini au § 11. La surface occulte la partie de la cible située sous le rayon rasant.

4.2 Modèle P — surface plane

La surface de référence est un plan. Aucune partie de la cible n'est occultée par la surface, à quelque distance que ce soit. La fraction visible prédite vaut donc 1 partout, sous réserve de la limite de détection du système optique et de l'extinction atmosphérique, qui sont traitées aux §§ 15 et 20 et qui s'appliquent identiquement aux deux modèles.

4.3 Contrainte commune

Un modèle n'est admis dans la comparaison que s'il est déposé avec sa géométrie *et* sa loi de propagation, et avec un nombre de paramètres libres déclaré. Une loi de propagation laissée libre reproduit n'importe quelle observation : elle n'est pas réfutable, donc pas comparable. Le nombre de paramètres libres entre dans la comparaison statistique (§ 27).

CE QUE LE PROTOCOLE NE SUPPOSE PAS

Il ne suppose pas que le modèle S est vrai. La valeur de R et la loi de réfraction y sont des *hypothèses de travail dont on déduit une prédiction testable*, au même titre que l'absence d'occultation dans le modèle P. L'expérience porte sur l'écart entre prédiction et mesure, jamais sur la vérité supposée de l'une des deux.

05 Objectifs

1. Mesurer, sur une image dont l'intégrité est établie, la fraction visible d'une cible de dimensions connues, avec son incertitude.
2. Établir, pour la même configuration, la fraction visible prédite par chaque modèle déposé, avec l'enveloppe d'incertitude que produisent les paramètres géodésiques et atmosphériques.
3. Déterminer si l'écart entre mesure et prédiction dépasse le seuil déposé avant l'observation.
4. Rendre l'un des trois verdicts du § 28 et publier l'ensemble des données permettant à un tiers de refaire l'analyse depuis les fichiers d'origine.

06 Définitions

6.1 Grandeurs

- **Cible** — objet éloigné dont la fraction visible est mesurée.
- **Hauteur de la cible H** — distance verticale entre la base de la cible et son sommet, en mètres.
- **Altitude de base z_b** — altitude de la base de la cible au-dessus de la surface de référence adoptée, en mètres.
- **Altitude de l'observateur h** — altitude de l'axe optique au-dessus de la même surface, en mètres.
- **Distance D** — longueur de la géodésique entre le pied de l'observateur et le pied de la cible, en mètres.
- **Hauteur occultée c** — hauteur, comptée depuis la base de la cible, du plus bas point que le modèle prédit visible.
- **Fraction visible f** — $f = (H - c)/H$, bornée à l'intervalle $[0 ; 1]$. C'est la grandeur comparée.
- **Coefficient de réfraction k** — rapport de la courbure du rayon à celle de la surface de référence (§ 11).
- **Résolution effective** — plus petite structure réellement séparée sur l'image, mesurée et non calculée (§ 20).

6.2 Statut d'un énoncé

Chaque valeur figurant dans un rapport porte l'une de ces huit étiquettes, et une seule. Un tableau de résultats où l'étiquette manque n'est pas recevable.

Statut	Définition
Fait mesuré	grandeur obtenue par un instrument, sur place, au moment de l'observation, avec l'instrument et sa chaîne d'étalonnage identifiés
Donnée externe	grandeur tirée d'une source indépendante de la photographie, datée et citable : carte, fiche d'ouvrage, modèle numérique de terrain, registre
Hypothèse	énoncé posé pour déduire une prédiction, sans être lui-même mesuré dans l'expérience
Calcul	opération déterministe sur des faits mesurés, des données externes et des hypothèses
Modèle	ensemble cohérent d'hypothèses géométriques et de propagation, déposé avant l'observation
Incertitude	intervalle associé à une grandeur, évalué selon le guide JCGM 100:2008, avec son type et son facteur d'élargissement
Observation photographique	le fichier d'origine et ce qu'on y mesure ; c'est la donnée observationnelle primaire
Interprétation	énoncé qui va au-delà de la comparaison chiffrée ; jamais mêlée aux six catégories précédentes dans un tableau de résultats

Tableau 2 — statut des énoncés. La distinction est la règle fondamentale du protocole.

07 Fondement théorique

Sur une surface convexe, un observateur placé à une altitude h voit la surface jusqu'à un point de tangence. Au-delà, la surface s'interpose entre lui et tout objet dont le sommet est plus bas que le rayon rasant. La hauteur occultée croît avec la distance ; la fraction visible décroît, atteint zéro à une distance finie, et cette décroissance a une forme précise que le § 9 établit.

Sur une surface plane, aucune occultation par la surface n'existe. La cible reste entièrement visible à toute distance, sa taille angulaire décroît comme $1/D$, et sa disparition éventuelle relève de la résolution du système ou de l'extinction atmosphérique, non de la géométrie.

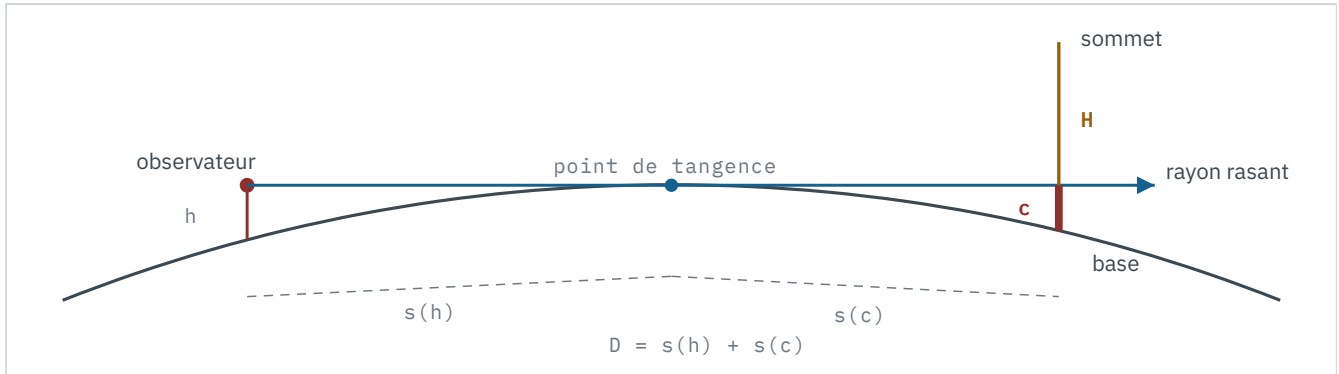
Ces deux comportements sont quantitativement distincts, et c'est ce qui rend l'expérience possible. Ils ne le sont pas partout : à courte distance les deux modèles prédisent la même chose, et il existe des géométries où l'écart

prédit tombe sous l'incertitude de mesure. Le § 28 exige donc que la géométrie choisie sépare les prédictions d'une quantité déclarée d'avance.

La réfraction atmosphérique intervient dans le modèle S comme une correction physique réelle, non comme un paramètre d'ajustement. Elle courbe le rayon vers les indices croissants, donc vers le bas dans une atmosphère normale, ce qui recule l'horizon et diminue la hauteur occultée. Son amplitude est bornée par la physique du profil vertical, et le § 11 établit ces bornes avant l'observation.

08 Géométrie

Le rayon rasant est tangent à la surface de référence en un point unique. La distance entre le pied de l'observateur et le pied de la cible se décompose en deux arcs : celui qui sépare l'observateur du point de tangence, et celui qui sépare le point de tangence du pied de la cible. Le second correspond exactement à la hauteur occultée.



Construction de la hauteur occultée. Le rayon rasant est tangent à la surface au point de tangence, où la tangente est horizontale ; la distance se décompose en deux arcs, celui de l'observateur et celui de la partie cachée de la cible. La partie de la cible située sous le rayon, de hauteur c , n'est pas visible.

Cette décomposition est exacte et ne fait aucune approximation de petit angle. Elle vaut pour le modèle S avec R, et pour le modèle S avec réfraction en remplaçant R par le rayon effectif du § 11. Elle ne s'applique pas au modèle P, qui ne prédit aucune occultation.

Trois grandeurs en découlent : la **distance critique**, à laquelle la base cesse d'être visible ; la **distance limite**, à laquelle le sommet cesse de l'être ; et entre les deux, la **fraction visible**, qui décroît de 1 à 0. C'est cette décroissance, et non les deux distances seules, qui porte l'information.

09 Équations

9.1 Arc de tangence

Pour une altitude x au-dessus d'une sphère de rayon R , l'arc au sol entre le pied du point et son point de tangence vaut :

$$s(x) = R \cdot \arccos[R / (R + x)]$$

x et R en mètres ; le résultat est un arc mesuré sur la sphère.

9.2 Distances critiques

La base de la cible, située à l'altitude z_b , cesse d'être visible au-delà de D_{crit} . Le sommet cesse de l'être au-delà de D_{lim} .

$$D_{\text{crit}} = s(h) + s(z_b) \quad D_{\text{lim}} = s(h) + s(z_b + H)$$

pour une base au niveau de la surface, $z_b = 0$, $D_{\text{crit}} = s(h)$ et $D_{\text{lim}} = s(h) + s(H)$.

9.3 Hauteur occultée et fraction visible

La tangente coupe D en deux arcs : $s(h)$ côté observateur et $s(z_v)$ côté cible, où z_v est l'altitude du plus bas point visible. Pour $D > D_{\text{crit}}$:

$$z_v = R \cdot \{ \sec[(D - s(h)) / R] - 1 \} \quad c = z_v - z_b$$

z_v est l'altitude du plus bas point visible ; l'argument de la sécante est un angle géocentrique, en radians. L'altitude de base n'entre pas dans cet argument : elle se retranche après.

$$f = (H - c) / H, \text{ bornée à } [0 ; 1]$$

grandeur comparée entre modèles et mesure.

Cette forme fermée a été vérifiée contre la résolution numérique directe de $s(h) + s(c) = D$: les deux méthodes coïncident à mieux d'un micromètre sur toute la plage utile.

9.4 Comparaison aux approximations classiques

L'approximation usuelle remplace l'arc par la corde et développe la sécante au premier ordre :

$$c \approx (D - \sqrt{2Rh})^2 / (2R)$$

approximation classique ; à ne pas employer sans avoir borné son erreur.

h (m)	arc exact (m)	corde (m)	$\sqrt{2Rh}$ (m)	arc - $\sqrt{2Rh}$
2	5 048,2	5 048,2	5 048,2	-0,00
100	35 695,7	35 696,1	35 696,0	-0,23
800	100 958,1	100 966,6	100 963,4	-5,28
3 107	198 930,6	198 995,2	198 971,0	-40,42

Tableau 3 — distance d'horizon selon trois formulations. L'écart entre l'arc exact et $\sqrt{2Rh}$ reste sous 6 m jusqu'à 800 m d'altitude, mais atteint 40 m à 3 107 m.

D (km)	c exact (m)	c approché (m)	écart (m)
110,000	6,416	6,409	0,007
120,000	28,457	28,441	0,016
130,000	66,193	66,169	0,025
136,654	100,001	99,970	0,031

Tableau 4 — hauteur occultée, exacte contre approchée, pour $h = 800$ m. L'écart reste sous 4 cm, donc négligeable devant toute incertitude de mesure ; l'approximation est acceptable ici, et cette conclusion doit être revérifiée pour toute autre géométrie.

9.5 Modèle P

Le modèle P prédit $c = 0$ et $f = 1$ pour toute distance. Sa taille angulaire prédite vaut H/D en radians, à comparer à la résolution effective du § 20.

10 Exemple numérique

Configuration imposée par le cahier des charges : observateur à **800 m** au-dessus du niveau moyen de la mer, cible de **100 m** de hauteur, base au niveau moyen de la mer ($z_b = 0$), ligne de visée entièrement au-dessus de l'eau, **sans réfraction** ($k = 0$), sur une sphère de rayon $R = 6\,371\,008,8$ m.

10.1 Résultats intermédiaires

Grandeur	Valeur	Unité
$R / (R + h)$	0,999874447	—
$\arccos[R / (R + h)]$	0,015846493	rad
$s(800\text{ m})$	100 958,147	m
$s(100\text{ m})$	35 695,729	m
D_{crit}	100 958,147	m
D_{lim}	136 653,876	m
$\sqrt{(2R \cdot 800)}$	100 963,429	m
écart arc – $\sqrt{(2Rh)}$	-5,282	m

Tableau 5 — valeurs intermédiaires, avec leurs unités. Chacune est recalculée à chaque génération du document.

10.2 Résultats

1. Distance à l'horizon de l'observateur : **100,958 km**. Au-delà, la base de la cible est occultée.
2. Distance à laquelle le sommet cesse d'être géométriquement visible : **136,654 km**.
3. Distance à laquelle la cible entière est occultée : la même, **136,654 km** ; au-delà la hauteur occultée dépasse 100 m.
4. Hauteur occultée en fonction de la distance : tableau 6.

D (km)	c fermée (m)	c dichotomie (m)	c approchée (m)	fraction visible
50,000	0,000	0,000	0,000	1,0000
100,958	0,000	0,000	0,000	1,0000
110,000	6,416	6,416	6,409	0,9358
120,000	28,457	28,457	28,441	0,7154
130,000	66,193	66,193	66,169	0,3381
136,654	100,001	100,001	99,970	0,0000
140,000	119,627	119,627	119,593	0,0000

Tableau 6 — hauteur occultée et fraction visible, $h = 800$ m, $H = 100$ m, $k = 0$. La colonne « dichotomie » est une résolution numérique indépendante de la formule fermée.

10.3 Vérification indépendante

Trois méthodes ont été comparées. La formule fermée en sécante et la résolution numérique de $s(h) + s(c) = D$ coïncident à mieux d'un micromètre : elles expriment la même construction, l'une analytiquement, l'autre par bisection, et leur accord ne teste que l'implémentation.

L'approximation classique, elle, repose sur deux simplifications distinctes : la corde remplace l'arc, et la sécante est développée au premier ordre. Les deux erreurs sont de signes opposés et se compensent partiellement, ce qui

explique un écart résiduel de 3,1cm seulement à 136,654km alors que chaque terme pris séparément vaut plusieurs mètres. Cette compensation est fortuite : elle dépend de la géométrie et ne doit pas être généralisée.

CE QUE CET EXEMPLE N'ÉTABLIT PAS

Ces valeurs sont des **prédictions du modèle S sans réfraction**, c'est-à-dire d'un cas physiquement irréalisable : l'atmosphère courbe toujours les rayons. Elles servent de borne, pas de prévision. La prédiction réelle du modèle S est l'enveloppe du § 11, sensiblement plus favorable à la visibilité.

11 Réfraction atmosphérique

11.1 Coefficient et rayon effectif

Le coefficient de réfraction k est le rapport de la courbure du rayon à celle de la surface. Dans une atmosphère à gradient d'indice constant, tout le § 9 reste valable en remplaçant R par le rayon effectif :

$$R_{\text{eff}} = R / (1 - k)$$

valable pour $k < 1$. Pour $k \geq 1$ le rayon ne s'élève plus au-dessus de la surface et la construction du § 8 ne s'applique plus.

11.2 Du gradient thermique au coefficient

Pour la lumière visible, la réfractivité de l'air vaut sensiblement $n - 1 = 79 \times 10^{-6} P/T$ avec P en hPa et T en K. En combinant avec l'équilibre hydrostatique $dP/dh = -Pg/(R_d T)$, on obtient :

$$k = 503,3 \cdot (P/T^2) \cdot (0,0342 + dT/dh)$$

P en hPa, T en K, dT/dh en K/m. La constante est $R \cdot 79 \times 10^{-6}$ et le terme 0,0342 K/m est g/R_d , le gradient autoconvectif.

dT/dh (K/km)	k
-34,16	0,0000
-13,00	0,1300
-6,50	0,1699
0,00	0,2098
25,00	0,3634
50,00	0,5169
100,00	0,8240
128,65	1,0000

Tableau 7 — correspondance gradient-coefficient à 1013,25 hPa et 288,15 K. Le gradient autoconvectif annule k ; le seuil de conduit optique est en gras.

11.3 Les six régimes

Régime	k	Conditions physiques
Aucune réfraction	$k = 0$	cas de référence théorique, physiquement irréalisable dans l'atmosphère ; correspond au gradient autoconvectif -34 K/km
Réfraction standard	$k \approx 0,13$ à $0,17$	gradient de -13 à -6 K/km ; atmosphère bien mélangée, cas courant de jour au-dessus de la terre
Réfraction forte	$k \approx 0,20$ à $0,40$	air isotherme ou légère inversion : gradient de -2 à +31 K/km ; fréquent au-dessus d'une mer plus froide que l'air
Réfraction très forte	$k \approx 0,40$ à $0,80$	inversion marquée, gradient de +31 à +96 K/km sur la couche traversée ; physiquement admissible, à documenter
Inversion et mirage supérieur	$k \approx 0,80$ à 1	inversion intense, gradient de +96 à +129 K/km ; images renversées au-dessus de l'objet, déformation verticale mesurable
Conduit optique	$k \geq 1$	exige un gradient d'au moins +12,9 K/100 m soutenu sur la couche où passe le rayon ; le rayon épouse ou dépasse la courbure de la surface

Tableau 8 — régimes de réfraction et conditions physiques correspondantes.

11.4 Conduit optique et conduit radio : ne pas confondre

Le conduit d'évaporation marin, abondamment documenté en propagation radioélectrique, est piloté par le gradient d'humidité. Le terme humide de la réfractivité vaut environ $3,73 \times 10^5 \text{ e}/T^2$ en radio, soit **+89,8N** à $e = 20 \text{ hPa}$ et $T = 288 \text{ K}$, contre environ $-11,3 \text{ e}/T$ en optique, soit **-0,78N** : un rapport de **115** en valeur absolue, et de signe opposé.

Un conduit optique ne peut donc pas être produit par l'humidité : il exige une inversion thermique d'au moins **+12,9K/100m** soutenue sur la couche traversée. Invoquer un conduit d'évaporation pour expliquer une observation optique est une erreur de domaine, et le protocole la refuse.

11.5 Le profil ne se moyenne pas

Le rayon rasant passe l'essentiel de son trajet à faible pente près de la surface. Une couche basse anormale y pèse donc bien plus que sa part en hauteur. Un traçage de rayon par quadrature dans un profil à deux couches — $k = 0,80$ sous 60 m, $k = 0,13$ au-dessus — donne un comportement identique à celui d'un k homogène de **0,563**, alors que la moyenne pondérée en hauteur vaut 0,180.

CONSÉQUENCE OPÉRATOIRE

Un coefficient moyen, une valeur de manuel ou une climatologie ne suffisent pas. Ce qui est exigé est le profil vertical *résolu dans les premières dizaines de mètres au-dessus de l'eau* (§ 21). À défaut, l'incertitude reportée doit couvrir l'écart entre les deux traitements, soit ici un facteur trois sur k .

11.6 Validation du rayon effectif par traçage de rayon

L'approximation du rayon effectif a été comparée à une intégration exacte de l'invariant de Bouguer $n(r) \cdot r \cdot \sin z = \text{cte}$ dans un profil d'indice linéaire.

k	traçage (m)	R_{eff} (m)	écart (m)
0,00	100 957,99	100 958,15	-0,162
0,13	108 238,82	108 239,23	-0,411
0,25	116 577,36	116 577,95	-0,591
0,50	142 779,89	142 780,12	-0,229

Tableau 9 — arc au sol entre le point rasant et 800 m d'altitude. L'accord sub-métrique valide l'emploi de R_{eff} pour $k \leq 0,5$. Au-delà, l'écart croît et le traçage devient obligatoire.

11.7 Interdiction d'ajustement

La valeur de k retenue, ou l'intervalle retenu, est déposée avant l'analyse et justifiée par les données atmosphériques du § 21. Une réfraction plus forte ne peut jamais être introduite après coup pour rendre compte d'un écart constaté, dans un sens comme dans l'autre. Si les données ne permettent pas de borner k , l'observation est classée indéterminée (§ 28), et non expliquée.

12 Géodésie

12.1 Systèmes de référence

Toutes les positions sont exprimées dans un repère déclaré, avec son époque. Le rapport nomme explicitement le système, le modèle de géoïde, la référence verticale et, le cas échéant, la transformation appliquée entre deux systèmes.

Il faut distinguer trois surfaces qui ne coïncident pas : l'**ellipsoïde**, sur lequel se calcule la géodésique ; le **géoïde**, auquel se rapportent les altitudes ; et la **sphère de référence** du § 9, qui est une commodité de calcul. L'écart entre

géoïde et ellipsoïde atteint plusieurs dizaines de mètres et affecte directement h et z_b : le confondre avec zéro est une erreur de plusieurs dizaines de mètres sur l'altitude, donc de plusieurs mètres sur la hauteur occultée.

12.2 Sphère ou ellipsoïde

La sphère de rayon $R_1 = (2a + b)/3 = 6\,371\,008,8\text{ m}$ est une approximation. Le rayon de courbure réel de l'ellipsoïde dépend de la latitude et de l'azimut de la visée : il va du rayon méridien à l'équateur, 6335,4 km, à la grande normale au pôle, 6399,6 km. L'écart atteint 64,2 km, soit 1,01 %.

Le protocole exige donc, pour chaque observation, le **rayon de courbure normal à l'azimut de la visée** (rayon d'Euler) calculé à la latitude du trajet, et non R_1 . La différence est quantifiée au rapport : substituer R_1 au rayon d'Euler peut changer la hauteur occultée de plusieurs pour cent, ce qui est supérieur à l'erreur de l'approximation corde-contre-arc du § 9.4.

12.3 Sources et précisions

Poste	Source admise	Référentiel	Incertitude typique
Position horizontale de l'observateur	récepteur GNSS bi-fréquence en post-traitement, ou positionnement sur un point géodésique publié	ITRF / ETRS89	$\pm 0,1$ à 5 m
Altitude de l'observateur	hauteur ellipsoïdale GNSS convertie en altitude par un modèle de géoïde publié, plus la hauteur mesurée de l'axe optique au-dessus du sol	ellipsoïde GRS80 → géoïde	$\pm 0,3$ à 2 m
Position de la cible	fiche officielle de l'ouvrage, relevé géodésique, base cartographique nationale ; pour un navire, position horodatée d'un registre	ITRF / système national	± 1 à 50 m
Altitude de la base de la cible	modèle numérique de terrain officiel ; pour un ouvrage côtier ou un navire, niveau d'eau à l'heure exacte, corrigé de la marée et du zéro hydrographique	altitude normale ou orthométrique	$\pm 0,2$ à 2 m
Hauteur de la cible	plan coté, fiche technique du constructeur, liste officielle de feux, spécification de navire ; jamais déduite de la photographie	—	$\pm 0,1$ à 1 m
Distance	géodésique sur l'ellipsoïde calculée par un algorithme publié et vérifiable	GRS80 / WGS84	$\pm$ quelques mètres
Azimut	azimut géodésique direct issu du même calcul	GRS80 / WGS84	$\pm 0,01^\circ$
Profil intermédiaire	échantillonnage du modèle de terrain et de la bathymétrie le long de la géodésique, au pas de 500 m au plus	id.	± 2 à 10 m

Tableau 10 — postes géodésiques, sources admises et précisions typiques. Les valeurs de la dernière colonne sont indicatives : chaque observation reporte l'incertitude réelle de sa propre source.

12.4 Règle d'indépendance

Aucune de ces grandeurs n'est déduite de la photographie analysée. En particulier, la hauteur de la cible ne peut pas être estimée depuis l'image lorsque cette même hauteur sert ensuite à juger l'image : le raisonnement serait circulaire et le résultat automatiquement compatible.

13 Matériel

Le protocole ne prescrit ni marque ni modèle. Il fixe des caractéristiques minimales, et toute configuration qui les atteint est recevable.

13.1 Caractéristiques minimales

- **Enregistrement brut.** L'appareil produit un fichier natif non compressé avec pertes, ou à défaut un fichier compressé dont les métadonnées sont complètes. Le fichier brut est préféré parce qu'il n'a subi ni accentuation ni réduction de bruit.
- **Résolution angulaire.** La chaîne optique doit résoudre la caractéristique mesurée au sens du § 20 ; c'est un critère sur le résultat, pas sur le matériel.
- **Support.** Trépied stable et lesté, colonne rentrée, rotule bloquée, sur sol ferme. Stabilisation désactivée.
- **Déclenchement.** Sans contact : retardateur d'au moins deux secondes, ou commande à distance.
- **Mise au point.** Manuelle, à l'infini, affinée en visée agrandie sur la cible elle-même. La mise au point automatique est désactivée : elle dérive d'une vue à l'autre.
- **Exposition.** Fixe pour toute la série, réglée pour qu'aucun pixel de la cible ne soit saturé. Sensibilité la plus basse compatible avec un temps de pose court.
- **Horloge.** Réglée sur le temps universel à mieux que 5 s, et vérifiée juste avant la série.
- **Position.** Récepteur GNSS enregistrant la position et l'incertitude annoncée ; un point géodésique publié vaut mieux.
- **Mesure de la hauteur d'œil.** Mètre ruban, du sol ou du plan d'eau à l'axe optique, photographié.

13.2 Matériel complémentaire recommandé

- Thermomètres à au moins deux hauteurs au point de vue, et thermomètre de surface pour l'eau si accessible.
- Baromètre et hygromètre étalonnés.
- Mire ou cible de résolution photographiée à distance connue, pour le contrôle du § 24.

14 Photographie

14.1 Série

Chaque observation est une **série**, jamais une vue isolée. Au moins vingt vues consécutives de la même visée sont enregistrées sans toucher à la mise au point, au cadrage ni au grossissement. Toutes sont remises ; aucune n'est écartée par l'opérateur.

La série sert à trois choses : estimer la dispersion due à la turbulence, rechercher les signatures atmosphériques du § 19, et permettre une sélection des vues les plus nettes selon un critère déclaré d'avance et appliqué automatiquement.

14.2 Vues de contexte

- Une vue grand-angle depuis la même position, montrant les repères proches.
- Une vue de la mire de résolution, si elle est disponible.
- Une photographie du mètre mesurant la hauteur de l'axe optique.
- Une vue de l'horizon dans la même direction, à la même focale, pour la référence angulaire du § 19.

14.3 Répétition

La même visée est reprise à au moins deux moments séparés de plusieurs heures, et si possible à deux dates. Un écart systématique entre les deux moments signale un effet atmosphérique ; un écart nul sur des conditions différentes renforce la mesure.

15 Grossissement (zoom)

15.1 Principe

Un fort grossissement est **autorisé**, y compris numérique. Une photographie n'est jamais irrecevable au seul motif qu'un zoom important a été employé.

Le grossissement ne modifie ni la distance entre l'observateur et la cible, ni la géométrie du terrain, ni la trajectoire physique des rayons lumineux. Il ne peut pas rendre visible une partie d'objet réellement occultée par la surface. Il rend la cible assez grande sur le capteur pour être mesurée, et c'est à cela qu'il sert : à 100 km, une hauteur de 20 m ne sous-tend que 41,3 secondes d'arc.

L'INFÉRENCE INVERSE EST FAUSSE

Ne pas distinguer un objet sans zoom n'établit *pas* qu'il est occulté. Un objet peut être non résolu, ou trop peu contrasté, tout en étant géométriquement visible. Confondre « je ne le distinguais pas » et « il était occulté » est l'erreur la plus courante du domaine, et le § 20 la traite explicitement.

15.2 Quatre opérations à distinguer

- **Focale optique réelle** — seule grandeur qui détermine l'échelle angulaire du système.
- **Zoom optique** — variation de la focale réelle ; ajoute de l'information.
- **Zoom numérique et recadrage interne** — sélection d'une partie du capteur, avec ou sans rééchantillonnage ; n'ajoute aucune information, et n'en retire pas non plus tant que le rééchantillonnage reste interpolant.
- **Traitement computationnel** — fusion de plusieurs vues, réduction de bruit, accentuation, reconnaissance de sujet ; peut créer ou déplacer de l'information.

15.3 Ligne de partage

Agrandir une information déjà enregistrée est acceptable : interpolation bilinéaire ou bicubique, affichage agrandi, recadrage. Ces opérations ne créent aucun détail et se défont.

Reconstruire une information qui n'a pas été enregistrée est exclu de la mesure : synthèse générative, sur-résolution apprise, rehaussement de sujet, accentuation agressive, fusion inventant une structure absente des vues individuelles. Les zones concernées ne sont pas mesurées.

15.4 Ce qui doit être documenté

- focale optique réelle et focale équivalente ;
- facteur de grossissement employé et sa part optique contre numérique ;
- résolution native du capteur, en pixels et en pas de photosite ;
- résolution du fichier final ;
- recadrage effectué par l'appareil avant l'enregistrement ;
- traitements computationnels actifs ;
- toute autre étape entre la scène et le fichier.

Une information indisponible est déclarée indisponible, jamais estimée. Le critère d'acceptation n'est pas « grossissement autorisé ou interdit » : c'est **l'information est-elle assez documentée et assez exploitable pour permettre une mesure fiable ?**

16 Acquisition

L'acquisition et l'analyse sont séparées. Au moment du déclenchement, l'opérateur n'a besoin de connaître ni la distance exacte, ni la hauteur de la cible, ni la prédiction attendue. Cette séparation n'est pas une commodité : elle empêche le réglage de la prise de vue en fonction du résultat espéré.

16.1 Ce qui est consigné sur place

- date et heure en temps universel, et écart mesuré de l'horloge ;
- position GNSS et incertitude annoncée par le récepteur ;
- altitude du point de vue et hauteur de l'axe optique au-dessus du sol ou de l'eau ;
- orientation approchée de la visée ;
- boîtier, objectif, focale réelle, ouverture, temps de pose, sensibilité, format ;
- grossissement employé et sa nature ;
- température de l'air à deux hauteurs si possible, température de l'eau, pression, humidité ;
- état du ciel, visibilité estimée, état de la mer ;
- ce qui est visé, en une phrase.

16.2 Ce qui n'est pas fait sur place

Aucun calcul, aucune comparaison, aucune conclusion. L'opérateur ne consulte pas la prédiction avant la fin de la série. S'il la connaît déjà, il le déclare, et la mesure du § 19 est alors conduite par un analyste qui l'ignore.

16.3 Acquisition a posteriori

Une photographie prise sans intention expérimentale reste recevable si le fichier d'origine existe, si son authenticité peut être établie, si la cible est identifiable, si la position de l'observateur est déterminable et si les paramètres du § 12 sont établissables aux précisions visées. Les données manquantes sont déclarées manquantes, et leur absence est reportée dans l'incertitude.

Une donnée reconstruite a posteriori n'est jamais présentée comme une mesure directe effectuée lors de la photographie. Le § 21 en fixe les classes.

17 Conservation des données

17.1 Intégrité

- Les fichiers d'origine sont conservés tels qu'ils sortent de l'appareil. Ils ne sont jamais ouverts en écriture.
- L'empreinte SHA-256 de chaque fichier est calculée dès le transfert, avant toute autre opération, et consignée avec la date.
- L'empreinte est déposée le jour même auprès d'un tiers qui la date. À défaut, la date de calcul n'est qu'une déclaration de l'opérateur, et le rapport le dit.
- Toute manipulation se fait sur une copie, et la liste des opérations appliquées à cette copie est jointe.

CE QUE L'EMPREINTE PROUVE, ET CE QU'ELLE NE PROUVE PAS

Elle établit que le fichier n'a pas changé depuis sa déclaration. Elle n'établit ni qu'il sort d'un appareil, ni la date de la prise de vue. Les métadonnées EXIF s'écrivent : elles documentent la chaîne, elles ne prouvent pas l'origine. L'authenticité repose sur les concordances externes du § 24.

17.2 Traitements admis

Sont admis, sur la copie, les traitements qui ne déplacent aucun pixel et n'en créent aucun : réglage d'affichage du contraste et de la luminosité, conversion linéaire du fichier brut sans accentuation ni réduction de bruit, agrandissement par interpolation déclarée, recadrage déclaré dont les coordonnées d'origine sont conservées.

Sont exclus de la mesure : la synthèse générative, la sur-résolution apprise, la reconstruction de détail, l'interpolation créatrice, l'accentuation agressive, la réduction de bruit non-linéaire, et toute fusion multi-vues qui produit une structure absente des vues individuelles.

17.3 Archivage

La structure d'archivage est fixée au § 34. L'ensemble — fichiers d'origine, empreintes, fiche d'observation, données externes, code de calcul, rapport — est publié sous une licence permettant la reprise, de façon qu'un tiers puisse refaire l'analyse depuis les fichiers d'origine.

18 Validation des images

Les critères ci-dessous sont fixés et déposés **avant** l'examen des résultats, et appliqués par un opérateur qui ignore la prédiction. Ils ne portent que sur la qualité de l'image, jamais sur ce qu'elle montre.

Poste	Valide	Valide avec réserves	Non valide
Mise au point	bord franc de référence dont la largeur de transition est à moins de 1,5× le minimum de la série	entre 1,5 et 3×	au-delà de 3×
Flou de bougé	aucun allongement directionnel détectable sur une source ponctuelle	allongement ≤ 2 pixels	allongement > 2 pixels
Turbulence	dispersion de la position du bord sur la série ≤ 1 pixel	≤ 3 pixels	> 3 pixels
Exposition	aucun pixel saturé ni écrêté sur la cible et son fond immédiat	saturation hors zone mesurée	saturation dans la zone mesurée
Contraste	écart cible-fond $\geq 10\times$ l'écart-type du bruit local	entre 3 et 10×	$< 3\times$
Artefacts	aucun artefact de compression, de capteur ou de traitement dans la zone mesurée	artefacts hors zone	artefacts dans la zone
Distorsion	résiduel de distorsion < 1 pixel après étalonnage du couple boîtier-objectif	entre 1 et 3 pixels	> 3 pixels ou non étalonné
Occultation parasite	aucune : toute occultation visible est identifiée et attribuée	occultation hors zone mesurée	occultation de cause indéterminée

Tableau 11 — grille de validation. Une image est valide si tous les postes sont en colonne 1, valide avec réserves si aucun n'est en colonne 3, non valide dès qu'un poste est en colonne 3.

Une image *valide avec réserves* entre dans l'analyse avec une incertitude de mesure majorée d'un facteur déclaré d'avance. Une image *non valide* est exclue, et son exclusion est publiée : le taux d'exclusion fait partie du résultat.

CONTRE LE TRI D'APRÈS LE RÉSULTAT

Le classement est fait avant toute mesure de la fraction visible, par une personne qui ne connaît ni la prédiction ni la distance. Le journal de classement est horodaté et joint au dossier. Un classement postérieur à la mesure est irrecevable.

19 Analyse des images

19.1 Échelle métrique

L'échelle se détermine de deux façons indépendantes, et les deux sont reportées : à partir de la focale réelle et du pas de photosite d'une part ; à partir de deux parties pertinentes de la cible dont l'altitude est connue d'autre part. Un écart supérieur à 2 % entre les deux invalide la focale déclarée, non les repères.

19.2 Grandeurs mesurées

- position apparente du sommet de la cible, en pixels ;
- position apparente de la limite inférieure visible, en pixels ;
- hauteur visible, en mètres, par conversion ;
- hauteur occultée, par différence avec la hauteur totale établie au § 12 ;
- fraction visible f , avec son incertitude ;
- rapports de hauteur entre au moins trois éléments de cote connue, pour le test de déformation verticale.

19.3 Bord mesurable

Un bord n'est mesurable que s'il est une discontinuité résolue. Si la transition entre l'objet et son fond s'étend sur plus de trois fois la structure résolue du § 20, ce n'est pas un bord mais un dégradé, et sa position n'est pas mesurée. C'est le cas typique d'une base noyée dans la brume.

19.4 Régimes atmosphériques à rechercher

Les signatures suivantes sont recherchées **sur la série entière et avant** la comparaison du § 28. Le résultat de cette recherche est consigné qu'il soit positif ou négatif.

- **Mirage inférieur** — image inversée sous l'objet, séparée par une ligne nette ; s'atténue quand le point de vue s'élève.
- **Mirage supérieur** — image inversée au-dessus de l'objet ; apparaît et disparaît au fil des heures.
- **Looming** — l'objet entier remonte sans se déformer : les rapports de hauteur internes sont conservés.
- **Conduit optique** — contraste soutenu à très grande distance, bandes horizontales, transitions abruptes d'une vue à l'autre.
- **Déformation verticale** — les rapports de hauteur entre éléments de cote connue ne sont pas conservés.

Test opératoire de la déformation verticale : les rapports de hauteur entre au moins trois éléments de cote connue sont mesurés dans l'image et comparés à leurs valeurs réelles. Un écart supérieur à trois fois l'incertitude de ces rapports signale une déformation, et l'observation est classée indéterminée.

Un régime ne peut être invoqué que s'il a été recherché avant la comparaison et s'il est établi par des signatures relevées dans les images *et* par les données atmosphériques du § 21. Il n'est jamais introduit après coup pour rendre compte d'un écart, dans un sens comme dans l'autre.

19.5 Mesure en aveugle

Les mesures du § 19.2 sont faites par au moins trois analystes travaillant séparément, à qui l'on communique l'image et l'échelle mais ni la distance, ni la hauteur totale de la cible, ni la prédiction. Ils rendent des positions en pixels. La conversion en mètres et la comparaison viennent ensuite.

La dispersion entre analystes est reportée comme composante d'incertitude de type A. Si elle excède la résolution effective du § 20, le dossier revient en 19.3 : le bord mesuré est ambigu.

19.6 Non-détection

Une série où la cible n'apparaît pas n'est pas écartée d'office. Elle est classée *informative* si la taille angulaire prédite de la partie attendue excède trois fois la résolution effective mesurée ; sinon *indéterminée*. Les deux cas sont publiés. Écarter les non-détections sans ce test introduirait un biais de sélection.

20 Résolution angulaire

20.1 Trois limites, et c'est la plus grande qui compte

- **Pas de photosite projeté** — l'angle sous-tendu par un pixel, égal au pas de photosite divisé par la focale réelle.
- **Limite de diffraction** — environ $1,22 \lambda/d$ pour une pupille de diamètre d .
- **Turbulence atmosphérique** — sur un trajet rasant de plusieurs dizaines de kilomètres, elle domine généralement les deux précédentes.

La turbulence sur un trajet marin rasant ne se calcule pas de façon fiable : la structure du champ d'indice n'y est pas connue. Le protocole exige donc qu'elle soit **mesurée sur l'image**, et non estimée.

20.2 Mesure de la résolution effective

La résolution effective est la largeur de transition d'un bord franc de dimension connue présent dans le champ, mesurée par la méthode du bord incliné de la norme applicable (§ 35), et convertie en mètres à la distance de la cible. La caractéristique mesurée doit être au moins trois fois plus grande que cette valeur.

20.3 Occulté contre non résolu

LA DISTINCTION DÉCISIVE

Occulté : la partie de l'objet est absente de l'image parce qu'un corps s'interpose. Le modèle prédit une position précise pour la limite, et cette limite est un bord résolu.

Non résolu : la partie de l'objet est présente mais trop petite ou trop peu contrastée pour être séparée. Aucune limite nette n'apparaît ; le signal s'éteint progressivement.

Les deux se distinguent par trois signes : la netteté de la limite, comparée à la résolution effective ; la stabilité de sa position sur la série ; et son déplacement, ou son absence de déplacement, quand la focale change à position constante. Une limite d'occultation ne bouge pas avec la focale ; une limite de détection recule.

20.4 Ordres de grandeur

D (km)	m par seconde d'arc	20 m (")	c à k=0 (")	c à k=0,25 (")
50	0,242	82,5	0,0	0,0
80	0,388	51,6	0,0	0,0
100	0,485	41,3	0,0	0,0
120	0,582	34,4	48,9	1,2
150	0,727	27,5	259,6	90,4
200	0,970	20,6	794,0	422,5

Tableau 12 — échelle angulaire et taille angulaire de la hauteur occultée prédite, $h = 800$ m. À 120 km, la prédiction à $k = 0,25$ ne sous-tend qu'une seconde d'arc : cette géométrie ne discrimine pas. À 150 km, elle en sous-tend quatre-vingt-dix.

21 Données météorologiques

21.1 Ce qu'il faut, et à quelle résolution

La grandeur qui gouverne la prédiction est le **gradient vertical de température dans la couche où passe le rayon rasant**, non la température moyenne. Le § 11.5 montre qu'une couche basse de quelques dizaines de mètres suffit à tripler le coefficient effectif.

- **Résolution verticale** — au moins un point tous les 10 m dans les 100 premiers mètres au-dessus de l'eau, puis tous les 100 m jusqu'à l'altitude de l'observateur. C'est la résolution qui permet de détecter une couche d'inversion mince.
- **Étendue horizontale** — la couche concernée est celle qui borde le point de tangence, au milieu du trajet. Un profil pris à une seule extrémité ne renseigne pas sur le milieu : le rapport le dit, et l'incertitude en tient compte.
- **Grandeurs** — température, pression, humidité, et température de surface de la mer. L'écart entre température de l'air et température de l'eau est le meilleur indicateur disponible d'une inversion de surface.
- **Cadence** — au début et à la fin de chaque série au minimum.

21.2 Classes de donnée

Classe	Origine	Définition	Statut au rapport
A	Mesure directe sur site	instrument étalonné relevé par l'opérateur au point de vue, pendant l'observation	mesure
B	Sondage aérologique	profil vertical mesuré par ballon, à moins de 100 km et 3 h, l'écart étant consigné et reporté dans l'incertitude	mesure déportée
C	Station météorologique officielle	observation horodatée d'un réseau reconnu, à moins de 30 km et 1 h ; ne donne que des valeurs de surface	mesure de surface
D	Sortie de modèle ou réanalyse	valeur calculée sur une maille, jamais observée en ce point ; résolution verticale insuffisante près de la surface	valeur calculée
E	Climatologie ou estimation	moyenne saisonnière, ou valeur choisie par l'analyste faute de mieux, y compris le coefficient dit standard	déclarative

Tableau 13 — classes de donnée atmosphérique. La classe dit comment la valeur a été obtenue, pas si elle est juste.

Une donnée estimée a posteriori n'est jamais présentée comme une mesure directe. La classe accompagne la valeur partout où elle apparaît, y compris dans la conclusion.

21.3 Insuffisance

L'insuffisance des données ne se traite pas par un choix prudent : elle se traite en reportant la plage entière des valeurs plausibles dans l'incertitude, selon le § 23. Concrètement, en l'absence de donnée de classe A ou B, l'intervalle de k retenu est celui que les conditions de surface autorisent, borné par le tableau 8 ; il est déposé avant l'analyse.

22 Analyse des incertitudes

Les incertitudes sont évaluées et composées selon le guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (§ 35). Chaque composante porte son type — A si elle vient d'une dispersion statistique, B sinon — et son facteur d'élargissement.

22.1 Composantes de mesure

- dispersion entre les trois analystes en aveugle (type A) ;
- dispersion de la position du bord sur la série, due à la turbulence (type A) ;
- résolution effective, en mètres à la distance de la cible (type B) ;
- incertitude d'échelle, écart entre les deux déterminations du § 19.1 (type B) ;
- résiduel de distorsion après étalonnage (type B).

22.2 Composantes de prédiction

La prédiction hérite des incertitudes géodésiques et atmosphériques. Le tableau 14 donne les coefficients de sensibilité pour deux géométries.

Paramètre	Écart considéré	à 120 km (m)	à 150 km (m)
Altitude de l'observateur h	± 1 m	0,109	0,386
Distance D	± 100 m	0,161	0,570
Hauteur de la cible H	$\pm 0,5$ m	0,000	0,000
Coefficient k	$\pm 0,01$	1,108	4,917
Coefficient k non mesuré	plage 0,10 à 0,40	16,61	73,75

Tableau 14 — effet sur la hauteur occultée prédite, en mètres, pour $h = 800$ m et $k = 0,13$. La hauteur de la cible n'intervient pas dans c ; elle n'intervient que dans la fraction. À 120 km, l'ignorance de k écrase tout le reste, ce qui rend cette géométrie inutilisable sans donnée atmosphérique.

À 120 km la hauteur occultée prédite vaut 9,4 m et l'ignorance de k sur une plage de 0,10 à 0,40 en vaut 16,6 m : la prédiction est noyée. À 150 km elle vaut 119,1 m pour une même ignorance de 73,7 m : le rapport devient favorable. C'est cette comparaison, et non une distance ronde, qui doit fixer la géométrie d'une campagne.

22.3 Composition

Les composantes indépendantes se composent en quadrature. Les composantes corrélées — typiquement l'altitude de l'observateur et l'altitude de la base quand elles viennent du même modèle de terrain — sont composées en tenant compte de leur corrélation, dont la valeur retenue est justifiée au rapport.

23 Analyse de sensibilité

23.1 Méthode

Chaque paramètre est varié systématiquement dans son intervalle d'incertitude, et l'**enveloppe** des prédictions qui en résulte est rapportée. L'intervalle retenu est celui que permettent les meilleures sources et les meilleurs instruments dont l'observateur disposait ; il n'est ni élargi par précaution, ni resserré par commodité, et son origine est citée.

Les paramètres variés sont : altitude de l'observateur, distance, position, altitude de la base, hauteur de la cible, coefficient de réfraction et profil vertical, focale réelle et paramètres optiques. Le balayage est conduit sur la grille complète lorsque le nombre de combinaisons le permet, sinon par tirage de Monte-Carlo dont le germe est publié.

23.2 Règle de conclusion

LA CONCLUSION NE PORTE QUE SI ELLE TIENT SUR L'ENVELOPPE ENTIÈRE

Si une seule combinaison admissible des paramètres rend l'observation conforme à la prédiction d'un modèle, ce modèle n'est pas réfuté par cette observation.

L'analyste rapporte explicitement la combinaison la plus défavorable à sa propre conclusion, et ce qu'elle donne. Cette exigence s'applique dans les deux sens et pour les deux modèles.

23.3 Enveloppe sur l'exemple

D (km)	S, k=0	S, k=0,13	S, k=0,25	S, k=0,50	modèle P
100	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
110	0,936	0,998	1,000	1,000	1,000
120	0,715	0,906	0,993	1,000	1,000
130	0,338	0,677	0,894	1,000	1,000
140	0,000	0,311	0,677	1,000	1,000
150	0,000	0,000	0,343	0,980	1,000
160	0,000	0,000	0,000	0,884	1,000

Tableau 15 — fraction visible prédite pour $h = 800$ m et $H = 100$ m, selon k , comparée au modèle P. Les deux modèles ne se séparent qu'au-delà de la distance où l'enveloppe du modèle S s'écarte de 1.

23.4 Préparer une campagne

Le tableau ci-dessous aide à choisir où aller. Il ne pose aucun seuil : la validité d'une observation ne se décide qu'après coup, par le calcul du § 28.2, sur les paramètres réellement établis. Une géométrie qui paraît confortable ici peut se révéler inexploitable si la réfraction n'a pas pu être bornée, et une géométrie modeste peut suffire si l'incertitude de mesure est petite.

Altitude observateur (m)	$k_{\max}=0,20$	$k_{\max}=0,35$	$k_{\max}=0,50$
100	57,8	64,1	73,1
300	87,0	96,5	110,0
800	130,7	145,0	165,4
2 000	196,3	217,8	248,3

Tableau 16 — distance à laquelle la hauteur occultée prédite atteint 20 m, sous le coefficient maximal retenu. Tableau de préparation seulement : il n'énonce aucune condition de validité.

Lecture : depuis 100 m, il faut 73,1 km pour que 20 m soient occultés si l'on admet k jusqu'à 0,50, contre 57,8 km si une mesure atmosphérique permet de le borner à 0,20. L'écart entre ces deux colonnes est la valeur, en kilomètres épargnés, d'un profil vertical mesuré sur place.

24 Contrôles

Ces contrôles sont exécutés au moins une fois par campagne et à chaque changement de matériel. Leurs résultats sont joints au dossier, qu'ils soient favorables ou non.

Contrôle	Mode opératoire	Critère
Étalonnage d'échelle	photographier une mire de dimensions connues à distance mesurée, à la focale employée	l'échelle calculée depuis la focale et celle mesurée sur la mire s'accordent à mieux de 2 %
Résolution	mesurer la largeur de transition d'un bord franc de la mire	la valeur est reportée et sert de référence instrumentale au § 20
Distorsion	photographier une grille régulière et ajuster un modèle de distorsion	résiduel < 1 pixel après correction
Stabilité	vingt vues consécutives d'une cible fixe proche	déplacement du centroïde ≤ 1 pixel
Orientation	visée sur deux repères d'azimut connu	azimut retrouvé à mieux que 0,05°
Cohérence entre focales	photographier la même scène à trois focales, position inchangée	la limite d'occultation mesurée ne se déplace pas ; une limite de détection, elle, recule
Cohérence entre images	mesurer la fraction visible sur cinq vues de la même série	dispersion compatible avec la résolution effective
Reproductibilité entre analystes	trois mesures en aveugle du même bord	dispersion inférieure à la résolution effective
Concordance externe	position du Soleil déduite des ombres, hauteur de marée, registre horodaté d'un mobile, météo observée, repères attendus dans le champ	au moins deux concordances établies, aucune discordance

Tableau 17 — contrôles expérimentaux et critères d'acceptation.

Le contrôle de cohérence entre focales est le plus discriminant du lot : il sépare expérimentalement une limite d'occultation d'une limite de détection, sans recourir à aucun modèle.

25 Réplication

- **Plusieurs observateurs.** La même cible est photographiée par au moins deux opérateurs indépendants, si possible depuis deux sites d'altitudes différentes.
- **Plusieurs analystes.** Au moins trois analyses indépendantes du même dossier, sous le même seuil déposé, conduites séparément.

- **Mesure en aveugle.** Les analystes mesurent des positions en pixels sans connaître la distance, la hauteur totale ni la prédiction.
- **Déclaration d'intérêt.** Chaque analyste déclare tout intérêt dans l'issue et toute participation à la prise de vue. L'opérateur du cliché n'est aucun des trois.
- **Répétition.** La même géométrie est reprise à des dates et dans des conditions atmosphériques différentes.
- **Publication des données brutes.** Fichiers d'origine, empreintes, fiches, données externes et code de calcul, sous licence permettant la reprise.

Le résultat est certifié lorsque les trois analyses convergent. Toute divergence rend le résultat indéterminé : les trois analyses sont publiées, le point de désaccord est nommé, et le dossier reste ouvert.

26 Pré-enregistrement

Les éléments suivants sont fixés, datés et déposés auprès d'un tiers **avant** toute acquisition, ou à défaut avant tout examen des images pour un dossier a posteriori.

- les modèles comparés, avec leur géométrie, leur loi de propagation et leur nombre de paramètres libres ;
- l'intervalle de k retenu et sa justification ;
- les critères de sélection des observations et des images (§ 18) ;
- la méthode de mesure de la fraction visible (§ 19) ;
- le mode de composition des incertitudes (§ 22) et le plan de sensibilité (§ 23) ;
- le **seuil de réfutation** : l'écart à partir duquel un résultat est déclaré incompatible ;
- la taille d'échantillon visée et la règle d'arrêt ;
- le plan d'analyse statistique (§ 27).

Aucun de ces éléments n'est modifié après examen des résultats. Tout écart au plan déposé est publié comme tel, avec sa date et son motif, et l'analyse correspondante est étiquetée *exploratoire* : elle ne peut pas conclure.

SEUIL RECOMMANDÉ, À ADOPTER FAUTE DE MIEUX

Les deux conditions sont exigées ensemble : l'écart entre fraction observée et fraction prédite atteint **trois fois** l'incertitude composée de la mesure et de la prédiction, **et** il tombe hors de l'enveloppe de sensibilité du § 23. Ce seuil n'a rien d'obligatoire : il est proposé pour qu'une campagne qui n'en dépose pas d'autre en ait un, déclaré d'avance.

Un dossier analysé sans seuil préalablement déposé ne peut pas conclure à une incompatibilité. Il peut conclure à une compatibilité ou rester indéterminé. L'asymétrie est délibérée : c'est l'affirmation la plus forte qui exige l'engagement préalable.

27 Analyse statistique

27.1 Grandeur analysée

L'analyse porte sur la fraction visible f , et sur l'écart $f_{\text{obs}} - f_{\text{préd}}$ pour chaque modèle. Les observations d'une campagne sont ajustées **conjointement** sur la courbe $f(D)$, et non comparées une à une.

27.2 Comparaison de modèles

Les modèles sont comparés par leur vraisemblance, pénalisée du nombre de paramètres libres déclarés au § 26. La statistique retenue, le critère de pénalisation et le seuil de décision sont déposés avant l'analyse. Aucun modèle ne reçoit le statut d'hypothèse nulle privilégiée : les deux sont traités symétriquement.

27.3 Taille d'échantillon

Pour séparer deux prédictions distantes de Δ avec un bruit par observation σ , au risque de première espèce $\alpha = 0,001$ bilatéral et à la puissance 95 % :

$$n \geq (z_{1-\alpha/2} + z_{1-\beta})^2 \cdot (\sigma/\Delta)^2 = 24,36 \cdot (\sigma/\Delta)^2$$

$$z_{0,9995} = 3,2905, z_{0,95} = 1,6449$$

σ/Δ	n minimal
0,20	1,0
0,33	2,7
0,50	6,1
0,75	13,7
1,00	24,4

Tableau 18 — nombre minimal d'observations indépendantes. Le rapport σ/Δ se calcule à partir du tableau 15 et de l'incertitude de mesure du § 22.

Cette formule est un dimensionnement, non l'analyse elle-même. Elle suppose des observations indépendantes et un bruit de même écart-type ; deux vues du même jour, depuis le même site, sur la même cible, ne sont pas deux observations indépendantes. Le décompte porte sur les configurations distinctes : site, cible, date, conditions.

27.4 Ce qui est publié

Toutes les observations recevables entrent dans l'analyse, y compris celles qui ne vont pas dans le sens attendu et celles classées indéterminées. Le taux d'exclusion, ses motifs et la liste des dossiers écartés sont publiés avec les résultats.

28 Critères de décision

28.1 Filtre préalable

La **recevabilité** est un filtre, non une conclusion. Un dossier est recevable s'il fournit les pièces du § 33, s'il passe les contrôles du § 24, si l'image est valide ou valide avec réserves au sens du § 18, et si toute occultation visible est identifiée et attribuée. Un dossier irrecevable n'est ni favorable ni défavorable : il n'entre pas dans l'analyse, et son exclusion est publiée.

28.2 Condition de discrimination

Aucune altitude ni aucune distance minimale n'est posée a priori. Une configuration n'est pas admissible parce qu'elle franchit un seuil rond ; elle l'est parce que le calcul ci-dessous, conduit sur ses propres paramètres une fois qu'ils sont établis, montre qu'elle sépare les prédictions.

CONDITION DE DISCRIMINATION

Soit Δ l'écart entre les fractions visibles prédites par les deux modèles, évalué au bord d'enveloppe le plus *défavorable* à la discrimination — pour le couple S contre P, le coefficient de réfraction maximal retenu. Soit $u(f)$ l'incertitude composée de mesure sur la fraction observée. La configuration est exploitable si :

$$\Delta \geq 5 \cdot u(f)$$

évalué a posteriori, sur les paramètres réellement établis.

En deçà, l'observation est classée indéterminée avant même que la fraction visible soit mesurée, et cette classification est publiée avec le motif.

Le facteur 5 est un choix, déposé avec le reste du plan et applicable identiquement aux deux modèles. Il place la barre d'admission au-dessus du seuil de décision de 3σ du § 26 : on n'accepte d'analyser que des configurations où un écart significatif aurait de la marge pour apparaître.

28.2.1 La hauteur de la cible disparaît du critère

Le modèle P prédit $f = 1$; le modèle S prédit $1 - c/H$. L'écart vaut donc $\Delta = c/H$, et l'incertitude de mesure sur la fraction vaut $u(f) = u(c)/H$. La hauteur de la cible se simplifie :

$$\Delta / u(f) = c / u(c) \quad \text{donc} \quad c(h, D, k_{\max}) \geq 5 \cdot u(c)$$

$u(c)$ est l'incertitude de mesure sur la hauteur occultée, en mètres à la distance de la cible (§ 20 et § 22.1).

La condition ne dépend donc pas de la hauteur de la cible : une cible haute donne une fraction plus précise, mais aussi un écart relatif plus petit, et les deux effets se compensent exactement. Ce qui décide, c'est la hauteur occultée prédite comparée à ce que l'image permet de mesurer.

28.2.2 Ce que la condition donne

Le tableau 19 résout la condition en distance, pour deux incertitudes de mesure réalistes. Il n'est pas un barème : c'est la même formule, tabulée, et chaque observation refait le calcul avec ses propres valeurs.

$u(c)$ (m)	Altitude observateur (m)	$k_{\max}=0,20$	$k_{\max}=0,35$	$k_{\max}=0,50$
2	2	18,3	20,3	23,1
2	10	25,2	28,0	31,9
2	50	40,8	45,3	51,7
2	100	52,5	58,3	66,4
2	300	81,7	90,7	103,4
2	800	125,5	139,2	158,7
2	2 000	191,1	212,0	241,7
5	2	25,6	28,4	32,4
5	10	32,6	36,1	41,2
5	50	48,2	53,4	60,9
5	100	59,9	66,4	75,7
5	300	89,1	98,8	112,7
5	800	132,8	147,4	168,0
5	2 000	198,4	220,1	251,0

Tableau 19 — distance à partir de laquelle la condition de discrimination est tenue, en kilomètres. Aucune de ces valeurs n'est un seuil : chaque observation refait le calcul avec ses propres paramètres. La ligne en évidence montre qu'une hauteur d'œil de deux mètres suffit, si la distance suit.

Ce tableau suffit à montrer qu'aucun plancher fixe ne tient. Depuis une hauteur d'œil de deux mètres, une configuration à 23,1km satisfait la condition dès que la hauteur occultée se mesure à 2m près, même en admettant k jusqu'à 0,50 — et les 10m occultés y sous-tendent 89 secondes d'arc, largement au-dessus de ce qu'un système correct résout. À l'inverse, une observation depuis 800m à 120km ne satisfait pas la condition si la réfraction n'a pas été bornée, alors qu'elle paraît bien plus impressionnante.

28.3 Les trois catégories

- **Compatible.** La fraction visible observée tombe dans l'enveloppe de prédiction du modèle, incertitudes de mesure et de prédiction composées, et l'écart reste sous le seuil de réfutation déposé.
- **Incompatible.** L'écart franchit le seuil déposé, il tient sur l'enveloppe entière de sensibilité du § 23, aucun régime atmosphérique du § 19.4 n'est établi, aucune occultation n'est inexpliquée, et les trois analyses indépendantes convergent.
- **Indéterminé.** Tout le reste : données atmosphériques insuffisantes pour borner k , caractéristique non résolue, bord non mesurable, régime atmosphérique établi, enveloppe de sensibilité recouvrant les deux prédictions, ou divergence entre analystes.

Un même dossier peut être compatible avec un modèle et incompatible avec l'autre : c'est le cas recherché. Il peut aussi être compatible avec les deux, ou incompatible avec les deux ; ces deux issues sont publiées telles quelles, la seconde signalant qu'un élément du dispositif est mal compris.

SYMÉTRIE DE TRAITEMENT

Les mêmes règles, les mêmes seuils et les mêmes incertitudes s'appliquent aux deux modèles. Un résultat allant dans un sens n'est ni examiné plus sévèrement ni accepté plus facilement qu'un résultat allant dans l'autre.

Une observation *indéterminée* n'est jamais présentée comme une preuve pour ou contre un modèle, ni comme un demi-résultat. Elle est publiée avec le motif exact de l'indétermination et ce qu'il faudrait pour la lever.

29 Modèles concurrents

Un modèle n'entre dans la comparaison que s'il est déposé avec quatre éléments : sa géométrie de surface, sa loi de propagation de la lumière, ses paramètres libres et leurs intervalles, et la prédiction explicite qu'il fait sur $f(D)$ pour la configuration observée.

29.1 Pourquoi cette exigence

Un modèle dont la loi de propagation reste libre reproduit n'importe quelle observation. Il n'est pas réfutable, donc pas comparable. Cela vaut pour un modèle plan assorti d'une réfraction ad hoc comme pour un modèle sphérique assorti d'un k libre : les deux sont exclus de la comparaison par la même règle.

29.2 Traitement identique

- mêmes données d'entrée, mêmes sources, mêmes incertitudes ;
- mêmes règles de mesure sur les images ;
- même analyse de sensibilité, sur les mêmes intervalles ;
- même seuil de réfutation ;
- même pénalisation du nombre de paramètres libres.

29.3 Cas particulier du modèle P

Le modèle P tel que défini au § 4.2 n'a aucun paramètre libre : il prédit $f = 1$ partout. C'est un avantage dans la comparaison pénalisée, et il faut le dire : un modèle sans paramètre libre est plus facilement réfutable, mais aussi moins facilement écarté quand les données sont pauvres. C'est la raison de la condition de discrimination du § 28.2.

Toute variante du modèle P introduisant une loi de propagation, une perspective particulière ou une limite de visibilité doit être déposée comme un modèle distinct, avec ses paramètres, et subir exactement le même traitement.

30 Limites

- **La réfraction n'est jamais mesurée sur le trajet lui-même.** Elle est estimée depuis des profils pris ailleurs, ou bornée. C'est la limite principale, et elle est irréductible sans instrumentation du trajet.
- **Le point de tangence est le plus mal documenté.** Il se trouve au milieu du trajet, là où l'on ne mesure rien.
- **La turbulence n'est pas modélisable ici.** Elle est mesurée sur l'image, ce qui la traite comme un bruit et non comme un biais ; un biais systématique de turbulence n'est pas exclu.
- **Les altitudes dépendent d'un modèle de géoïde.** Elles ne sont pas des mesures directes, et leur incertitude est corrélée entre l'observateur et la cible quand la source est la même.
- **La sélection des cibles n'est pas aléatoire.** On photographie ce qui est photographiable ; la campagne doit déclarer sa règle de choix à l'avance.

- **Un dossier a posteriori est presque toujours plus pauvre.** L'absence de mesure atmosphérique sur site suffit le plus souvent à rendre le résultat indéterminé.
- **Le protocole ne mesure pas R.** Il teste une prédiction construite avec une valeur de R posée ; une conclusion d'incompatibilité porterait sur le couple géométrie-propagation, pas sur R seul.

31 Audit critique

Le protocole a été attaqué du point de vue d'un contradicteur compétent et hostile. Dix-huit objections ont été retenues. Chacune est reproduite telle qu'elle serait formulée, avec la correction intégrée ; celles qui restent sans correction complète figurent au § 30.

N°	Domaine	Objection	Formulation hostile	Correction
01	Géométrie	Rayon sphérique moyen	Vous calculez avec R_1 alors que le rayon de courbure dépend de la latitude et de l'azimut. L'écart entre le rayon méridien à l'équateur et la grande normale au pôle atteint 64 km, soit 1,0 %, ce qui excède de trois ordres de grandeur l'erreur d'approximation dont vous vous vantez au § 9.4.	Exact, et c'est pourquoi le § 12.2 impose le rayon d'Euler à l'azimut de la visée, et non R_1 . La différence est quantifiée au rapport.
02	Géométrie	Cible non ponctuelle	Vous traitez la cible comme un segment vertical au-dessus d'un point. Un navire ou une montagne a une extension le long de la visée, et sa base n'est pas à une distance unique.	L'incertitude sur D est élargie à l'extension longitudinale de la cible, et cette composante est déclarée. Une cible dont l'extension dépasse l'incertitude visée sur D est écartée.
03	Géodésie	Géoïde et ellipsoïde	Une altitude GNSS brute est une hauteur ellipsoïdale. La confondre avec une altitude introduit des dizaines de mètres d'erreur, donc plusieurs mètres sur c .	Le § 12.1 impose la conversion par un modèle de géoïde publié et la déclaration du modèle. Le contrôle du § 24 vérifie la cohérence sur un point de cote connue.
04	Géodésie	Marée et zéro hydrographique	Pour un ouvrage côtier, la base « au niveau de la mer » bouge de plusieurs mètres dans la journée, et le zéro des cartes n'est pas le niveau moyen.	L'altitude de la base est prise à l'heure exacte, corrigée de la marée observée et non prédite quand un marégraphe existe, et le zéro de référence est nommé.
05	Atmosphère	Rayon effectif inapproprié	$R/(1-k)$ suppose un gradient d'indice constant sur toute la hauteur. C'est faux dès qu'il y a une couche.	Reconnu et quantifié : le § 11.5 montre un facteur trois sur un profil à deux couches. Le traçage de rayon est obligatoire dès qu'un profil non linéaire est documenté, et l'incertitude couvre l'écart quand il ne l'est pas.
06	Atmosphère	Réfraction ajustée après coup	Il suffira d'invoquer une inversion pour sauver le modèle S, ou de la nier pour le condamner.	Le § 11.7 interdit l'ajustement postérieur, dans les deux sens. L'intervalle de k est déposé avant analyse, et un régime n'est invocable que s'il a été recherché avant la comparaison et établi par des signatures d'image et des données météo.
07	Atmosphère	Conduit d'évaporation	Au-dessus de la mer, le conduit d'évaporation est omniprésent : votre expérience ne prouvera jamais rien.	Erreur de domaine, et le § 11.4 la chiffre : le terme humide vaut environ 90 N en radio contre -0,8 N en optique. Le conduit d'évaporation est un phénomène radioélectrique ; un conduit optique exige une inversion thermique extrême, recherchée explicitement.
08	Photographie	Zoom numérique	Une image agrandie numériquement ne contient pas plus d'information : vous mesurez du bruit interpolé.	Le § 15 l'énonce : l'agrandissement n'ajoute rien et n'est pas compté dans la résolution. C'est la résolution effective <i>mesurée</i> du § 20 qui décide, et elle est insensible à l'agrandissement.
09	Photographie	Traitement interne	Les appareils modernes reconstruisent. Vous ne mesurez pas une scène, vous mesurez une inférence.	Le § 15.3 exclut de la mesure toute zone issue d'une reconstruction, et le § 17.2 liste les traitements admis. Le format brut est exigé dès que l'appareil en produit un.

N°	Domaine	Objection	Formulation hostile	Correction
10	Résolution	Occulté ou non résolu	Vous ne pouvez pas distinguer une base cachée d'une base trop petite pour être vue.	C'est l'objet du § 20.3, et le contrôle expérimental du § 24 le tranche sans modèle : à position constante, une limite d'occultation ne se déplace pas quand la focale change, une limite de détection recule.
11	Résolution	Brume prise pour un bord	À 150 km la base d'un objet disparaît dans la brume bien avant d'être occultée. Vous mesurerez une limite d'extinction.	Le § 19.3 refuse de mesurer un bord dont la transition excède trois fois la structure résolue ; le § 18 écarte les images dont le contraste cible-fond est insuffisant. Le cas échéant, l'observation est indéterminée.
12	Mesure	Biais de l'analyste	Celui qui mesure sait ce qu'il cherche.	Trois analystes en aveugle mesurent des positions en pixels sans connaître distance, hauteur ni prédiction (§ 19.5) ; la dispersion entre eux est une composante d'incertitude, et une divergence rouvre le dossier.
13	Sélection	Tri des images	Vingt vues, on garde les meilleures : le tri fabrique le résultat.	Le critère de tri est déposé d'avance, appliqué automatiquement, et exécuté par une personne qui ignore la prédiction (§ 18). Toutes les vues sont remises et publiées, et le taux d'exclusion fait partie du résultat.
14	Sélection	Dossiers qui ne parviennent pas	Les observations sont soumises parce qu'elles ont paru remarquables. Votre série ne dit rien de la population.	Reconnu au § 30. Une campagne pré-enregistrée déclare sa règle de choix des cibles avant l'acquisition ; les dossiers a posteriori sont analysés séparément et ne sont pas mélangés aux campagnes.
15	Statistique	Observations non indépendantes	Vingt vues du même jour ne font pas vingt observations.	Le § 27.3 le dit : le décompte porte sur les configurations distinctes — site, cible, date, conditions — et la série ne sert qu'à estimer la dispersion.
16	Statistique	Modèle nul privilégié	Vous testez le modèle plan contre le modèle sphérique en donnant à ce dernier un paramètre libre supplémentaire.	Le § 27.2 pénalise le nombre de paramètres libres déclarés, et le § 29.3 dit explicitement que l'absence de paramètre libre du modèle P est un avantage dans la comparaison pénalisée.
17	Données historiques	Photographie ancienne	Une photographie de vacances n'a ni horloge synchronisée, ni position certifiée, ni météo.	Elle est recevable si les conditions du § 16.3 sont remplies, et elle finit le plus souvent <i>indéterminée</i> faute de donnée atmosphérique. Le protocole le dit d'avance plutôt que de conclure à partir d'un dossier pauvre.
18	Intégrité	Empreinte fabriquée	L'empreinte est calculée par celui qui soumet le fichier. Elle ne prouve rien sur l'origine.	Reconnu explicitement au § 17.1. L'empreinte n'établit que l'intégrité ; l'authenticité repose sur au moins deux concordances externes que le fichier ne peut pas fabriquer — position du Soleil, marée, registre horodaté, météo observée — et le dépôt de l'empreinte auprès d'un tiers datant.

Tableau 20 — objections et corrections. Une objection sans correction serait une limite, pas un audit : les limites irréductibles sont énumérées séparément au § 30.

32 Checklist

32.1 Opérateur, sur le terrain

1. Vérifier que le seuil de réfutation et le plan d'analyse sont déposés et datés.
2. Régler l'horloge sur le temps universel et noter l'écart.
3. Installer le trépied, lester, mettre de niveau, bloquer la rotule, rentrer la colonne.
4. Désactiver la stabilisation. Mise au point manuelle à l'infini, affinée en visée agrandie sur la cible.
5. Fixer l'exposition ; vérifier qu'aucun pixel de la cible n'est saturé. Sensibilité minimale.
6. Relever la position GNSS et son incertitude ; mesurer et photographier la hauteur de l'axe optique.
7. Enregistrer en format brut. Vingt vues au minimum, sans toucher à la mise au point, au cadrage ni au grossissement.
8. Prendre la vue grand-angle du point de vue, la vue de l'horizon à la même focale, et la mire si elle est disponible.
9. Relever température de l'air à deux hauteurs, température de l'eau, pression, humidité, au début et à la fin.
10. Noter l'état du ciel, la visibilité, l'état de la mer, et ce qui est visé en une phrase.
11. Reprendre la même visée plusieurs heures plus tard.
12. Au retour : transférer sans conversion, calculer les empreintes SHA-256, les déposer auprès d'un tiers datant, remplir la fiche du § 33.

32.2 Analyste, sur dossier

1. Vérifier les empreintes et leur datation par un tiers.
2. Établir au moins deux concordances externes ; vérifier qu'aucune discordance n'existe.
3. Reconstituer la chaîne optique et numérique ; séparer la part optique du grossissement de sa part numérique.
4. Établir position, altitudes, distance, azimuth et profil intermédiaire depuis des sources indépendantes datées ; noter chaque incertitude.
5. Établir la hauteur de la cible et l'altitude de sa base depuis une source indépendante ; ne jamais les lire dans l'image.
6. Classer les images selon la grille du § 18, sans connaître la prédiction.
7. Mesurer la résolution effective sur un bord franc de dimension connue.
8. Vérifier la condition de discrimination du § 28.2 avant toute mesure de la fraction visible.
9. Rechercher les cinq régimes atmosphériques sur la série ; consigner le résultat, positif ou négatif.
10. Faire mesurer les positions en pixels par trois analystes en aveugle ; reporter la dispersion.
11. Calculer la fraction visible observée et son incertitude.
12. Calculer la fraction prédite par chaque modèle déposé, et l'enveloppe de sensibilité.
13. Rapporter la combinaison de paramètres la plus défavorable à sa propre conclusion.
14. Rendre l'un des trois verdicts du § 28, et publier l'archive du § 34.

TROIS INTERDITS

- Ne pas déplacer le seuil après avoir vu les images.
- Ne pas invoquer un régime atmosphérique qu'on n'a pas cherché avant la comparaison.
- Ne pas lire dans l'image un paramètre qui servira ensuite à juger cette image.

33 Fiche standard d'observation

Un dossier incomplet est indéterminé, pas défavorable. Un champ sans valeur porte la mention *indisponible* ; il n'est jamais laissé en blanc ni rempli d'une valeur plausible.

Identification

Identifiant du dossier	_____
Date et heure UTC de la série	_____
Écart d'horloge mesuré	_____
Opérateur	_____
Campagne et référence du pré-enregistrement	_____

Observateur

Coordonnées et système de référence	_____
Incertitude annoncée par le récepteur	_____
Hauteur ellipsoïdale et modèle de géoïde	_____
Altitude du sol ou niveau d'eau	_____
Hauteur de l'axe optique au-dessus du sol	_____
Altitude h retenue et son incertitude	_____

Cible

Désignation exacte et sources d'identification	_____
Coordonnées et système de référence	_____
Altitude de la base z_b et sa source	_____
Hauteur totale H et sa source	_____
Parties pertinentes de cote connue, avec leurs sources	_____
Extension longitudinale de la cible	_____

Géométrie

Distance D , algorithme et incertitude	_____
Azimut géodésique	_____
Rayon de courbure d'Euler à cet azimuth	_____
Profil intermédiaire : source, pas d'échantillonnage	_____
Altitude maximale du profil et marge sous la ligne de visée	_____

Système photographique

Boîtier, objectif, numéros de série	_____
Focale optique réelle et focale équivalente	_____
Ouverture, temps de pose, sensibilité	_____
Résolution native du capteur et pas de photosite	_____
Résolution du fichier final	_____
Facteur de grossissement, part optique et part numérique	_____
Recadrage interne avant enregistrement	_____
Traitements computationnels actifs	_____
Profil de distorsion appliqué et résiduel	_____

Atmosphère

Température de l'air à chaque hauteur mesurée	_____
Température de surface de la mer	_____
Pression, humidité	_____
Profil vertical disponible : source, résolution, distance et écart horaire	_____
Classe de chaque donnée (A à E)	_____
Intervalle de k retenu et sa justification	_____

Images

Nombre de vues, noms de fichiers, empreintes SHA-256	_____
Preuve de datation des empreintes	_____
Classement de chaque vue selon le § 18	_____
Vues exclues et motif	_____
Résolution effective mesurée	_____
Toute transformation appliquée à la copie	_____

Mesures

Caractéristique désignée, et date de sa désignation	_____
Positions en pixels rendues par chaque analyste en aveugle	_____
Échelle par la focale, et échelle par les repères	_____
Hauteur visible, hauteur occultée	_____
Fraction visible observée et son incertitude	_____
Rapports de hauteur mesurés et attendus	_____

Résultat

Fraction prédite par chaque modèle, avec enveloppe	_____
Écart observé-prédit et incertitude composée	_____
Combinaison la plus défavorable à la conclusion	_____
Résultat de la recherche de régimes	_____
Verdict pour chaque modèle : compatible, incompatible, indéterminé	_____
Motif d'indétermination le cas échéant	_____

34 Structure d'archivage

L'archive doit permettre à un tiers de refaire l'analyse depuis les fichiers d'origine, sans rien demander à personne.

```
dossier-<identifiant>/
  00-preenregistrement/   plan daté, seuil, modèles déposés, preuve de dépôt
  10-originaux/           fichiers tels que sortis de l'appareil, jamais modifiés
  11-empreintes/          SHA256SUMS, date de calcul, preuve de datation par un tiers
  20-fiche/               fiche du § 33, en texte structuré et en PDF
  30-donnees-externes/    extraits géodésiques, topographiques, marégraphiques,
météorologiques, avec leur date d'édition
  40-contrôles/           mire, distorsion, stabilité, orientation, cohérence entre focales
  50-mesures/             relevés en pixels de chaque analyste, journal de classement horodaté
  60-calcul/              code, paramètres, germe aléatoire, sorties intermédiaires
  70-rapport/             rapport de chaque analyste, déclarations d'intérêt, rapport de synthèse
  90-journal/             journal horodaté de toutes les opérations, y compris les écarts au plan
```

Arborescence imposée. Les numéros fixent l'ordre de lecture : le pré-enregistrement vient avant les données, les données avant les mesures, les mesures avant le rapport.

- Le répertoire **10-originaux** est en lecture seule. Toute copie de travail vit ailleurs.
- Le fichier **SHA256SUMS** couvre l'ensemble de l'archive, et son empreinte est elle-même déposée.
- Le répertoire **90-journal** est en ajout seul : on n'y efface rien, on y ajoute les corrections.
- L'archive est publiée sous une licence permettant la reprise et la redémarche ; si un fichier ne peut être diffusé, son empreinte et le nom de son détenteur le sont.

35 Bibliographie

STATUT DE VÉRIFICATION

Le cahier des charges interdit de citer une source non vérifiée. Les références sont donc séparées en deux listes selon ce qui a pu être contrôlé le 3 septembre 2026.

La première liste rassemble les références dont le titre exact, les auteurs, la revue, le volume, la pagination ou le numéro d'article et l'identifiant ont été retrouvés auprès de l'éditeur ou d'un catalogue bibliographique.

La seconde rassemble des documents d'organisme désignés par leur référence officielle, dont l'édition en vigueur **n'a pas pu être vérifiée** à cette date. Ils sont nommés sans numéro d'édition ni année inventés, et l'édition applicable doit être confirmée avant toute publication du protocole.

35.1 Références vérifiées

- Moritz, H. (2000). *Geodetic Reference System 1980*. Journal of Geodesy 74, 128–133. DOI 10.1007/s001900050278.
Justifie : § 4.1, § 12 — définition de l'ellipsoïde GRS80 et du rayon moyen R_1 .
- Karney, C. F. F. (2013). *Algorithms for geodesics*. Journal of Geodesy 87, 43–55. DOI 10.1007/s00190-012-0578-z.
Justifie : § 12.3 — calcul de la géodésique et de l'azimut sur l'ellipsoïde.
- Pavlis, N. K., Holmes, S. A., Kenyon, S. C., Factor, J. K. (2012). *The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)*. Journal of Geophysical Research : Solid Earth 117, B04406. DOI 10.1029/2011JB008916. Correction : J. Geophys. Res. Solid Earth (2013), DOI 10.1002/jgrb.50167.
Justifie : § 12.1 — conversion entre hauteur ellipsoïdale et altitude.
- Ciddor, P. E. (1996). *Refractive index of air : new equations for the visible and near infrared*. Applied Optics 35(9), 1566–1573. DOI 10.1364/AO.35.001566.
Justifie : § 11.2 — réfractivité optique de l'air ; base de la constante employée.
- van der Werf, S. Y. (2003). *Ray tracing and refraction in the modified US1976 atmosphere*. Applied Optics 42(3), 354–366. DOI 10.1364/AO.42.000354.
Justifie : § 11.6 — méthode de traçage de rayon en atmosphère stratifiée.
- Lehn, W. H. (1979). *The Novaya Zemlya effect : an arctic mirage*. Journal of the Optical Society of America 69(5), 776–781.
Justifie : § 11.3, § 19.4 — conduit optique et mirages de forte inversion.
- Hirt, C., Guillaume, S., Wisbar, A., Bürki, B., Sternberg, H. (2010). *Monitoring of the refraction coefficient in the lower atmosphere using a controlled setup of simultaneous reciprocal vertical angle measurements*. Journal of Geophysical Research 115, D21102. DOI 10.1029/2010JD014067.
Justifie : § 11.3 — amplitude mesurée des variations de k près du sol. **Portée limitée** : mesures à environ 1,8 m au-dessus d'une prairie, sur des trajets courts, par temps ensoleillé ; les valeurs extrêmes rapportées (–4 à +16) ne sont pas transposables telles quelles à un trajet marin rasant de plusieurs dizaines de kilomètres.
- Recommandation UIT-R P.453-14 (2019). *The radio refractive index : its formula and refractivity data*. Union internationale des télécommunications.
Justifie : § 11.4 — formule de la réfractivité radioélectrique et définition des conduits. **Domaine radio** : citée précisément pour établir la différence avec le domaine optique.
- ISO 12233:2024. *Photography — Electronic still picture imaging — Resolution and spatial frequency responses*. Organisation internationale de normalisation.
Justifie : § 20.2, § 24 — mesure de la résolution par la méthode du bord incliné.

35.2 Documents d'organisme, édition à confirmer

- JCGM 100:2008, *Évaluation des données de mesure — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM)*, Bureau international des poids et mesures.
Justifierait : § 22 — évaluation et composition des incertitudes.
- JCGM 200:2012, *Vocabulaire international de métrologie (VIM)*, 3^e édition.
Justifierait : § 6 — terminologie des grandeurs et des incertitudes.
- Organisation météorologique mondiale, publication n° 8, *Guide des instruments et des méthodes d'observation*.
Justifierait : § 21 — conditions de mesure des grandeurs atmosphériques de surface.
- CIPA DC-008 / JEITA CP-3451, *Exchangeable image file format for digital still cameras : Exif*.
Justifierait : § 15.4, § 17 — champs de métadonnées exigés.
- Räbergh, J. M., *Refractive Index Formulae for Radio Waves*, Fédération internationale des géomètres.
Justifierait : § 11.4 — termes sec et humide de la réfractivité.

6. Torge, W., Müller, J., *Geodesy*, De Gruyter.

Justifierait : § 11.1, § 12.2 — coefficient de réfraction géodésique et rayons de courbure de l'ellipsoïde.

7. Copernicus DEM — *Global and European Digital Elevation Model*, Agence spatiale européenne.

Justifierait : § 12.3 — profil intermédiaire et altitude de base.

8. Organisation hydrographique internationale, publication S-44, *Normes pour les levés hydrographiques*.

Justifierait : § 12.3 — incertitudes bathymétriques et zéro des cartes.

35.3 Ce qui n'est cité nulle part

Aucune valeur du présent protocole n'est reprise d'une source secondaire non vérifiée. Les constantes physiques — g , R_d , la réfractivité optique — et les relations qui en découlent sont redérivées dans le code qui produit ce document, et l'accord de cette redérivation avec ses deux points d'ancrage physiques — gradient autoconvectif et seuil de conduit — est vérifié à chaque génération.