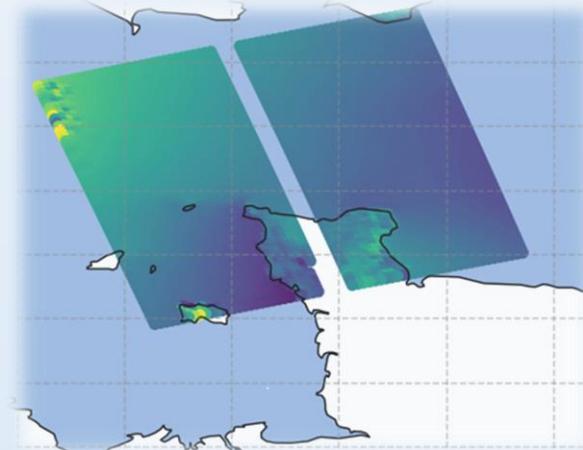
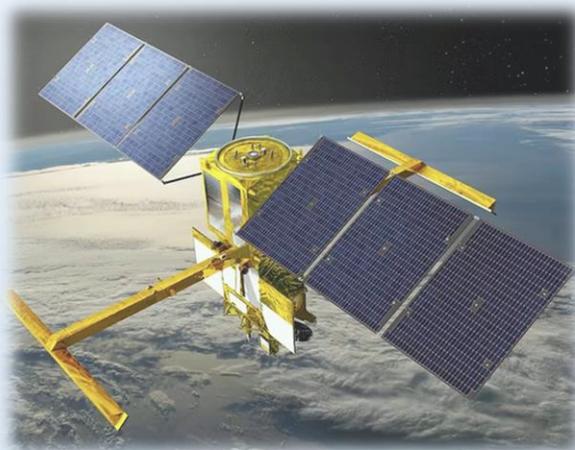




Topographie des océans avec le nouvel altimètre spatial **SWOT** (NASA/CNES) et le **LiDAR** aéroporté du laboratoire M2C

Soutenu le 7 septembre 2023 par Hugo KERSIMON



Contexte & objectifs

État de l'art

Stratégies d'étude

Problèmes rencontrés

Résultats & perspectives

SWOT

CalVal

M2C



Le satellite **SWOT** a été lancé le 16 décembre 2022

Cette mission a été menée conjointement entre la **NASA** (États-Unis) et le **CNES** (France) avec la collaboration de l'**ASC** (Canada) et l'**UKSA** (Royaume-Uni)

Son objectif est de fournir des **mesures topographiques** des surfaces en eaux de la Terre : océans, cours d'eaux, lacs, ...



CNES (2022)

Contexte & objectifs

État de l'art

Stratégies d'étude

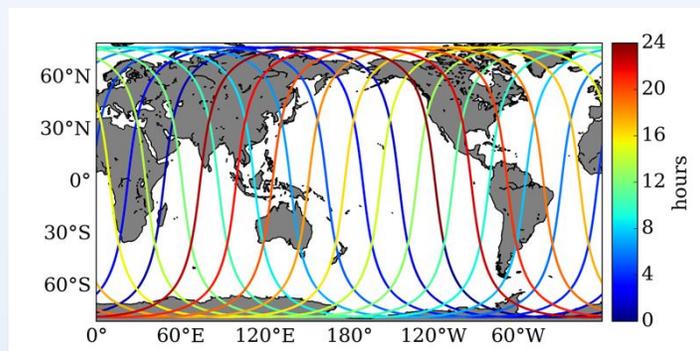
Problèmes rencontrés

Résultats & perspectives

SWOT

CalVal

M2C



NASA (2019)

SWOT doit connaître une première phase d'étalonnage de son altimètre, appelée **Calibration/Validation (CalVal)**

Cette période s'étale sur **3 mois**

La CalVal sert à confirmer la cohérence des performances du satellite avec celles d'instruments spatiaux et **in situ** dont la fiabilité est déjà prouvée



M2C (2023)

Contexte & objectifs

État de l'art

Stratégies d'étude

Problèmes rencontrés

Résultats & perspectives

SWOT

CalVal

M2C

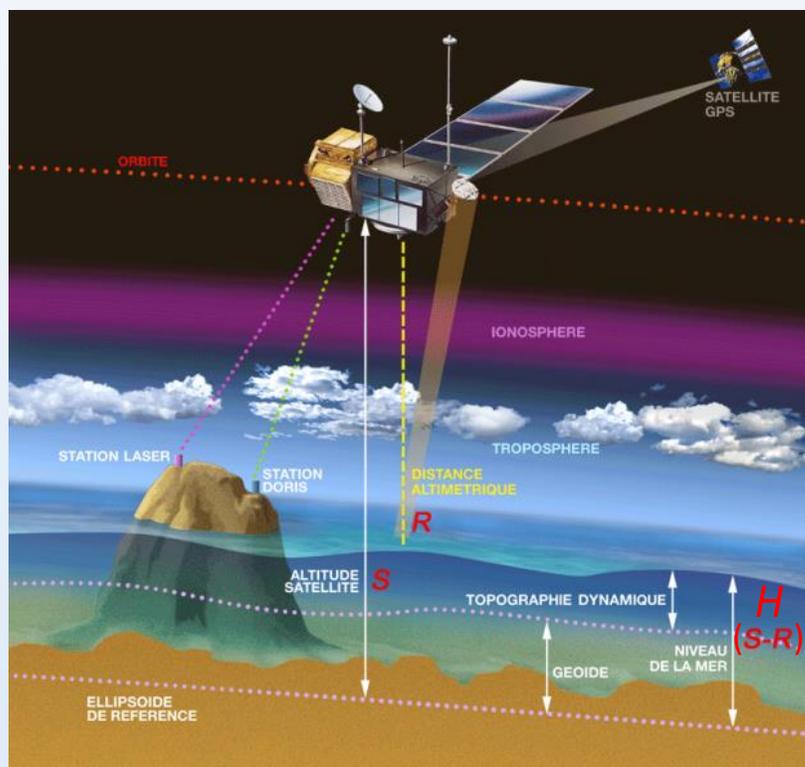
Le laboratoire Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) dispose d'un pôle de recherche consacré à la **télé-détection**

Le pôle souhaite participer à la CalVal de SWOT en employant le **LiDAR** comme instrument de mesure de référence

Pour ce faire, des **acquisitions** en avion sont programmées au large du Cotentin (Normandie) lors du passage exact de SWOT



M2C (mars 2023)



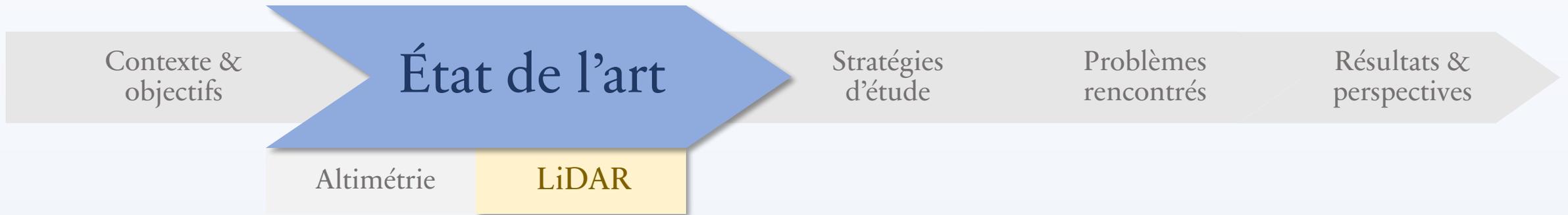
ill D.Ducros, CNES

La **hauteur H** de la surface de l'eau est calculée selon l'altitude du satellite S et la distance R mesurée par l'altimètre :

$$H = S - R$$

La mesure de range R doit subir diverses **corrections** liées à la traversée du signal dans l'atmosphère, à l'état de la mer, ...

SWOT est annoncé avec une précision de **50 cm** en élévation instantanée pouvant baisser à moins de 2 cm en moyennant celles comprises dans une surface d' 1 km^2



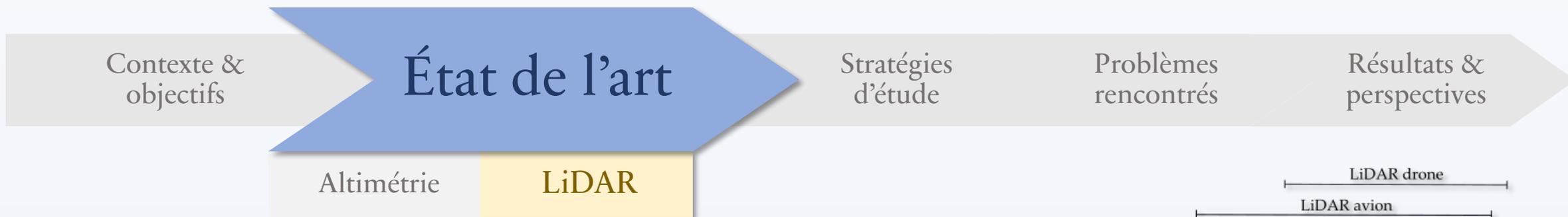
Le LiDAR tout comme l'altimètre est un **capteur actif**

Il est associé à un **récepteur GNSS** et à une **centrale inertielle** pour produire un nuage de points directement géoréférencé

Divers **paramètres** influent sur la densité de points : fréquence d'impulsion, fréquence de balayage, angle de Field of View (FoV), vitesse et hauteur de l'avion

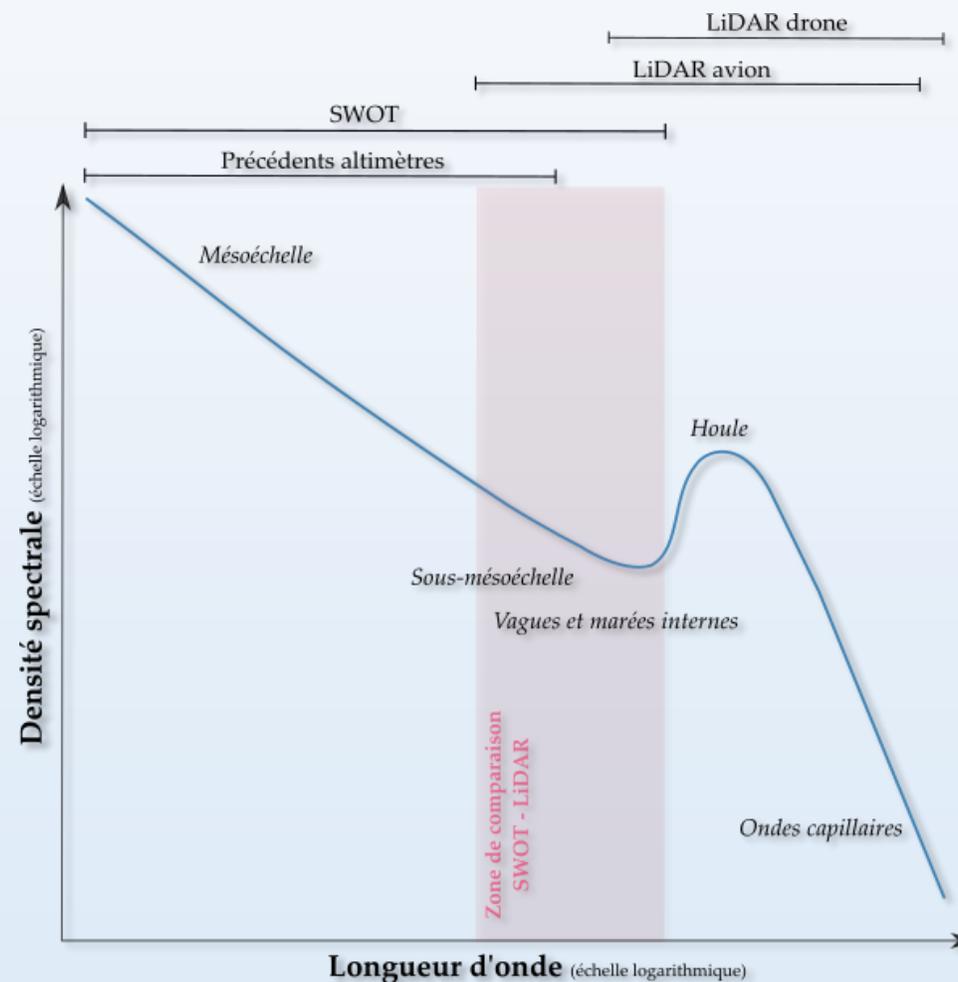


M2C (2023)



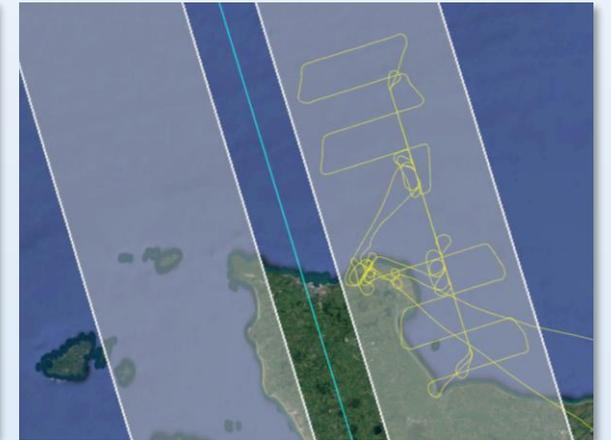
Il est important de délimiter un **domaine de définition commun**, et donc comparable, entre les mesures LiDAR et satellitaires

Cette zone de comparaison concerne les longueurs d'onde de variation de hauteur de la surface de l'eau comprises entre **15 et 150 km**

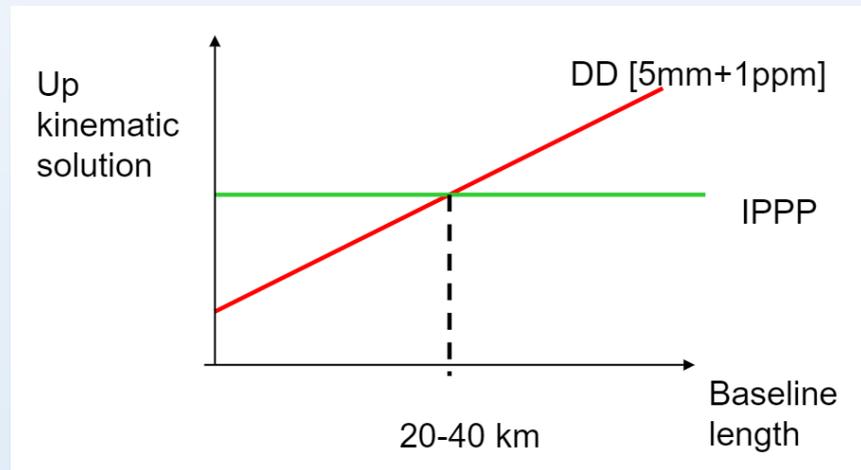
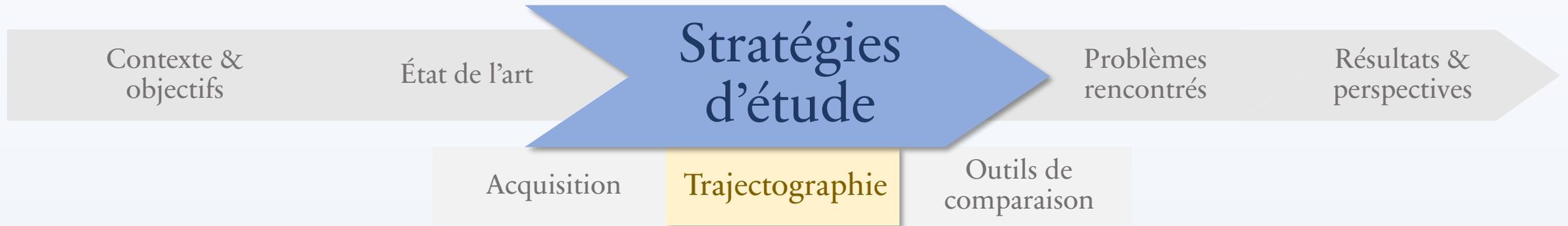




Les deux principales contraintes des vols programmés pour la mission SWOT sont d'effectuer l'acquisition LiDAR au **même endroit** et au **même moment** que le passage du satellite



(23.05.2023)



Perosanz (2014)

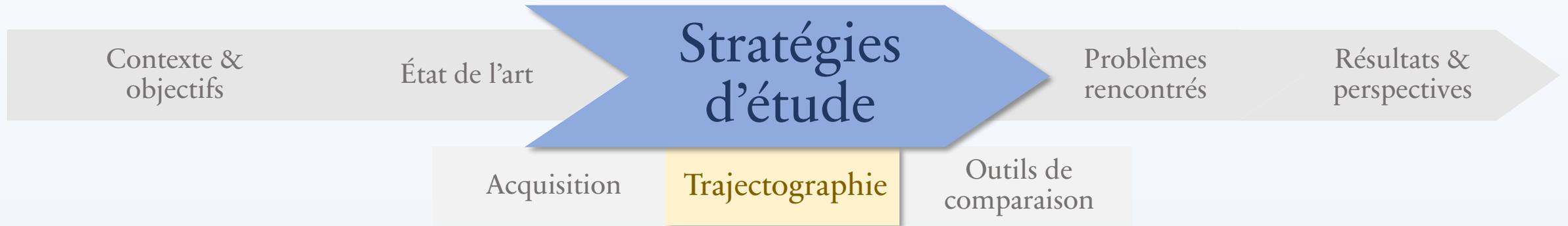
La technique de positionnement employée est l'**integer Point Positioning (iPPP)**

Elle permet un positionnement **absolu** et **cinématique**

L'iPPP se révèle **plus adapté** que le DGPS en raison de l'éloignement en mer des bases GNSS

Le traitement est réalisé via l'outil **GINS** développé par le CNES et le GRGS

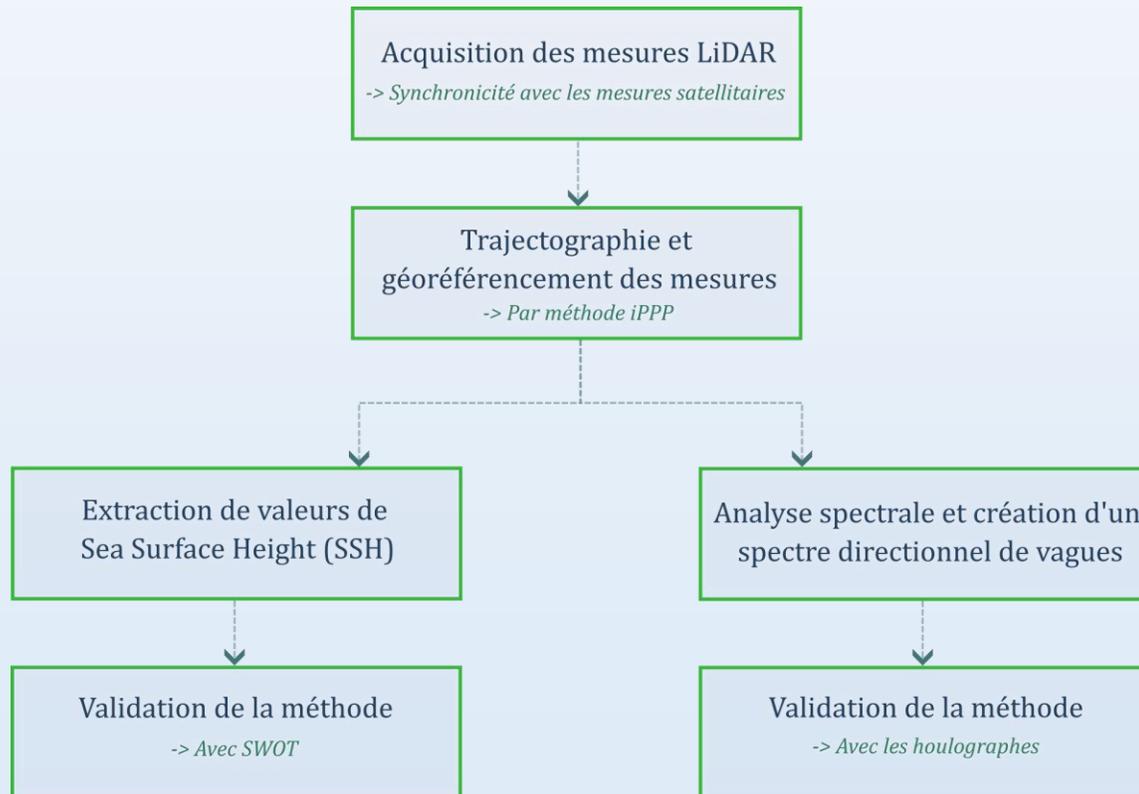




	Positionnement de l'antenne GNSS de l'avion		Géoréférencement des mesures LiDAR
Nom du vol	RMS sur les observations de phase (cm)	Moyenne des écarts-types sur h issus de la matrice de covariance (cm)	Écart-type sur les valeurs de dz avec des points au sol (cm)
SWOT1	1.0	0.9 +/- 0.4	5.7
SWOT3	1.1	1.2 +/- 0.4	6.9

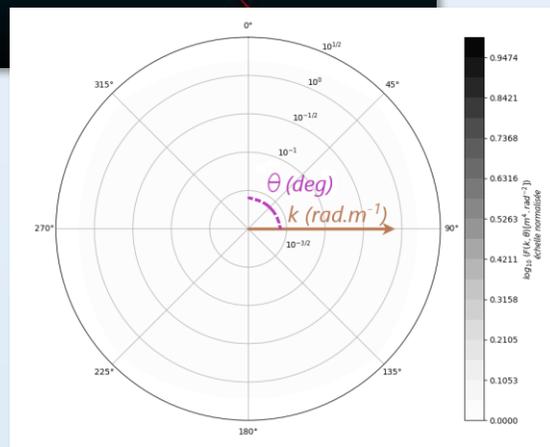
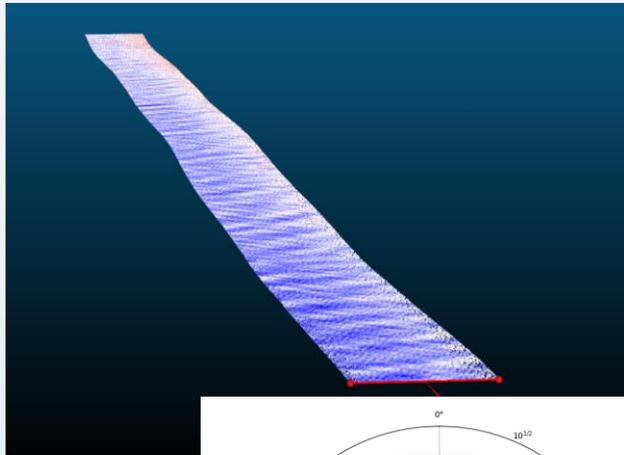
Pour les vols traités, les **positions de l'antenne** sont connues à moins de 2 cm

Le **géoréférencement des mesures LiDAR** à partir de l'antenne présente un écart compris entre 5 et 8 cm qui convient aux exigences de l'étalonnage de SWOT



Deux moyens de comparaison entre mesures LiDAR et satellitaires ont été conçues dans ce travail :

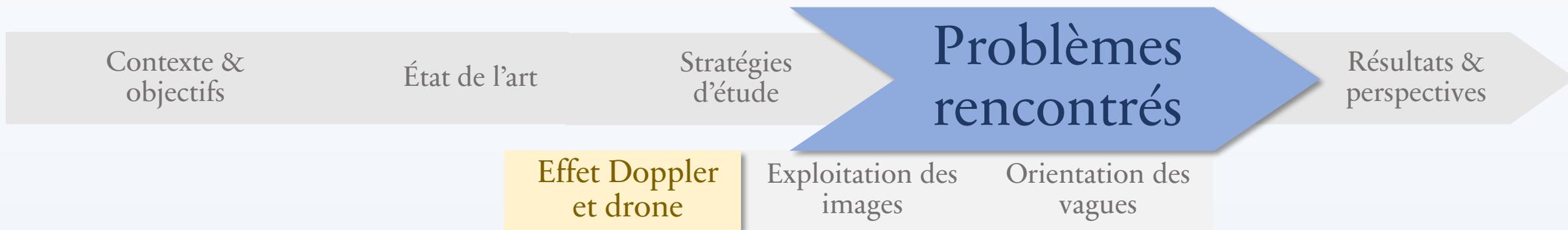
- La détermination de valeurs de **Sea Surface Height (SSH) LiDAR**;
- La création d'un **spectre de vagues** à partir de données LiDAR.



Le spectre de vagues renseigne les informations liées aux propriétés des vagues comme leur **direction**, leur **amplitude** ou leur **longueur d'onde**.

Pour passer d'un nuage de points 3D à un signal 2D, il est nécessaire de procéder à une **rastérisation**.

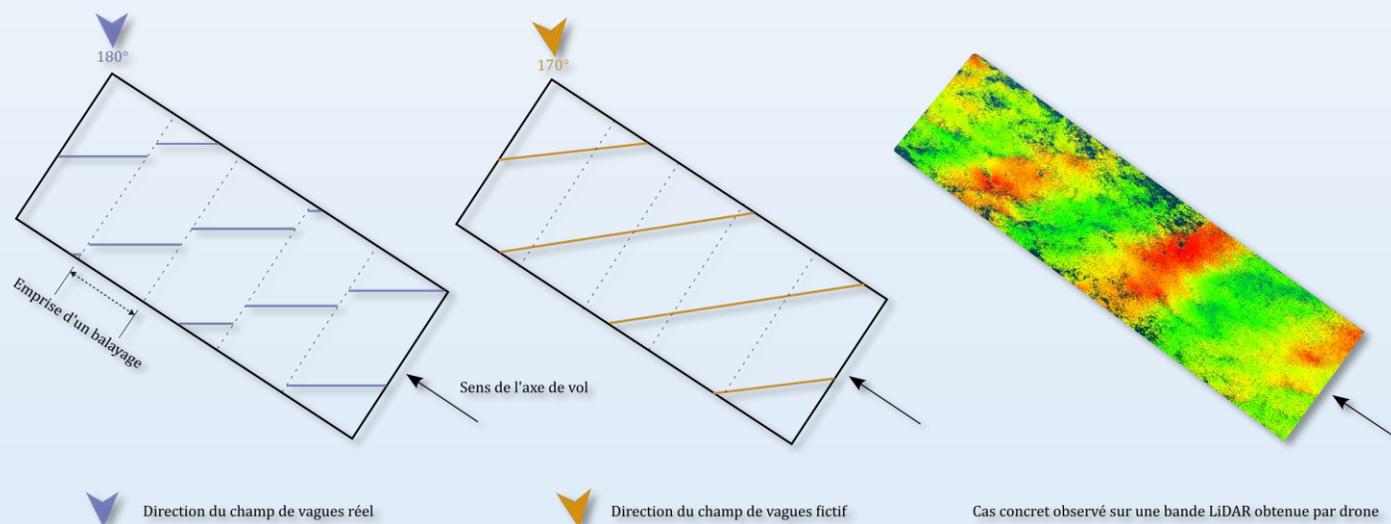
Le spectre s'obtient en calculant le carré du module de la **transformée de Fourier** du signal 2D.

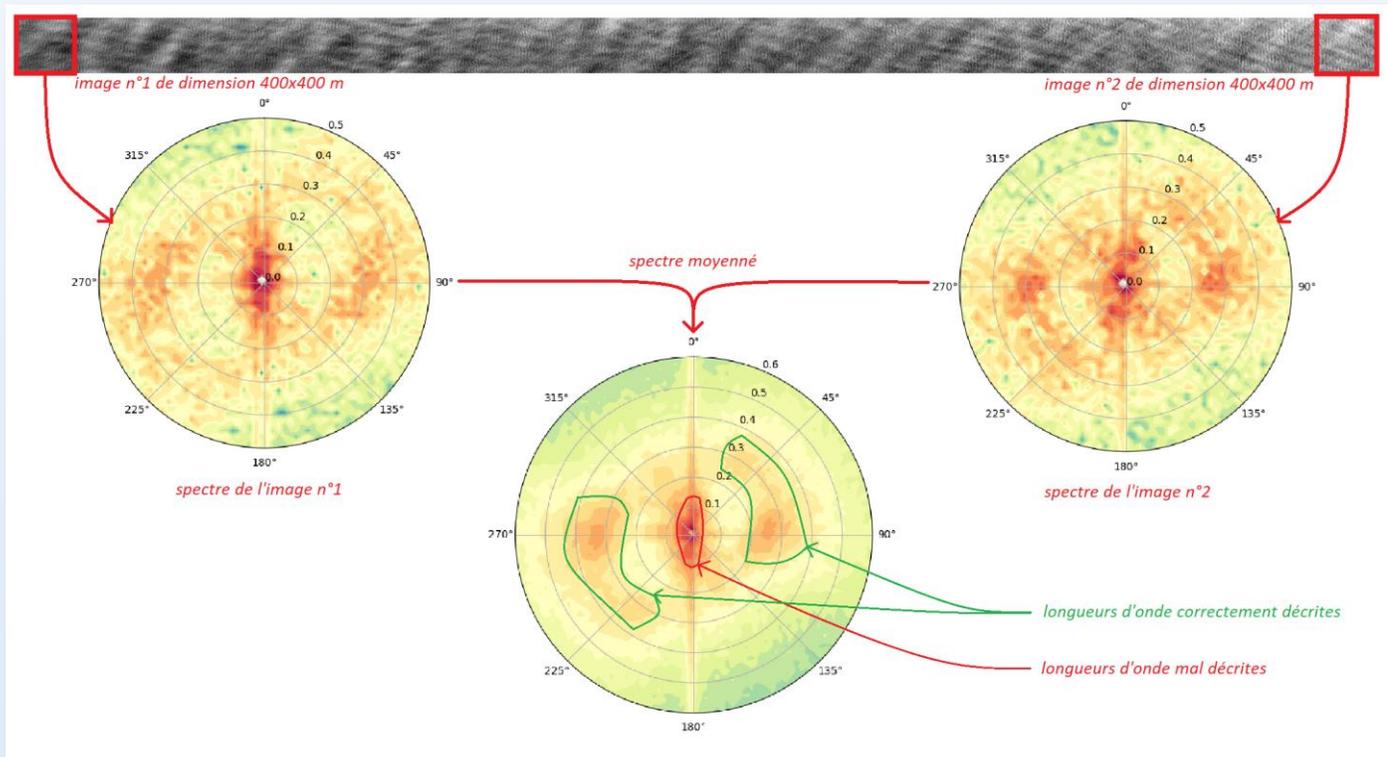
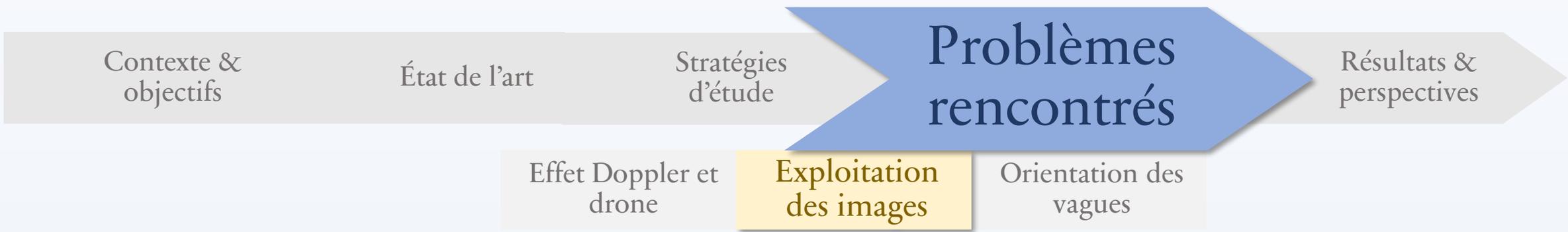


L'avion ainsi que les vagues sont en mouvement lors de l'acquisition et se déplacent dans des directions différentes ce qui provoque des effets de **compression** ou de **dilatation de fréquence**

Sa correction (Walsh, 1985) représente environ **20%** du nombre d'onde pour les grandes longueurs d'onde

Dans le cas du **drone**, des complications s'ajoutent lorsque l'on souhaite corriger cet effet du spectre





Une première méthode repose sur le **découpage** de la bande 2.5D en images carrées

Le spectre en fréquence de chaque image découpée est calculé séparément puis **moyenné** pour l'ensemble de la bande

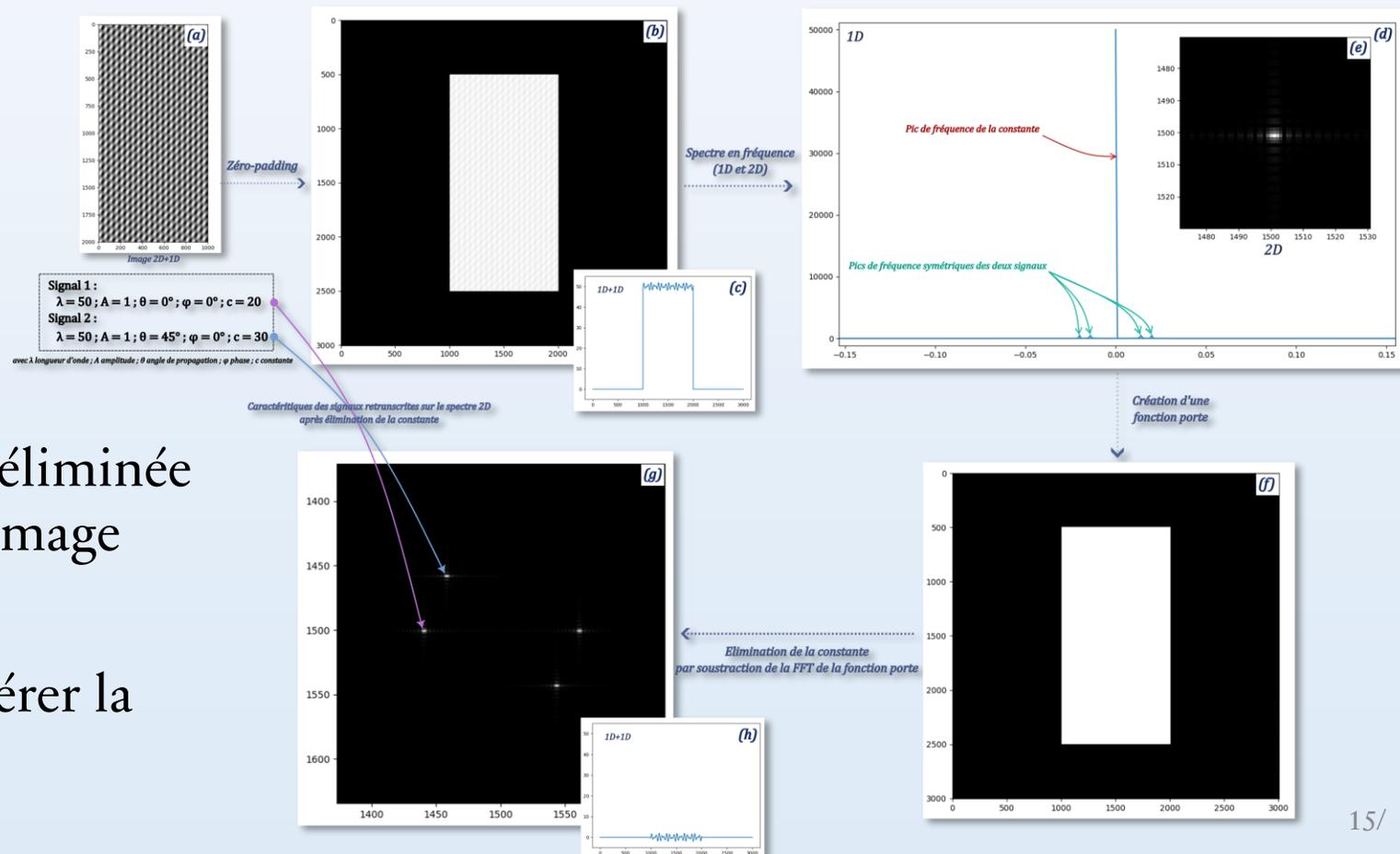
Cette stratégie **limite** les longueurs d'onde observables

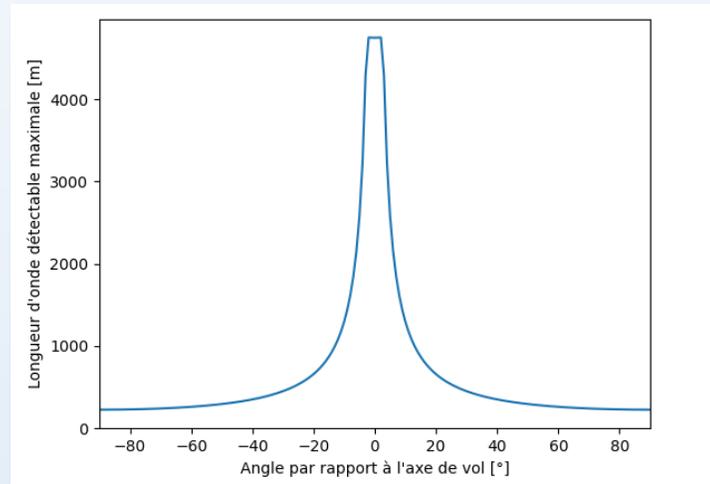
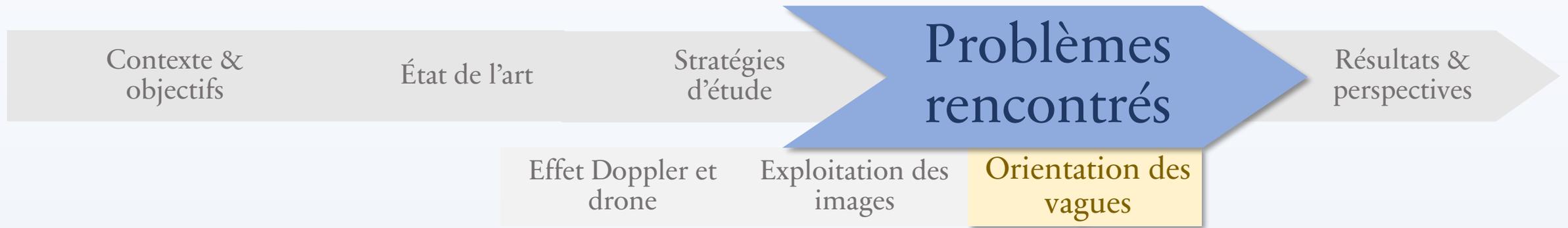


Pour pallier la limitation de la méthode de découpage de la bande, une autre fondée sur le principe de **zéro-padding** est mise en œuvre

Une **constante** doit alors être éliminée pour retrouver le spectre de l'image initiale

La méthode permet de considérer la bande dans sa **globalité**

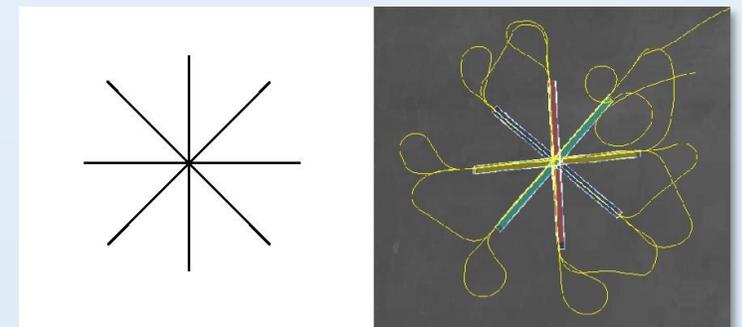


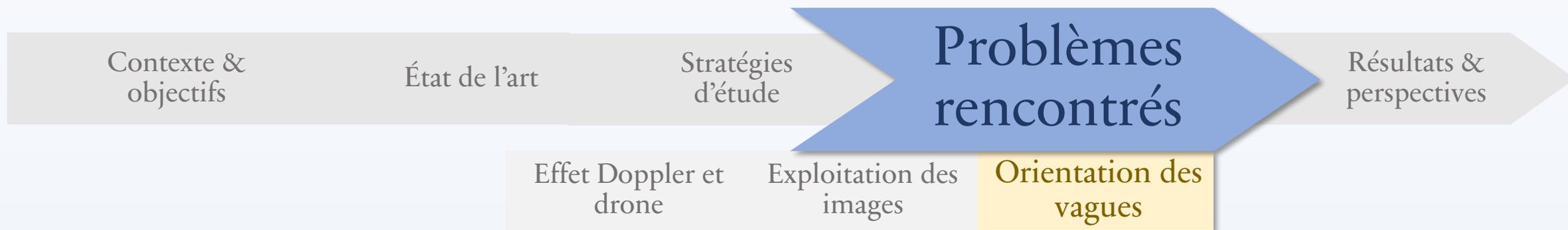


La forme rectangulaire des bandes LiDAR contraint les longueurs d'onde détectables par le spectre

La **longueur d'onde maximale** dépend de l'angle entre la direction de vol et celle du champ de vagues

Une solution envisagée est de réaliser une **acquisition en forme d'étoile**

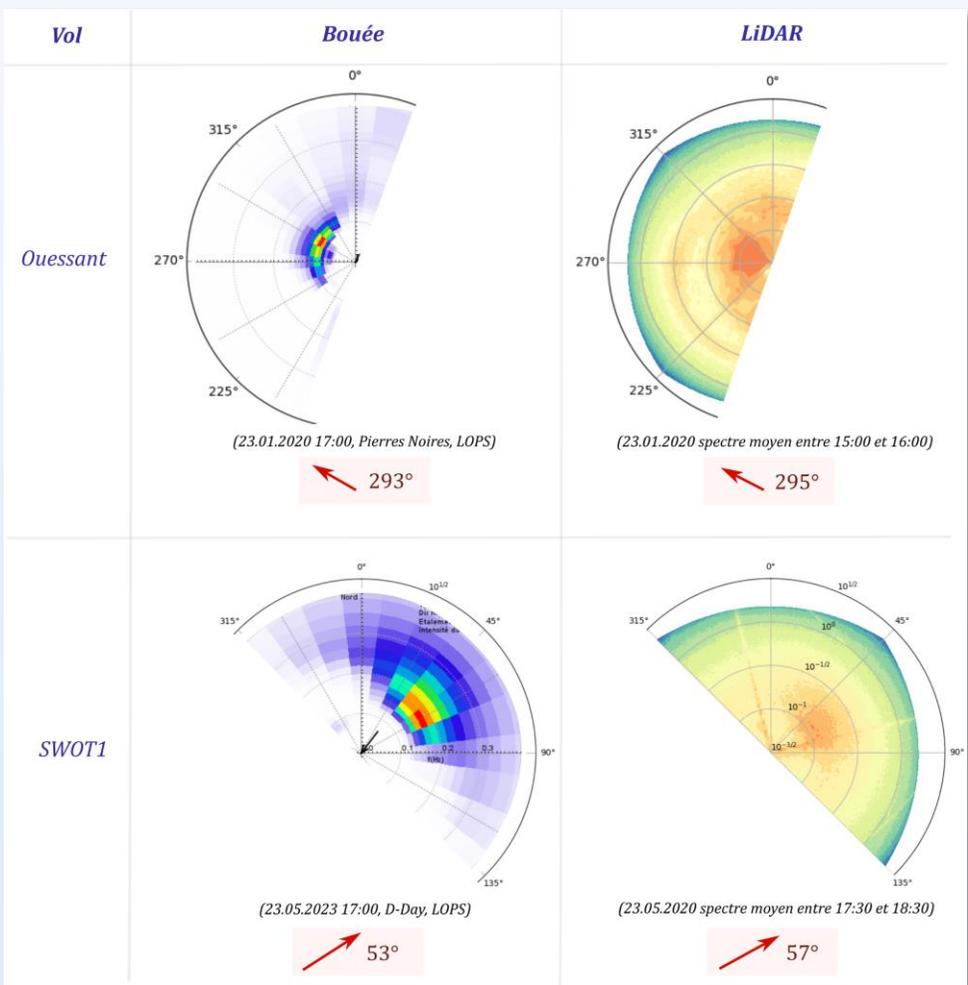




Bande	Heure (UTC)	Direction axe de vol (deg)	Direction principale du champ de vagues estimée (deg)	Angle entre axe de vol et direction de vague (deg)	Écart à la moyenne de la direction de vague (deg)
B1	12:59:40	45	283	122	17
B2	13:05:02	270	305	35	5
B3	13:10:43	135	311	176	11
B4	13:16:26	0	287	73	13
B5	13:21:37	180	309	129	9
B6	13:37:45	315	305	10	5
B7	13:43:38	90	292	158	8
B8	14:00:24	225	307	82	7
Moyenne			299.9		9.3

Lorsque la bande possède la **même direction** et le **même sens** que les vagues, la précision est améliorée

Une **moyenne** entre toutes les bandes atténue l'impact de l'orientation des vagues

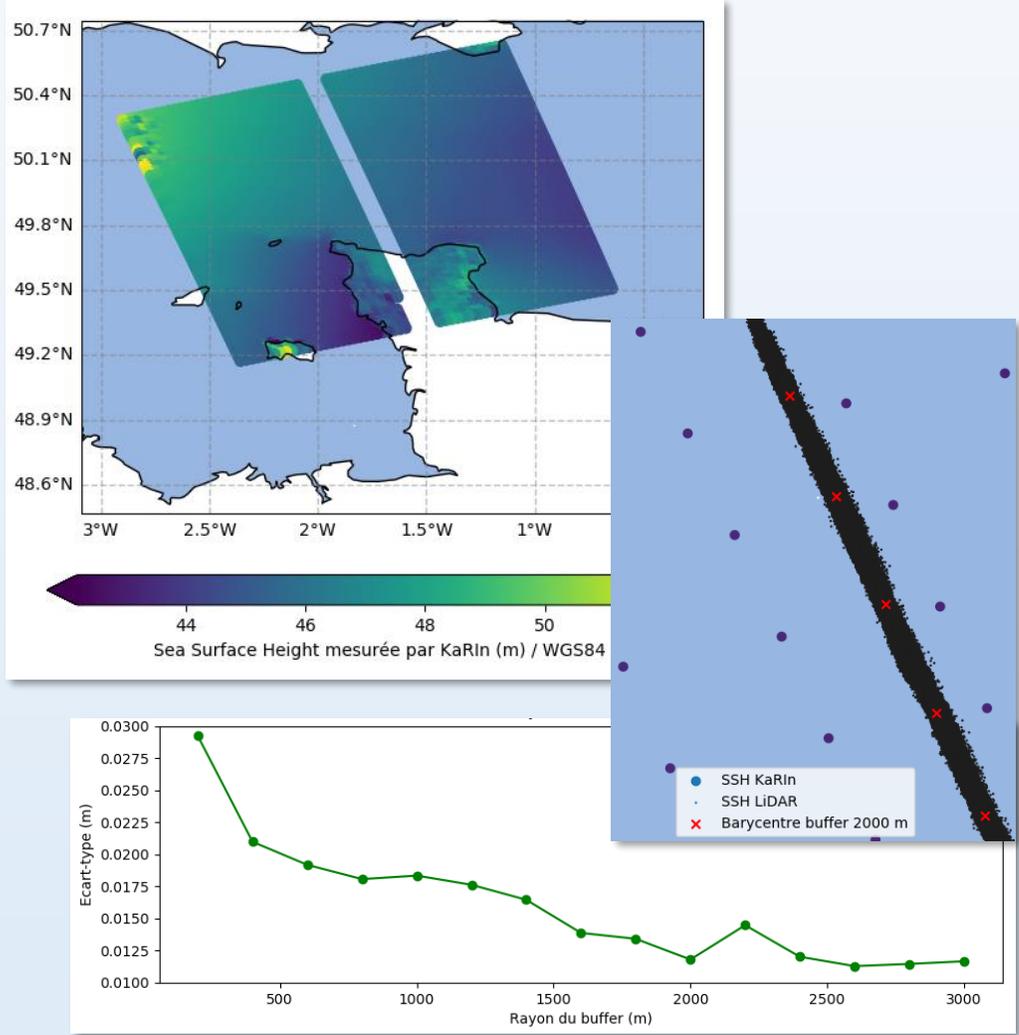


Validation du spectre Premiers produits de SWOT Perspectives

Les spectres sont comparés avec des **bouées houlographes** proches de la zone d'étude

Ils présentent des directions principales similaires à **+/- 5°**

Ces deux comparaisons permettent de valider le spectre LiDAR malgré un **défaut de synchronicité** de plusieurs minutes



Les **premières données SWOT** ont été recueillies fin juillet

Elles correspondent aux mesures **SSH Low Resolution (LR)** collectées par l'altimètre KaRIn et dotées d'une résolution de **2 x 2 km**

L'extraction de valeurs SSH LiDAR s'opère par détermination de **buffers**

L'écart-type entre les SSH comparés prouve que le rayon du buffer devient **optimal** lorsque celui-ci est équivalent à la résolution de SWOT

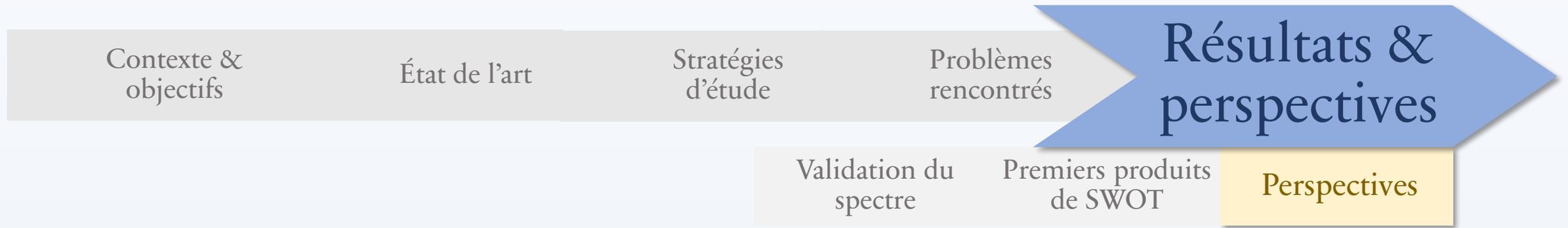


Une étude sur l'impact de la **désynchronisation** des mesures est réalisée pour les bandes de l'acquisition SWOT3 :

Bande	A	B	C	D	E	F
Désynchronisation avec SWOT (minutes)	-17	-3	8	16	26	37
Biais moyen (m)	1.942	1.794	1.788	1.726	1.555	1.300
Écart-type (m)	0.024	0.012	0.021	0.023	0.045	0.064

Pour la bande la plus synchronisée, un **biais systématique** apparaît et est de l'ordre de 1.8 m

Des pistes concernant son **origine** ont été explorées dans l'attente d'une réponse du CNES : référentiel ellipsoïdal différent, correction de la marée océanique, biais des données préliminaires, ...



De nouvelles comparaisons avec les produits finaux de SWOT, disponibles à partir de fin août 2023, devraient permettre de comprendre l'origine du biais

D'autres produits de SWOT tels que la SWH ou le SSB pourront être validés par détermination d'une hauteur de vagues à partir de la densité spectrale

Les moyens de comparaison développés dans ce travail sont également **améliorables** (résolution de l'ambiguïté à 180° du spectre, correction de l'effet Doppler dans le cas du drone LiDAR, ...)