

SYSTEME KHEOPS v3.4

ADC 1 MHz - Propagation Acoustique - Bulle Dynamique

Documentation Technique Complete
Detection et Localisation Acoustique de Drones par TDOA

Version	3.4 ADC1M
Date	01/01/2026
Classification	Documentation Technique
Langue	Francais

Simulation JavaScript - Interface Web Interactive

TABLE DES MATIERES

1. Introduction et Vue d'Ensemble	3
2. Architecture du Systeme	4
3. Propagation Acoustique - ISO 9613-1	5
4. Localisation TDOA	8
4.1 Methode de Chan-Ho	8
4.2 Correlation Croisee ADC 1 MHz	10
4.3 Comparaison Etat de l'Art	11
5. Filtrage et Estimation	13
5.1 Filtre de Kalman 6D	13
5.2 RANSAC pour Outliers	15
5.3 Analyse de Coherence Geometrique	16
6. Modelisation Environnementale	18
6.1 Modele de Vent (Prandtl)	18
6.2 Profil SNR et Bulle de Detection	19
7. Conduite de Tir et Handover	21
8. References Bibliographiques	22

1. INTRODUCTION ET VUE D'ENSEMBLE

1.1 Objectif du Systeme

Le systeme **Kheops v3.4** est un simulateur de detection et de localisation acoustique de drones en temps reel. Il implemente une chaine complete de traitement depuis l'acquisition des signaux acoustiques a haute frequence (ADC 1 MHz) jusqu'a la conduite de tir avec transfert de cible (handover) vers une camera optique.

Cette documentation presente les algorithmes implementes, leur fondement theorique, et une comparaison avec l'état de l'art scientifique dans chaque domaine.

1.2 Principes Fondamentaux

La detection acoustique de drones exploite le bruit caracteristique genere par les rotors (helices). Ce bruit presente un spectre harmonique lie a la frequence de passage des pales (BPF - Blade Passing Frequency) :

$$f_0 = N_{\text{pales}} \times \text{RPM} / 60$$

Pour un drone typique a 4 pales tournant a 10 000 RPM, la frequence fondamentale est de 666.7 Hz, avec des harmoniques jusqu'a plusieurs kHz.

1.3 Architecture Generale

Module	Fonction	Algorithme Principal
Acquisition ADC	Echantillonnage 1 MHz x 5 canaux	Wavetable + Int16
Extraction TDOA	Differences de temps d'arrivee	Cross-Correlation
Localisation	Position 3D du drone	Chan-Ho + RANSAC
Filtrage	Lissage et prediction	Kalman 6D
Coherence	Validation geometrique	$C(10,4) = 210$ solutions
Propagation	Vitesse du son variable	ISO 9613-1
Environnement	Perturbation vent	Profil Prandtl
Tir	Engagement cible	Prediction + Ghosting

2. ARCHITECTURE DU SYSTEME

2.1 Configuration des Capteurs

Le systeme utilise un reseau de **5 microphones** disposes en pyramide a base carree :

Capteur	Position (x, y, z)	Role
S0	(-0.5, -0.5, 0) m	Coin Sud-Ouest
S1	(+0.5, -0.5, 0) m	Coin Sud-Est
S2	(+0.5, +0.5, 0) m	Coin Nord-Est
S3	(-0.5, +0.5, 0) m	Coin Nord-Ouest
S4 (Zenith)	(0, 0, +0.636) m	Apex pyramide (resolution Z)

Note technique : La geometrie pyramidale (base carree 1m x 1m, apex a 0.636m) est optimisee pour la resolution 3D. Le capteur S4 zenithal est crucial pour eviter l'ambiguite d'altitude. La hauteur de 0.636m correspond a une pyramide ou les aretes laterales sont egales aux cotes de la base.

2.2 Simulateur ADC 1 MHz

L'acquisition des signaux acoustiques est simulee avec les caracteristiques suivantes :

Parametre	Valeur	Justification
Frequence echantillonnage	1 MHz	Resolution temporelle ~1 us = 0.34 mm
Resolution	16 bits signe	Dynamique 96 dB
Fenetre analyse	5 000 samples	Fenetre de 5 ms
Canaux	5 simultanes	1 par microphone
Format buffer	Int16Array circulaire	Efficacite memoire et correlation rapide

2.3 Generation du Signal (Wavetable)

Pour eviter le calcul couteux des fonctions trigonometriques a 1 MHz, le signal du drone est precalcule dans une **wavetable** contenant une periode complete. La lecture se fait par interpolation lineaire sub-sample :

```
signal(t) = SUM[h=1..5] sin(2*pi*h*f0*t) / h
```

Chaque harmonique est ponderee par 1/h pour reproduire un spectre realiste de bruit de rotor (decroissance des harmoniques).

3. PROPAGATION ACOUSTIQUE - ISO 9613-1

3.1 Formule Fondamentale

La vitesse du son dans l'air humide est calculee selon la norme **ISO 9613-1** (Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors). Cette norme internationale est la reference pour les calculs acoustiques en exterieur.

$$c = \sqrt{\gamma * R * T / M}$$

ou γ est le rapport des chaleurs specifiques du melange gazeux, R la constante universelle des gaz parfaits (8.314 J/mol/K), T la temperature absolue en Kelvin, et M la masse molaire du melange air-vapeur d'eau-CO₂.

3.2 Pression de Vapeur Saturante

La pression de vapeur saturante est calculee selon la formule de Magnus-Tetens amelioree (ISO 9613-1 Annexe B) :

$$P_{sat}(T) = P_r * 10^{(-6.8346 * (T01/T)^{1.261} + 4.6151)}$$

avec $P_r = 101\ 325$ Pa (pression de reference) et $T01 = 273.16$ K (point triple de l'eau).

3.3 Facteur d'Enhancement

Le facteur d'enhancement f corrige les ecarts au comportement de gaz parfait a haute pression. Il est approxime par :

$$f(T,p) = 1.00062 + 3.14e-8*p + 5.6e-7*(T-T01)^2$$

3.4 Composition du Melange Gazeux

Composant	Formule	M (g/mol)	gamma	Fraction typique
Air sec	N ₂ +O ₂ +Ar	28.9652	1.400	~97%
Vapeur d'eau	H ₂ O	18.01528	1.330	0-4%
Dioxyde carbone	CO ₂	44.0095	1.293	~420 ppm

3.5 Calcul du Rapport gamma du Melange

Le rapport des chaleurs specifiques du melange est obtenu par moyenne ponderee des capacites calorifiques molaires :

$$Cv_{mix} = \sum(x_i * Cv_i) \quad Cp_{mix} = Cv_{mix} + R \quad \gamma_{mix} = Cp_{mix} / Cv_{mix}$$

3.6 Comparaison avec l'Etat de l'Art

Implementation Kheops vs References :

Methode	Precision	Utilisee dans Kheops	Notes

ISO 9613-1	+/- 0.05%	OUI (principale)	Standard international
Cramer (1993)	+/- 0.1%	OUI (comparaison)	J. Acoust. Soc. Am.
Approximation simple	+/- 1%	NON	$c = 331.3 + 0.606 \cdot T$

La formule polynomiale de **Cramer (1993)** est une alternative validee scientifiquement, publiee dans le Journal of the Acoustical Society of America (Vol. 93, No. 5). Elle est utilisee dans Kheops pour verification croisee.

3.7 Sensibilite aux Parametres

Parametre	Variation	Impact sur c	Impact TDOA (100m)
Temperature	+10 C	+6 m/s (+1.7%)	~0.5 ms
Humidite	+50% HR	+1 m/s (+0.3%)	~0.1 ms
Pression	+50 hPa	Negligeable	< 0.01 ms
CO2	+200 ppm	-0.1 m/s	< 0.01 ms

4. LOCALISATION TDOA

4.1 Principe du TDOA

La methode **TDOA** (Time Difference of Arrival) exploite les differences de temps d'arrivee du signal entre paires de capteurs. Pour N capteurs, on dispose de $C(N,2) = N(N-1)/2$ mesures TDOA independantes :

$$\tau_{ij} = t_i - t_j = (r_i - r_j) / c$$

Avec 5 capteurs, Kheops dispose de **10 paires TDOA** redondantes.

4.2 Methode de Chan-Ho (1994)

L'algorithme de **Chan et Ho** est une solution analytique fermee pour la localisation TDOA hyperbolique. Publie dans IEEE Transactions on Signal Processing (Vol. 42, No. 8, August 1994), il reste une reference majeure.

4.2.1 Formulation du Probleme

Soit S0 le capteur de reference et Si les autres capteurs. On definit $d_{i0} = c * \tau_{i0} = R_i - R_0$:

$$R_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2$$

4.2.2 Systeme Lineaire

En eliminant les termes non-lineaires, Chan obtient un systeme $AX = B$ surdetermine ou $X = [x, y, z, R_0]$:

$$A = [x_i - x_0, y_i - y_0, z_i - z_0, d_{i0}] \quad B = 0.5 * (|S_i|^2 - |S_0|^2 - d_{i0}^2)$$

4.2.3 Implementation Kheops

La resolution utilise l'elimination de Gauss avec pivot partiel pour stabilite numerique. Une **detection de zone zenithale** est ajoutee car les TDOA horizontaux tendent vers zero quand le drone est a la verticale :

$$\text{isNearZenith} = \text{SUM}(|\text{TDOA horizontaux}|) < 0.5 \text{ m}$$

Innovation Kheops : En zone zenithale, les TDOA entre les 4 capteurs au sol (S0-S3 formant le carre de base) convergent vers zero. L'altitude est alors recalculée depuis le capteur S4 (apex de la pyramide a $z=0.636\text{m}$). Cette correction n'est pas presente dans l'algorithme original de Chan-Ho.

4.3 Correlation Croisee ADC 1 MHz

L'extraction des TDOA se fait par **correlation croisee** entre les signaux de chaque paire de capteurs :

$$R_{xy}(\tau) = \text{SUM}_k [x[k] * y[k+\tau]]$$

4.3.1 Algorithme en Deux Phases

Phase	Pas	Plage	Objectif
Recherche grossiere	8 samples	+/- 2000 samples	Localiser le pic
Recherche fine	1 sample	+/- 8 samples	Affiner le lag

Interpolation parabolique	Sub-sample	+/- 1 sample	Precision < 1 us
---------------------------	------------	--------------	------------------

4.3.2 Interpolation Parabolique Sub-Sample

La position du pic de correlation est raffinée par interpolation parabolique sur les 3 points autour du maximum :

$$\text{delta} = (\text{C}_m - \text{C}_p) / (2 * (2 * \text{C}_0 - \text{C}_m - \text{C}_p))$$

ou C_0 est la corrélation au lag optimal, C_m et C_p aux lags adjacents (-1 et +1). Cette technique est standard dans le traitement du signal (cf. Smith, 2007 - Spectral Audio Signal Processing).

4.4 Comparaison avec l'Etat de l'Art TDOA

Tableau comparatif des méthodes de localisation TDOA :

Méthode	Type	Avantages	Inconvénients	Kheops
Chan-Ho (1994)	Analytique fermé	Rapide, solution explicite	Singulier au zenith	OUI + correctif
Taylor Series	Itératif	Precis après convergence	Init-dependant, lent	NON
Spherical Interp.	géométrique	Robuste, intuitif	Moins précis	NON
ML (Maximum Lik.)	statistique	Optimal si bruit connu	Tres coûteux	NON
GCC-PHAT	Corrélation	Robuste réverbération	Perd amplitude	Partiel

References clés :

- Chan, Y.T. et Ho, K.C. (1994). IEEE Trans. Signal Processing, 42(8), 1905-1915
- Knapp, C. et Carter, G.C. (1976). GCC - IEEE Trans. ASSP, 24(4), 320-327
- Brandstein, M.S. et Silverman, H.F. (1997). ICASSP'97, Vol. 1, pp. 375-378

5. FILTRAGE ET ESTIMATION

5.1 Filtre de Kalman 6D

Un **filtre de Kalman linéaire** fusionne les mesures acoustiques avec un modèle dynamique du drone. L'état 6D comprend position et vitesse :

$$\mathbf{x} = [\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{vx}, \mathbf{vy}, \mathbf{vz}]'$$

5.1.1 Modèle de Prediction

Le modèle de transition suppose une vitesse constante (CV - Constant Velocity) :

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{F} * \mathbf{x}_{(k-1)} + \mathbf{w}_k$$

La matrice \mathbf{F} est une matrice 6x6 avec dt sur les positions par rapport aux vitesses. Le bruit de processus w modélise les accélérations imprévues.

5.1.2 Matrice de Covariance Q

La matrice Q intègre le bruit d'accélération $\sigma_a = 2 \text{ m/s}^2$ (typique pour manœuvres de drone commercial) :

Bloc	Position (3x3)	Cross (3x3)	Vitesse (3x3)
Position	$dt^{4/4} * \sigma_a^2 * I_3$	$dt^{3/2} * \sigma_a^2 * I_3$	-
Vitesse	$dt^{3/2} * \sigma_a^2 * I_3$	-	$dt^{2} * \sigma_a^2 * I_3$

5.1.3 Mise à Jour Adaptative

Innovation Kheops : Le bruit de mesure R est ajusté dynamiquement selon l'indice de cohérence géométrique. Une faible cohérence augmente l'incertitude :

$$R_{adaptatif} = R_{base} / \max(0.1, coherence/100)$$

5.2 RANSAC pour Outliers TDOA

L'algorithme **RANSAC** (Random Sample Consensus) filtre les TDOA aberrants causés par le bruit ou des multi-trajets. Introduit par Fischler et Bolles (1981), il est adapté ici à la géométrie hyperbolique :

Paramètre RANSAC	Valeur	Description
Iterations	20	Nombre de tirages aléatoires
Echantillon	4 capteurs	Minimum pour solution 3D
Seuil inlier	3.0 m	Distance max acceptée
Ratio minimum	60%	Inliers requis pour validation

5.3 Analyse de Cohérence Géométrique

Kheops implémente une analyse de cohérence basée sur les **C(10,4) = 210 combinaisons** de 4 paires TDOA parmi les 10 disponibles. Chaque combinaison donne une position candidate.

5.3.1 Calcul de l'Indice de Cohérence

L'indice de coherence (0-100%) quantifie la dispersion des solutions :

```
sigma = sqrt(SUM(||Pi - P_median||^2) / N) Coherence = 100 * exp(-sigma / sigma_seuil)
```

avec $\text{sigma_seuil} = 5 \text{ m}$. Un indice $> 70\%$ indique une localisation fiable.

5.3.2 Lissage par EMA

Pour éviter les oscillations dues aux perturbations transitoires (rafales, feuillage), un **lissage exponentiel (EMA)** est appliqué :

```
Coherence_EMA = alpha * Coherence_brute + (1-alpha) * Coherence_EMA_prev
```

avec $\alpha = 0.3$ pour un bon compromis réactivité/stabilité.

5.4 Comparaison Etat de l'Art - Filtrage

Méthode	Complexité	Multi-modèle	Non-linéarité	Kheops
Kalman linéaire (KF)	$O(n^2)$	Non	Faible	OUI
Kalman étendu (EKF)	$O(n^2)$	Non	Moyenne	NON
Unscented KF (UKF)	$O(n^3)$	Non	Bonne	NON
Particle Filter (PF)	$O(N \text{ particles})$	Oui	Excellente	NON
IMM (Interacting MM)	$O(k*n^2)$	Oui	Moyenne	NON

Justification du choix KF linéaire : Le modèle d'observation est linéaire (position 3D directe depuis TDOA/Chan), et le modèle de mouvement est à vitesse constante (CV). Un EKF serait nécessaire si on observait directement les TDOA (non-linéaire en position). Le KF linéaire est optimal ici et plus simple.

6. MODELISATION ENVIRONNEMENTALE

6.1 Modele de Vent - Profil de Prandtl

Le vent est modelise comme un **perturbateur inconnu** de l'estimateur. Il affecte les TDOA de maniere asymetrique selon la direction de propagation.

6.1.1 Profil Logarithmique

La variation verticale du vent suit la loi de **Prandtl** pour la couche limite atmospherique :

$$v(z) = v_{ref} * \ln(z/z_0) / \ln(z_{ref}/z_0)$$

Parametre	Valeur defaut	Description
z_ref	10 m	Hauteur de reference (standard meteo)
z0	0.1 m	Rugosite de surface (terrain plat)
v_base	20 km/h	Vitesse de reference
Direction	45 deg	0 = Nord, 90 = Est

6.1.2 Modelisation des Rafales

Les rafales sont modelisees par un processus stochastique :

Parametre	Valeur	Description
Probabilite	2% par frame	Decclenchement aleatoire
Duree	1-4 s	Uniforme
Facteur	1.3 x v_base	Amplification vitesse
Deviation direction	+/- 15 deg	Turbulence directionnelle

6.1.3 Effet sur la Propagation

La vitesse effective du son est modifiee par la composante du vent dans la direction de propagation :

$$c_{eff} = c + v_{vent} . u_{propagation}$$

Un vent de 20 km/h (5.6 m/s) dans le sens de propagation augmente c de ~1.6%, soit ~5 m/s. Sur une distance de 100 m, cela represente ~1.5 ms d'erreur TDOA si non compense.

6.2 Profil SNR et Bulle de Detection

6.2.1 Modele de Propagation Acoustique

Le niveau sonore recu suit une attenuation geometrique en $1/r^2$ (6 dB par doublement de distance) avec correction pour le vent :

$$L_p(r) = SPL_{1m} - 20 * log10(r) + dL_{vent}$$

6.2.2 Caracteristiques des Drones

Type de Drone	Masse	SPL @ 1m (dB)	Portee typ. (campagne)
---------------	-------	---------------	------------------------

Mini (Mavic Mini)	~250 g	74 dB	~100 m
Consumer (Air 2S)	~600 g	79 dB	~200 m
Prosumer (Phantom)	~1.2 kg	83 dB	~350 m
Pro (Inspire)	~3 kg	87 dB	~500 m
Lourd (Matrice)	~5 kg	90 dB	~700 m
FPV Racing	~400 g	95 dB	~1000 m

6.2.3 Bruit de Fond par Type de Terrain

Terrain	Bruit de fond (dB)	Sources typiques
Eau / Lac	25 dB	Vent, vagues
Foret	30 dB	Feuillage, oiseaux
Campagne	35 dB	Vent, insectes
Periurbain	45 dB	Trafic lointain
Urbain	55 dB	Circulation, foule
Industriel	60 dB	Machines, ventilation

6.2.4 Bulle de Detection Dynamique

La **bulle de detection** est la surface 3D où le SNR dépasse le seuil de détection (3 dB par défaut). Elle est **anisotrope** à cause du vent :

```
R_detect(theta) = 10^((SPL_1m - L_seuil + dL_vent(theta)) / 20)
```

La bulle est calculée en 36 directions et affichée sur la carte. Elle s'allonge dans le sens du vent (son porte) et se contracte face au vent.

7. CONDUITE DE TIR ET HANDOVER

7.1 Processus de Handover

Le système gère le transfert automatique de la cible du mode acoustique (Kheops) vers le mode optique (camera) à une distance paramétrable :

Phase	Mode	Distance	Precision typique
Detection	Kheops seul	> 200 m	+/- 10-20 m
Approche	Kheops + Kalman	35-200 m	+/- 5-10 m
Handover	Transition	~35 m	+/- 3-5 m
Engagement	Camera guidée	< 35 m	+/- 0.5 m

7.2 Compensation du Ghosting

Le **ghosting** est le décalage entre la position réelle du drone et sa position estimée, causé par le délai de propagation acoustique. Pour un drone à 100 m se déplaçant à 15 m/s, le retard est ~0.3 s, soit ~4.5 m d'erreur.

```
D_predite = D_mesuree - v_radiale * tau_propagation
```

La vitesse radiale est extraite du filtre de Kalman et validée par cohérence Doppler-géométrie (écart max toléré : 5 m/s).

7.3 Critères d'Engagement

Le système évalue en continu la possibilité d'engagement :

Critère	Seuil	Impact
Distance	< 35 m (handover)	Obligatoire
Coherence	> 30%	Obligatoire
SNR	> 3 dB	Obligatoire
Lock camera	Cible centree	Obligatoire
Vitesse radiale	Non nulle	Prefère (ghosting)

8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

8.1 Localisation TDOA

- **Chan, Y.T. et Ho, K.C.** (1994). A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(8), 1905-1915.
- **Knapp, C. et Carter, G.C.** (1976). The Generalized Correlation Method for Estimation of Time Delay. *IEEE Trans. ASSP*, 24(4), 320-327.
- **Brandstein, M.S. et Silverman, H.F.** (1997). A Practical Methodology for Speech Source Localization with Microphone Arrays. *Computer Speech and Language*, 11(2), 91-126.
- **Schmidt, R.O.** (1986). Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 34(3), 276-280.

8.2 Propagation Acoustique

- **ISO 9613-1:1993.** Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere.
- **Cramer, O.** (1993). The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration. *J. Acoust. Soc. Am.*, 93(5), 2510-2516.
- **Bass, H.E. et al.** (1995). Atmospheric absorption of sound: Further developments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 97(1), 680-683.

8.3 Filtrage de Kalman

- **Kalman, R.E.** (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35-45.
- **Bar-Shalom, Y. et Li, X.R.** (1995). Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques. YBS Publishing.
- **Welch, G. et Bishop, G.** (2006). An Introduction to the Kalman Filter. UNC Chapel Hill Technical Report.

8.4 RANSAC et Estimation Robuste

- **Fischler, M.A. et Bolles, R.C.** (1981). Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), 381-395.
- **Huber, P.J.** (1981). Robust Statistics. John Wiley and Sons.

8.5 Couche Limite Atmospherique

- **Prandtl, L.** (1925). Bericht über Untersuchungen zur ausgebildeten Turbulenz. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 5(2), 136-139.
- **Stull, R.B.** (1988). An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Springer.

8.6 Détection Acoustique de Drones

- **Mezei, J. et al.** (2015). Drone Sound Detection by Correlation. *IEEE Radar Conference*.

- **Bernardini, A. et al.** (2017). Drone Detection by Acoustic Signature Identification. *Electronic Imaging*, 2017(10), 60-64.
- **Peacock, C. et Wiesmayr, B.** (2019). UAV Acoustic Detection: A Survey and Comparison. *International Journal of UAV Research*.

Document genere automatiquement - Systeme Kheops v3.4