

# Projet F.F.P. HYBA : Hybridation Bretagne Atlantique

Phase 1 : Pré-étude hybridation d'un chalutier par rétrofit



S. Lanneau, F. Claveau, Ph. Chevrel,

S. Berthebaud



Porteur : CRPMEM Bretagne

Dates : 01/10/23 – 31/05/25

Budget total : 550k€

Subv. F.F.P. : 391k€

## Comité Régional des Pêches Maritimes et des Elevages Marins de Bretagne



# SOMMAIRE

1. Contexte et Motivations
2. Les Grandes Lignes du Projet
3. Les Scénarios de Dimensionnement
4. Le Simulateur
5. Le Pilotage de l'Hybridation
6. Conclusion et Perspectives

# SOMMAIRE

- 1. Contexte et Motivations**
2. Les Grandes Lignes du Projet
3. Les Scénarios de Dimensionnement
4. Le Simulateur
5. Le Pilotage de l'Hybridation
6. Conclusion et Perspectives

## CONTEXTE ET MOTIVATIONS

Les contraintes écologiques, légales... et économiques !

### International Maritime Organisation (IMO) Marpol Organization

- Objectif 2050 : neutralité carbone (CO<sub>2</sub>)
- Bretagne : 1/3 de la consommation nationale de gazole pêche



### Intérêt économique à court terme !

- Rétrofit Hybridation : une solution transitoire, durée de vie longue des navires
- Réduire la consommation de carburant : enjeu économique fort !



- Coût d'acquisition 2017 : 2 000 K€
- Consommation : 2 000 l/jour



- Coût d'acquisition : 3 500 K€
- Consommation : 1 650 l/jour

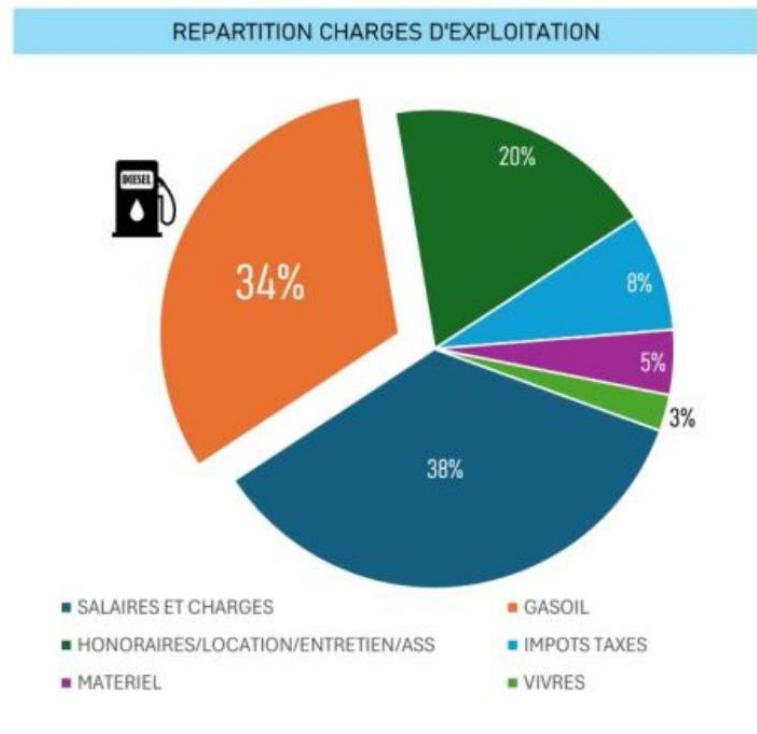


- Coût d'acquisition : 5 000 K€
- Consommation : 1 650 l/jour

+ 1.5 M€ pour une réduction de consommation de environ 20% (- 350l/jour)

+ 1.5 M€ pour une consommation identique !!!

INTERET RETROFIT HYBRIDE

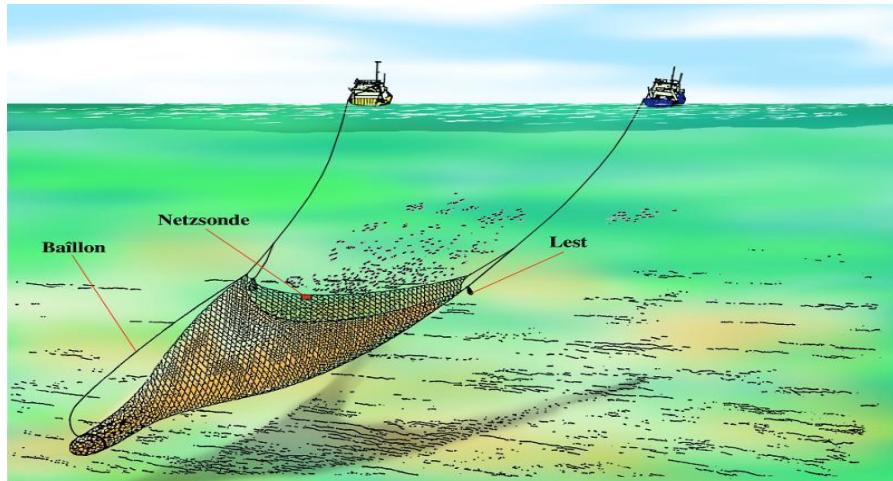


## CONTEXTE ET MOTIVATIONS

Phase 1 : étude faisabilité technique et économique d'une hybridation simple

### Optimisation énergétique du chalutier

- ▶ Instrumentation du navire
- ▶ Analyse des données
- ▶ Modélisation numérique
- ▶ Prédimensionnement de la solution d'hybridation
- ▶ Développement d'une méthodologie de dimensionnement



### Optimisation du train de pêche

- ▶ Définition d'un nouveau maillage de chalut
- ▶ Estimation des besoins de traction

# SOMMAIRE

1. Contexte et Motivations
2. Les Grandes Lignes du Projet
3. Les Scénarios de Dimensionnement
4. Le Simulateur
5. Le Pilotage de l'Hybridation
6. Conclusion et Perspectives

# LES GRANDES LIGNES DU PROJET

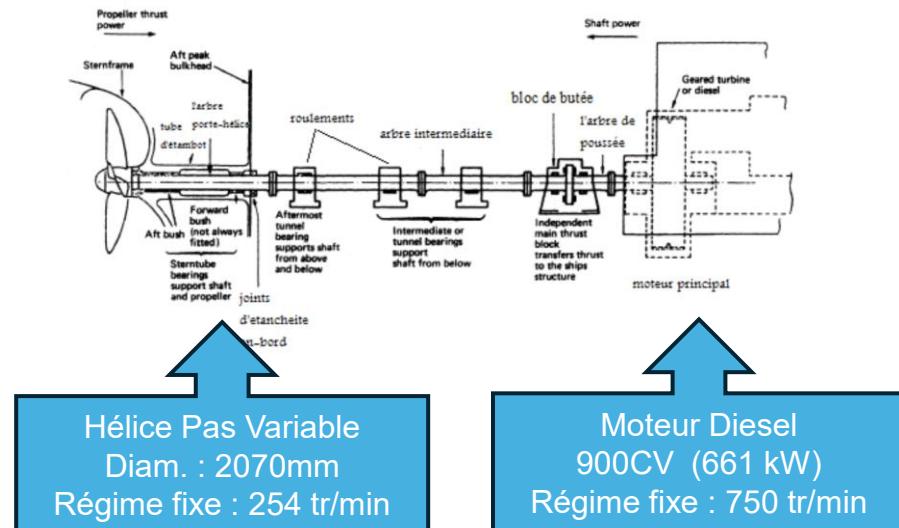
## Phase 1 : étude faisabilité technique et économique d'une hybridation simple

### Optimisation énergétique du chalutier

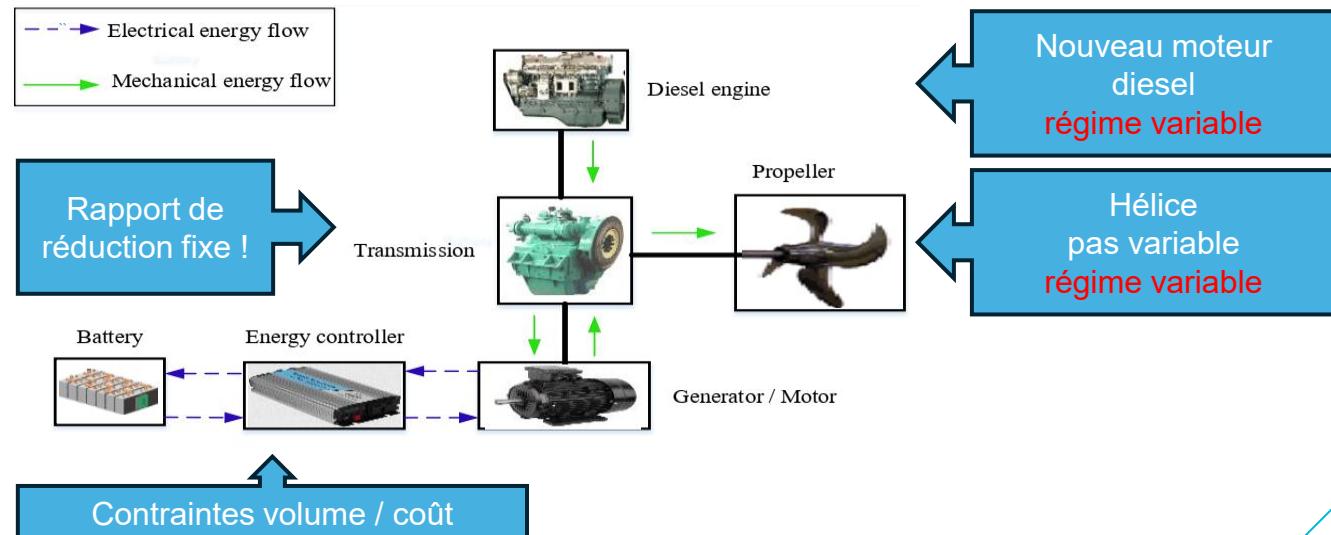
- Instrumentation du navire
- Analyse des données
- Modélisation numérique
- Prédimensionnement de la solution d'hybridation (+ algorithme de pilotage...)



### Points de départ...



### ...et d'arrivée sur la propulsion : hybridation parallèle simple !



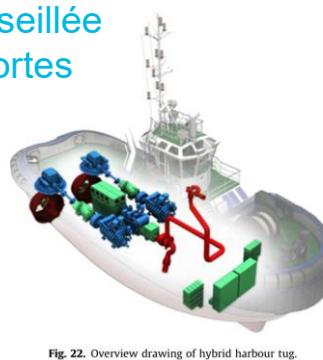
# LES GRANDES LIGNES DU PROJET

## Phase 1 : étude faisabilité technique et économique d'une hybridation simple

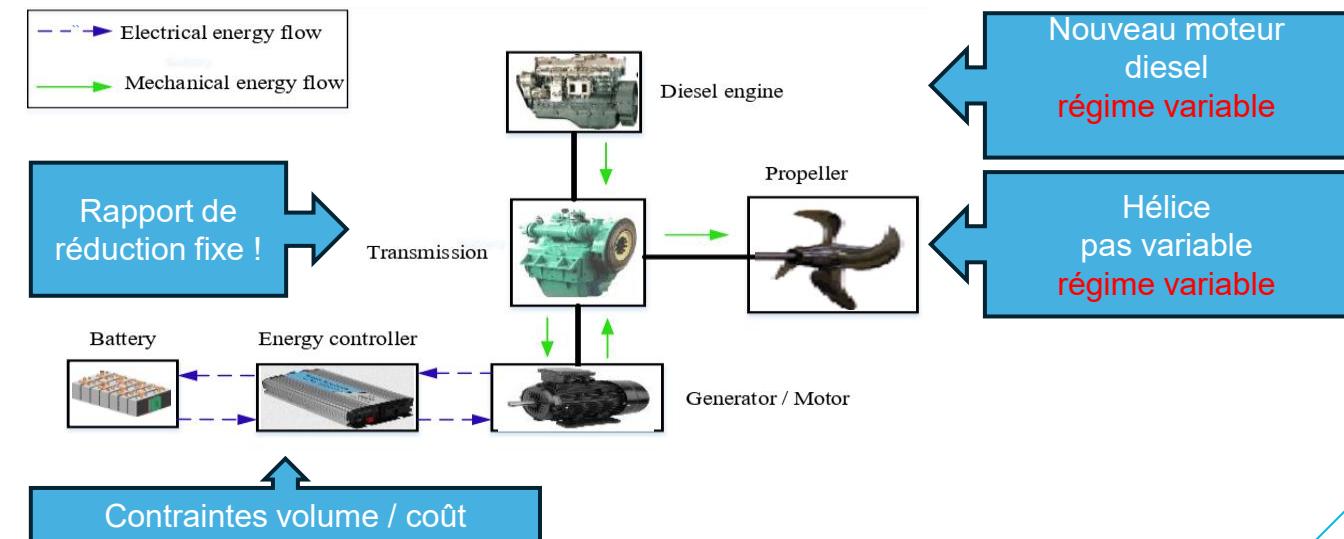
### Pourquoi une hybridation parallèle ?

- ▶ Une transformation « peu intrusive » : conservation de la ligne d'arbre prioritaire !
- ▶ Réduction du coût : réducteur + kit électrique (moteur + batterie + convertisseur)
- ▶ Acceptabilité : retour en mode propulsion « 100% thermique » possible en mode dégradé !
- ▶ Plus facile à piloter...
  
- ▶ ...et conseillée dans la littérature !

Hybridation parallèle mécanique conseillée pour les navires de travail, avec de fortes variations de charge (poussée).



R.D. Geertsma, R.R. Negenborn, K. Visser, J.J. Hopman, Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: A review of developments, Applied Energy, 194, pp. 30-54, 2017.



# LES GRANDES LIGNES DU PROJET

## Etape 1 : instrumentation du navire

**Objectif : monitorer les flux énergétiques à bord du navire et expliquer leur origine.**

- ≈ 20 capteurs implémentés, ≈ 80 signaux à 1 Hz ou 10 Hz
- Exemples de capteurs :
  - Loch : mesure vitesse surface navire (longi.)
  - GPS : mesure vitesse fond (et autres...)
  - Anémomètre
  - Centrale Inertielle
  - Débitmètres carburants
  - Capteur Nox
  - Instrumentation du chalut : géométrie, profondeur, **effort de traction (ponctuel)**
- Transmission satellitaire : 1 fois / jour
- ≈ 8 Go de données collectées durant 1 an



ANALOG INPUT AI	DESCRIPTION	SOURCE	
AI 01	PAS D'HELICE	Indicateur timonerie	
AI 02	REGIME MOTEUR	Indicateur timonerie	
AI 03	PRESSION SURALIMENTATION	Indicateur timonerie	
AI 04	ANGLE DE BARRE	Indicateur timonerie	
AI 05	CONSOMMATION MACHINE A GLACE	Transformateur d'intensité TP	
AI 06	REGULATEUR DE VITESSE	Capteur linéaire	
AI 07	ECARTEMENT ENTRE LES DEUX PANNEAUX		
AI 08	ROULIS PANNEAU BABORD		
AI 09	TANGAGE PANNEAU BABORD		
AI 10	ROULIS PANNEAU TRIBORD		
AI 11	TANGAGE PANNEAU TRIBORD		
AI 12	OUVERTURE VERTICALE DU CHALUT DE FOND		
AI 13	VITESSE LONGITUDINALE DU CHALUT DE FOND		
AI 14	VITESSE TRANSVERSALE DU CHALUT DE FOND		
AI 15	PROFONDEUR DU CAPTEUR DU CHALUT DE FOND		
AI 16	ROULIS DU CAPTEUR DU CHALUT DE FOND		
AI 17	TANGAGE DU CAPTEUR DU CHALUT DE FOND		
AI 18	OUVERTURE VERTICALE DU CHALUT PELAGIQUE		
AI 19	VITESSE LONGITUDINALE DU CHALUT PELAGIQUE		
AI 20	VITESSE TRANSVERSALE DU CHALUT PELAGIQUE		
AI 21	PROFONDEUR DU CAPTEUR DU CHALUT PELAGIQUE		
AI 22	ROULIS DU CAPTEUR DU CHALUT PELAGIQUE		
AI 23	TANGAGE DU CAPTEUR DU CHALUT		
AI 24	DISTANCE CAPTEUR BOURELET CHALUT DE FOND		
AI 25	DISTANCE CAPTEUR BOURELET CHALUT PELAGIQUE		
AI 26	TEMPERATURE EAU		
AI 27	VITESSE DU VENT APPARENT	Anémomètre	
AI 28	DIRECTION DU VENT APPARENT		
AI 29	TEMPERATURE DU VENT		
AI 30	PUISANCE ALTERNATEUR PRINCIPAL	Centrales de mesure TP	
AI 31	PUISANCE ALTERNATEUR AUXILIAIRE (TRIBORD)		
AI 32	PUISANCE ALTERNATEUR MOUILLAGE (BABORD)		
AI 33	TRACTION TREUIL SENNE BABORD		
AI 34	LONGUEUR TREUIL SENNE BABORD		
AI 35	VITESSE DU FILET TREUIL SENNE BABORD		
	PRESSION HYDRAULIQUE TREUIL SENNE BABORD		
AI 36	VITESSE DE ROTATION TREUIL SENNE BABORD	Centrale inertielle	
AI 37	TRACTION TREUIL SENNE TRIBORD		
AI 38	LONGUEUR TREUIL SENNE TRIBORD		
AI 39	VITESSE DU FILET TREUIL SENNE TRIBORD		
AI 40	PRESSION HYDRAULIQUE TREUIL SENNE TRIBORD		
AI 41	VITESSE DE ROTATION TREUIL SENNE TRIBORD		
AI 42	ACCELERATION X AXIS		
AI 43	ACCELERATION Y AXIS		
AI 44	ACCELERATION Z AXIS		
AI 45	ROTATIONAL SPEED X AXIS		
AI 46	ROTATIONAL SPEED Y AXIS		
AI 47	ROTATIONAL SPEED Z AXIS		
AI 48	ROLL		
AI 49	PITCH		
AI 50	HEAVE		
AI 51	GPS LATITUDE	GPS	
AI 52	GPS LONGITUDE		
AI 53	VITESSE FOND GPS		
AI 54	GPS COURSE OVER GROUND		
AI 55	PRESSION CHARIOT BABORD	WETEC	
AI 56	PRESSION CHARIOT TRIBORD		
AI 57	PRESSION TREUIL PECHÉ BABORD		
AI 58	PRESSION TREUIL PECHÉ TRIBORD		
AI 59	PRESSION DE PILOTE		
AI 60	MANETTE TREUIL PECHÉ BABORD		
AI 61	PUISANCE TREUIL PECHÉ BABORD		
AI 62	VANNE B TREUIL PECHÉ BABORD		
AI 63	VANNE A TREUIL PECHÉ BABORD		
AI 64	MANETTE TREUIL PECHÉ TRIBORD		
AI 65	PUISANCE TREUIL PECHÉ TRIBORD		
AI 66	VANNE B TREUIL PECHÉ TRIBORD		
AI 67	VANNE A TREUIL PECHÉ TRIBORD		
AI 68	NOX CAPTEUR #1	Capteurs Nox	
AI 69	O2 CAPTEUR #1		
AI 70	NOX CAPTEUR #2		
AI 71	O2 CAPTEUR #2		
AI 72	NOX CAPTEUR #3		
AI 73	O2 CAPTEUR #3		
AI 74	IMPLUSIONS DEBITMETRE MP ALLER	Débitmètres	
AI 75	IMPLUSIONS DEBITMETRE MP RETOUR		
AI 76	CONSUMMATION MP		

# LES GRANDES LIGNES DU PROJET

## Etape 1 : instrumentation du navire

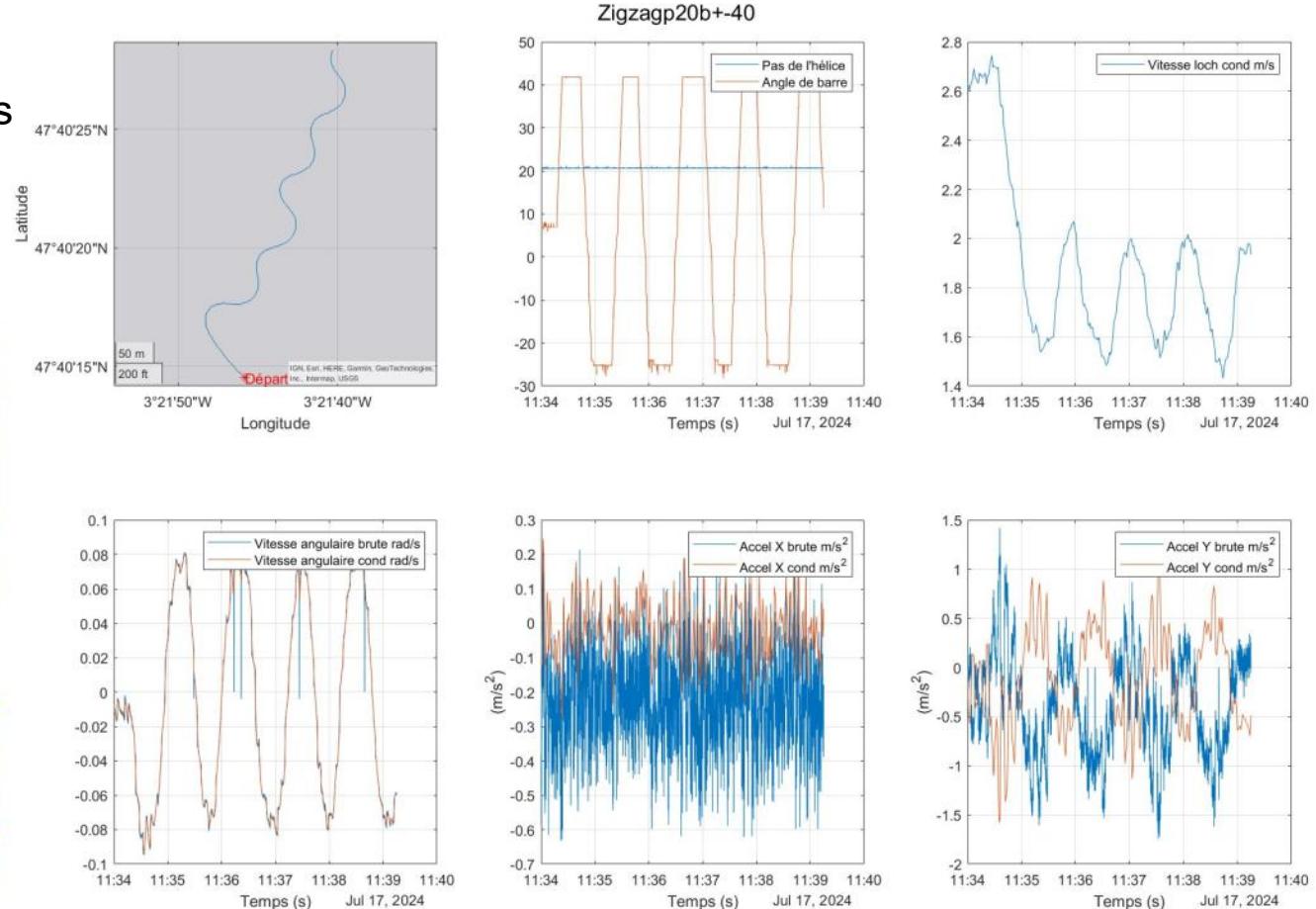
Objectif : monitorer les flux énergétiques à bord du navire et expliquer leur origine

### Exemples de signaux collectés

### Complétés par données météo et courants marins

*Copernicus*

The screenshot shows the Copernicus Marine Service interface. At the top, there are logos for the European Union and Copernicus, followed by 'Copernicus Marine Service'. Below this, a navigation bar includes 'Services', 'Opportunities', 'Access Data', 'Use Cases', and 'User Guide'. The main title 'Global Ocean Physics Analysis and Forecast' is displayed above a map of the world's oceans. The map features color-coded regions, likely representing temperature or salinity. To the left of the map is a sidebar with various links and documentation sections.



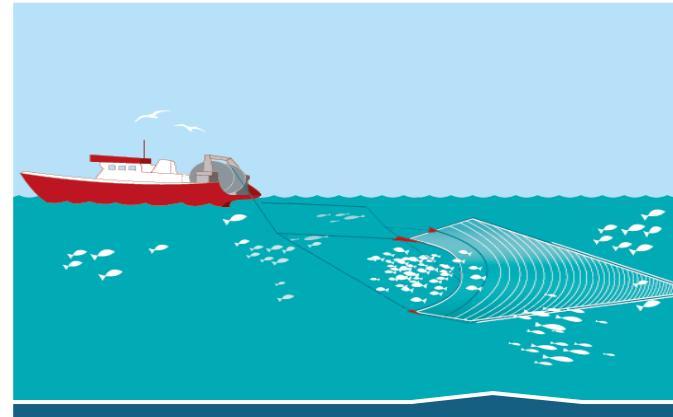
## LES GRANDES LIGNES DU PROJET

Etape 2 : Analyse des données – distinction des principaux cas d'usage du chalutier

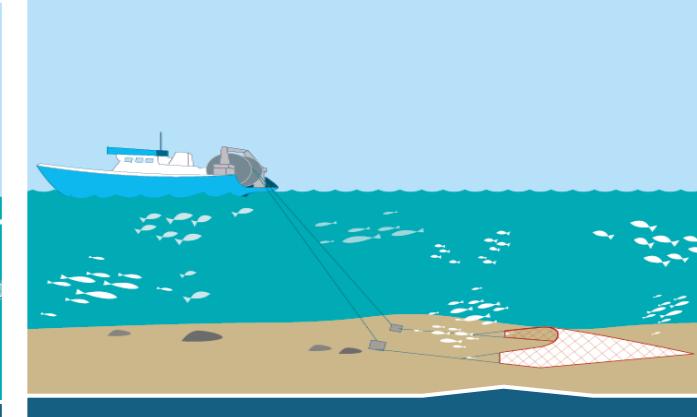
### 3 techniques de pêche fondamentales



Chalut pélagique «en boeuf»



Chalut pélagique

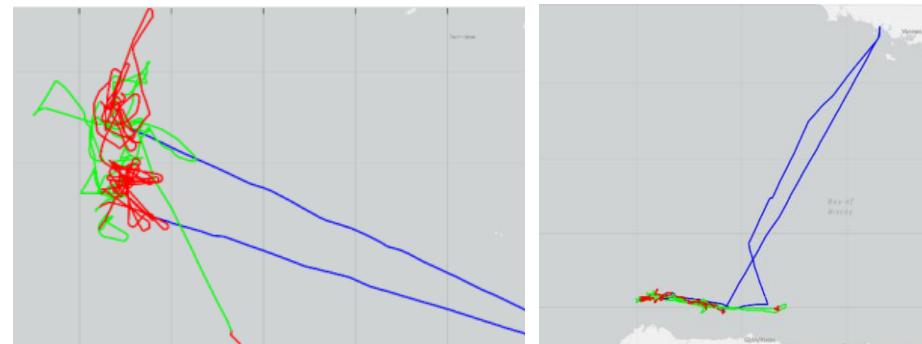


Chalut de fond

<https://www.pecheursdebretagne.eu/techniques-de-peche/le-chalut-pelagique/>

### Les missions – 10 à 15 jours (Bretagne...) :

- Navigation aller
- Phase(s) de Pêche : filage, traction chalut, virage
- Navigation retour

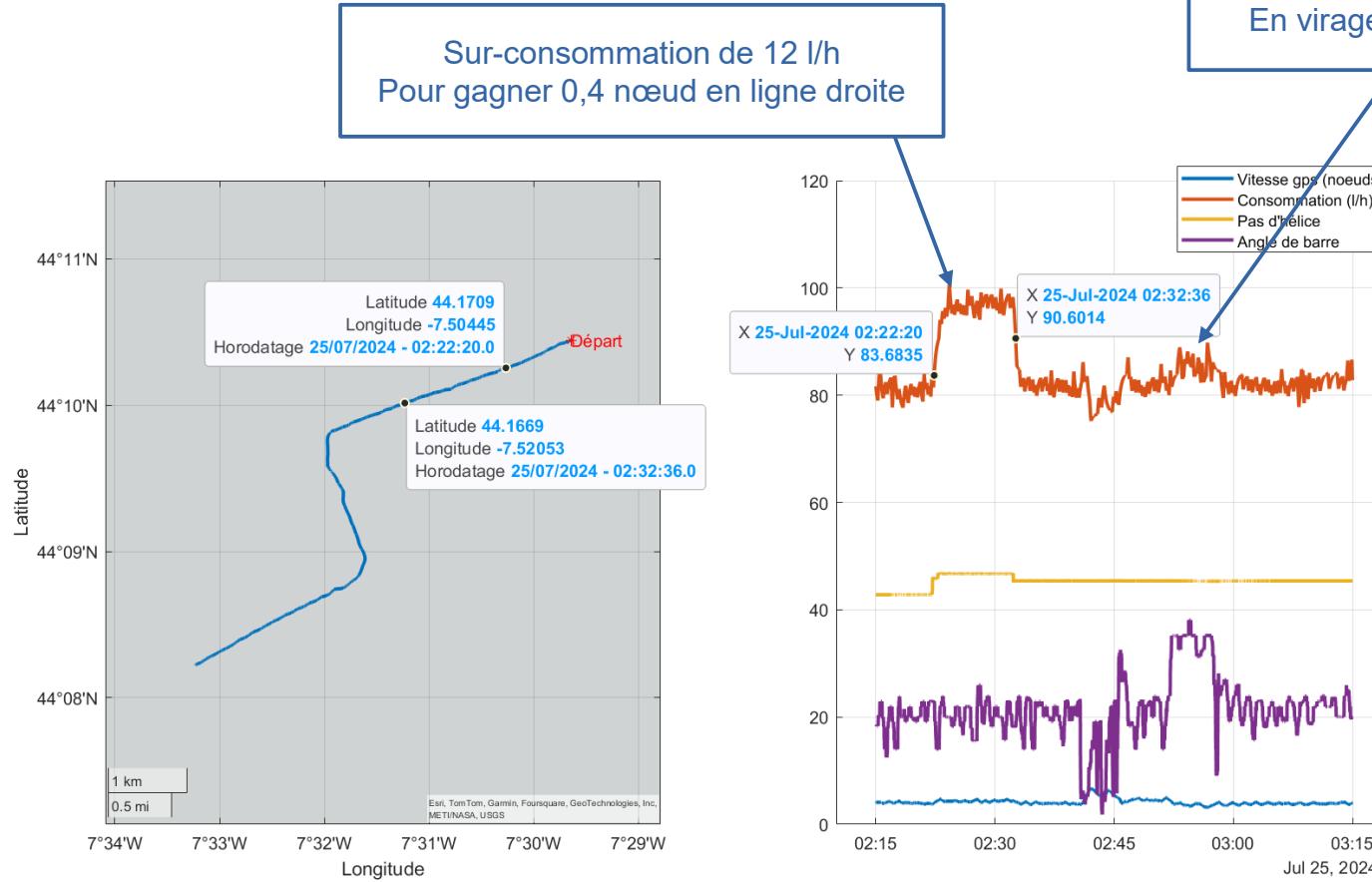


# LES GRANDES LIGNES DU PROJET

## Etape 3 : Construction du simulateur – validation des hypothèses

### Exploitation des données pour valider certaines hypothèses de modélisation

- Par exemple : modèle longitudinal suffisant, en navigation ou en pêche !

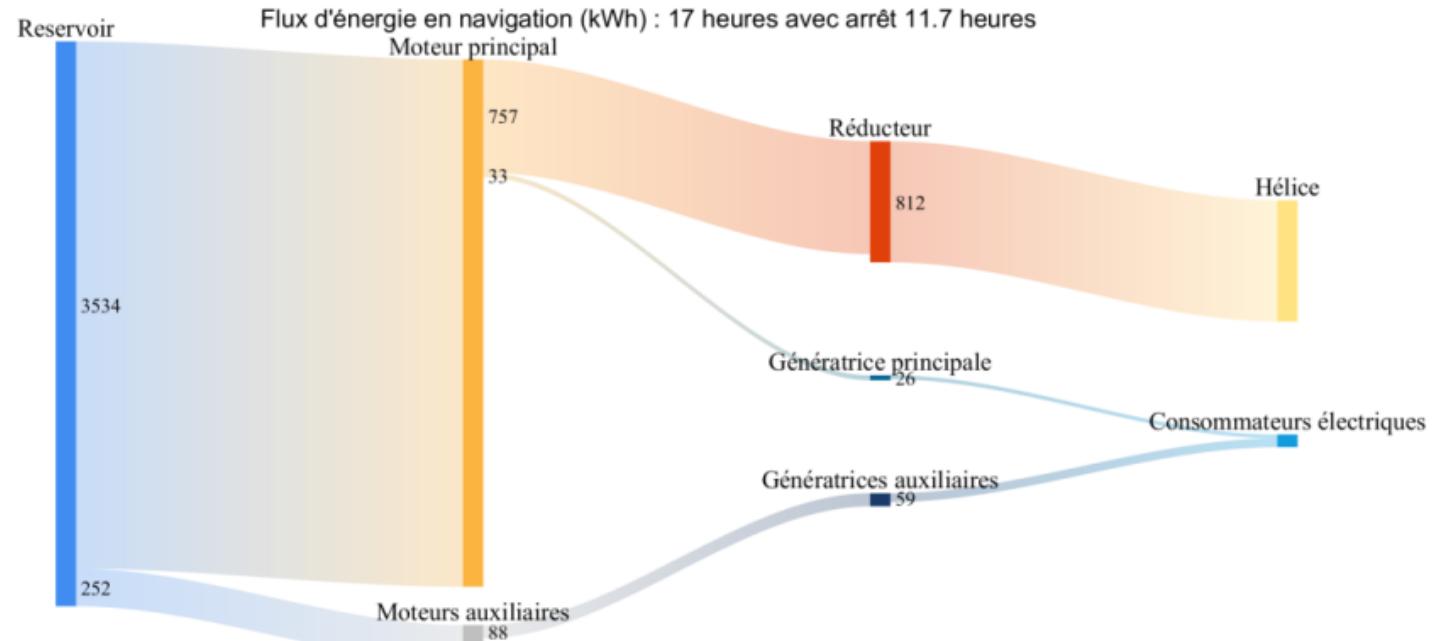


## LES GRANDES LIGNES DU PROJET

### Etape 3 : Construction du simulateur – validation des hypothèses

#### Exploitation des données pour valider certaines hypothèses de modélisation

- Par exemple : modèle longitudinal suffisant, en navigation ou en pêche !
- Estimation d'un arbre des puissances : pour modéliser simplement (et négliger...) les consommateurs de bord.



# SOMMAIRE

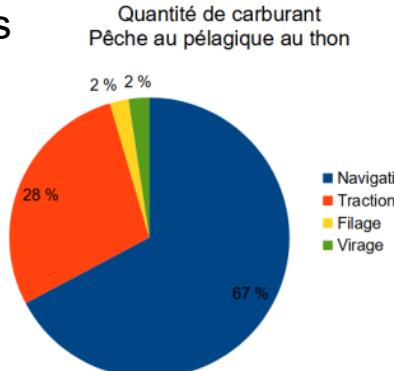
1. Contexte et Motivations
2. Les Grandes Lignes du Projet
3. Les Scénarios de Dimensionnement
4. Le Simulateur
5. Le Pilotage de l'Hybridation
6. Conclusion et Perspectives

# LES SCENARIOS DE DIMENSIONNEMENT EN SIMULATION

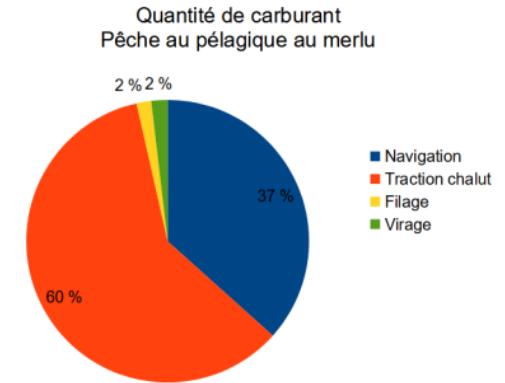
Comment faire ressortir les différentes phases de vie dimensionnantes pour la propulsion ?

## A chaque mission : des points de fonctionnement nominaux distincts

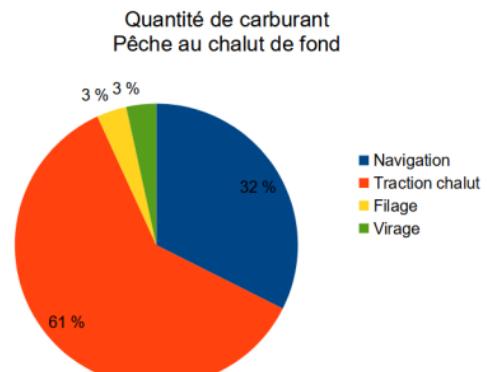
- Différentes analyses de consommation réalisées pour différents types de pêches



(a)



(b)



(c)

## LES SCENARIOS DE DIMENSIONNEMENT EN SIMULATION

Comment faire ressortir les différentes phases de vie dimensionnantes pour la propulsion ?

### A chaque mission : des points de fonctionnement nominaux distincts

- Différentes analyses de consommation réalisées pour différents types de pêches

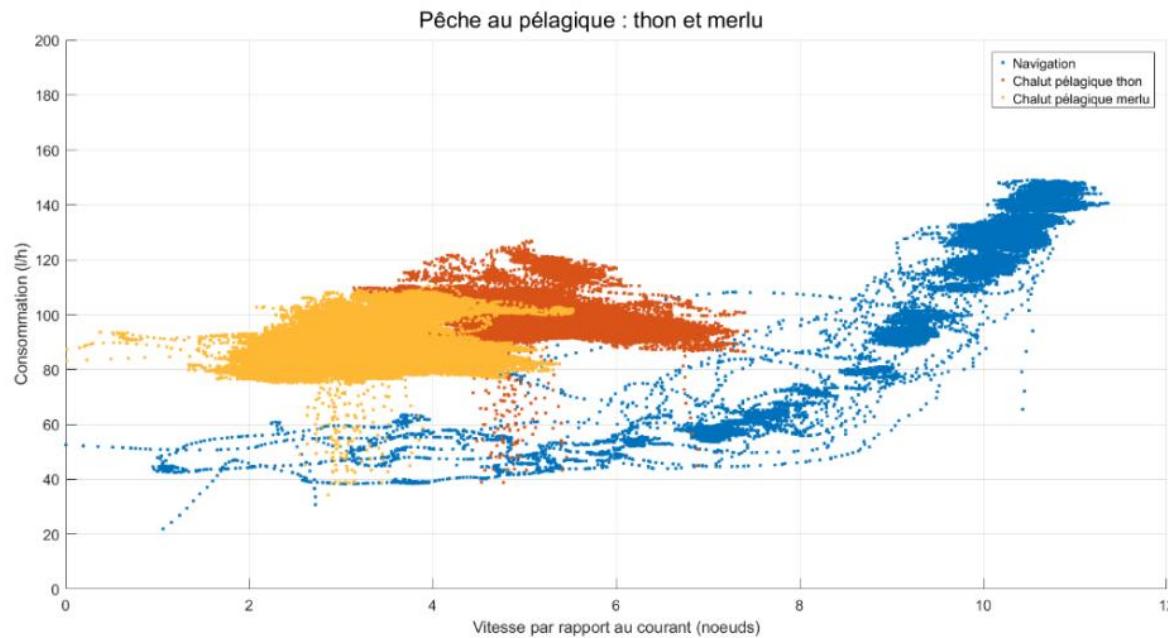


Figure 10. Consommation instantanée fonction de la vitesse pour les phases de traction des chaluts pélagiques (orange – thon, jaune – merlu). Des valeurs de consommation en navigation (bleu) sont affichées pour comparaison.

## LES SCENARIOS DE DIMENSIONNEMENT EN SIMULATION

Comment faire ressortir les différentes phases de vie dimensionnantes pour la propulsion ?

### A chaque mission : des points de fonctionnement nominaux distincts

- Différentes analyses de consommation réalisées pour différents types de pêches
- Utilités : Définition de points de fonctionnement nominaux !

Exploitation pour définir des scénarios de simulations, dédiés au dimensionnement de la propulsion !

Tableau 1. Points de fonctionnement nominaux pour les 3 types de pêche

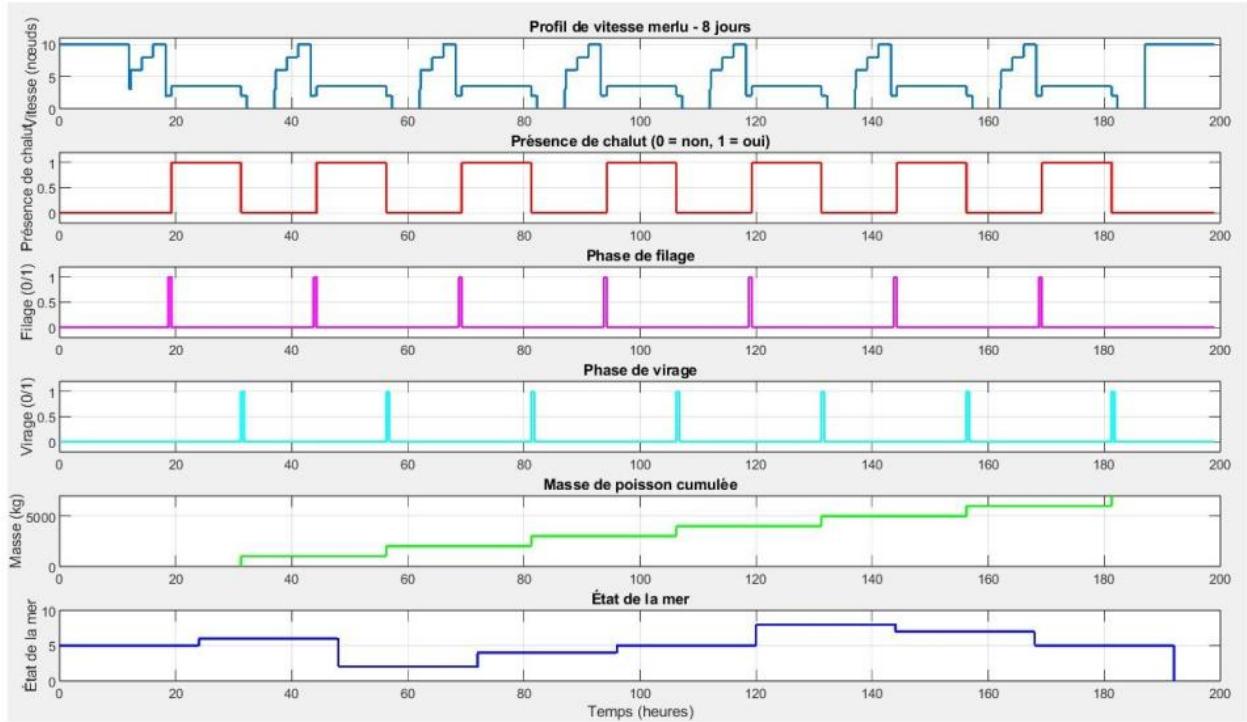
Type de pêche	Plage de vitesse nominale	Estimation de consommation
Navigation	[6 , 10] noeuds	[50 , 160] l/h
Pélagique (thon)	[4 , 6] noeuds	100 l/h
Pélagique (merlu)	[2.5 , 4.5] noeuds	90 l/h
Chalut de fond	3.2 noeuds	105 l/h

## LES SCENARIOS DE DIMENSIONNEMENT EN SIMULATION

Comment faire ressortir les différentes phases de vie dimensionnantes pour la propulsion ?

### A chaque mission : des points de fonctionnement nominaux distincts

- ▶ Différentes analyses de consommation réalisées pour différents types de pêches
- ▶ Utilités : Définition de points de fonctionnement nominaux !
- ▶ Exemple : scénario « Pêche Pélagique Merlu »



# SOMMAIRE

1. Contexte et Motivations
2. Les Grandes Lignes du Projet
3. Les Scénarios de Dimensionnement
4. Le Simulateur
5. Le Pilotage de l'Hybridation
6. Conclusion et Perspectives

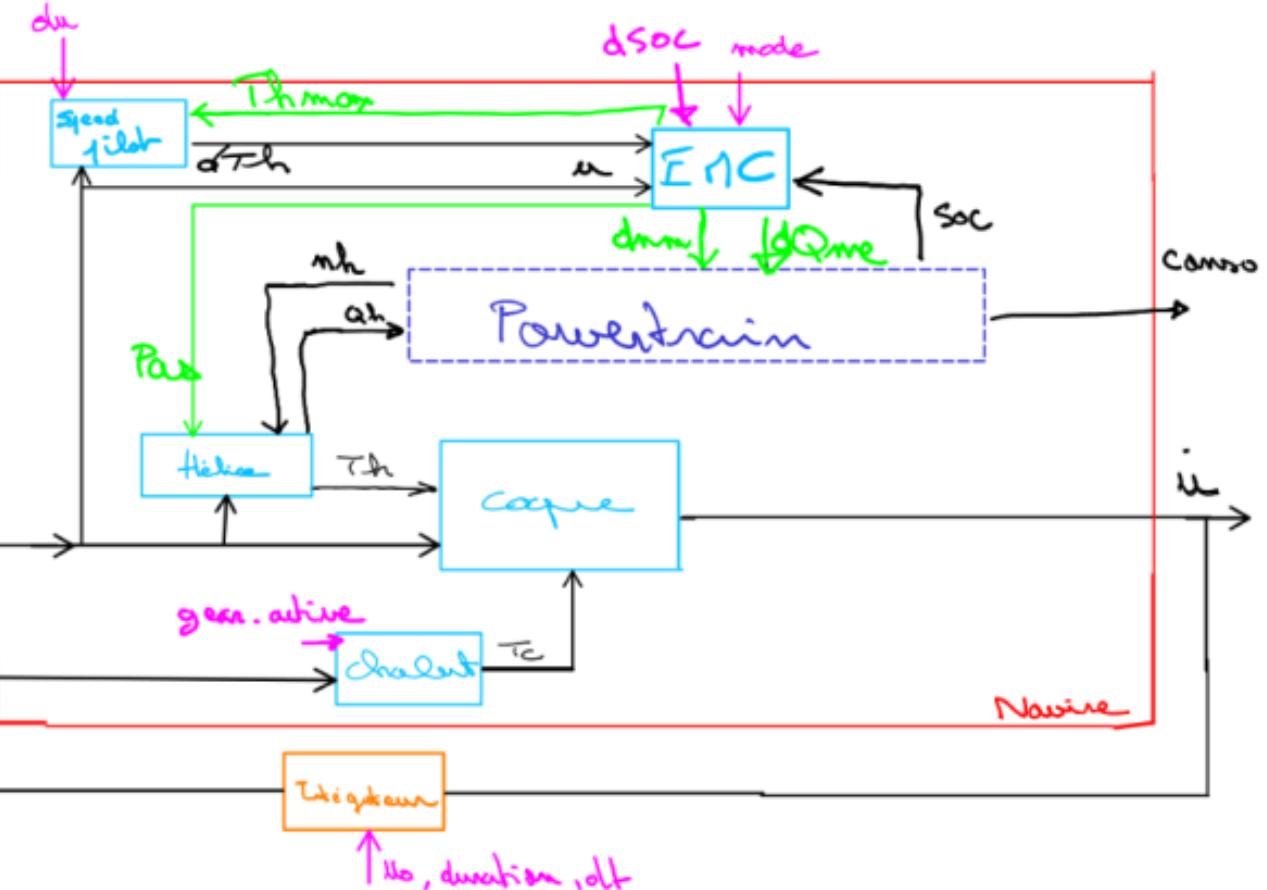
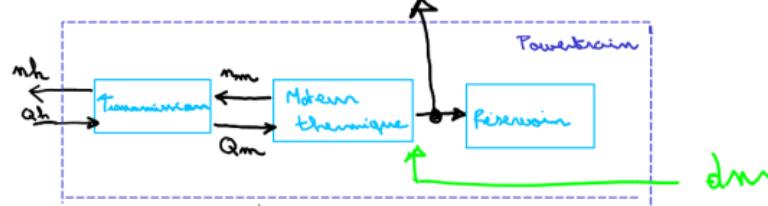
# LE SIMULATEUR

## Construction du modèle 1D dynamique du chalutier + chalut

Equations de la physique et calibrations des modèles d'organes par datasheet + mesures expé.

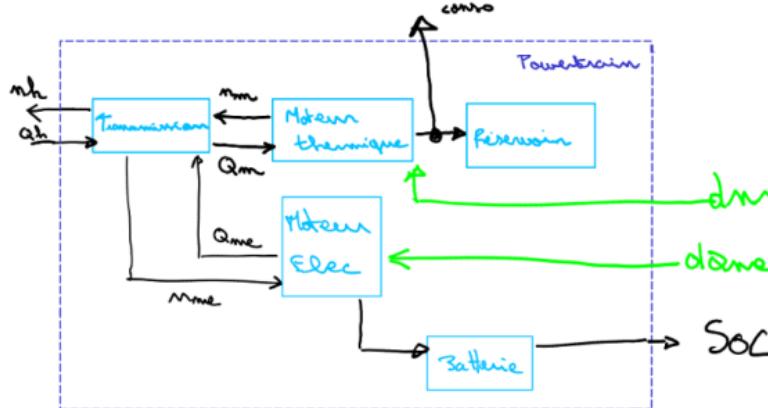
### Powertrain = Moteur Thermique

↪ Réplique du navire actuel



### Powertrain = Hybride Parallèle

↪ Réplique du navire actuel



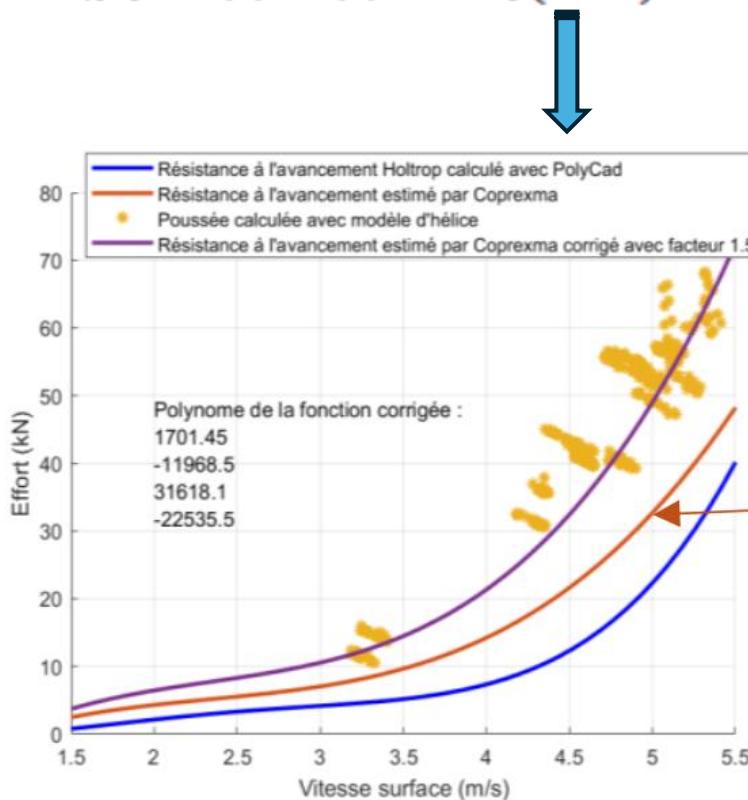
# LE SIMULATEUR

## Construction du modèle 1D dynamique du chalutier + chalut

**Equations de la physique et calibrations des modèles d'organes par datasheet + mesures expé.**

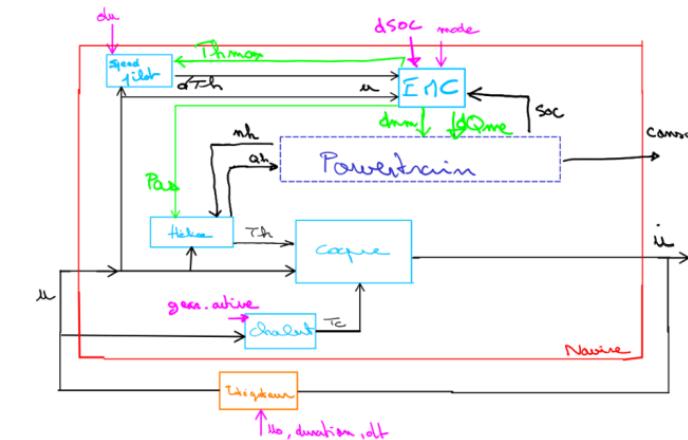
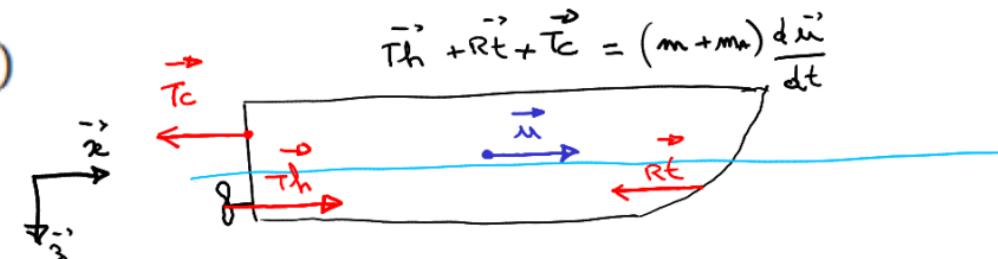
### Modélisation (quasi-statique) des organes : la coque

$$T_h(pas(t), u(t)) - R_t(u(t)) - T_c(u(t)) = (m + m_A)\ddot{u}(t)$$



$$m_A = \frac{\pi \rho T^2 B}{2} C_M$$

Coefficient du polynôme en  $u$  :  
[768.9, -3894.6949.8, -271.6]



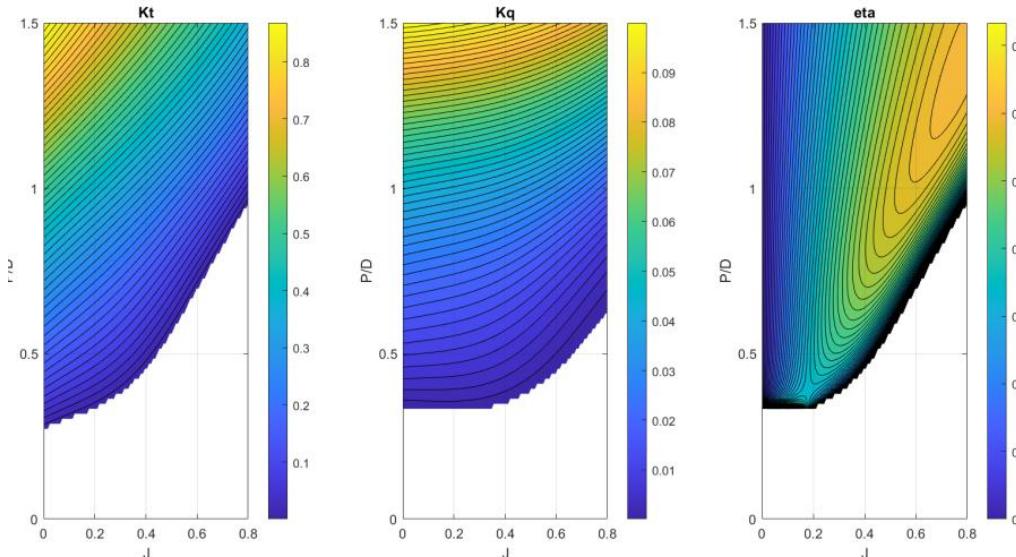
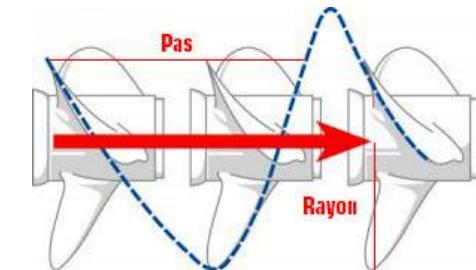
# LE SIMULATEUR

## Construction du modèle 1D dynamique du chalutier + chalut

**Equations de la physique et calibrations des modèles d'organes par datasheet + mesures expé.**

### Modélisation (quasi-statique) des organes : l'hélice – Modèle ( $K_T, K_Q$ ) de Wageningen

$$\begin{cases} T_h(t) = K_T \rho D^4 n h(t) |n h(t)| & \text{Poussée [N]} \\ Q_h(t) = K_T \rho D^4 n h(t) |n h(t)| & \text{Couple de charge [N.m]} \\ \eta_h(t) = \frac{V_a T_h(t)}{2\pi n_h(t) Q_h(t)} = \frac{J(t) K_T}{2\pi K_Q} & \text{Rendement hélice} \end{cases}$$

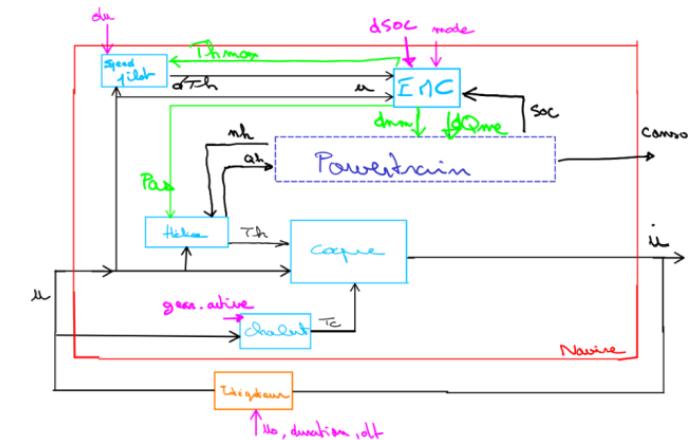


$$K_t(pas(t), J(t))$$

$$K_q(pas(t), J(t))$$

$$\eta_h(pas(t), J(t))$$

$$J(t) = \frac{V_a(t)}{\eta_h(t) D}.$$

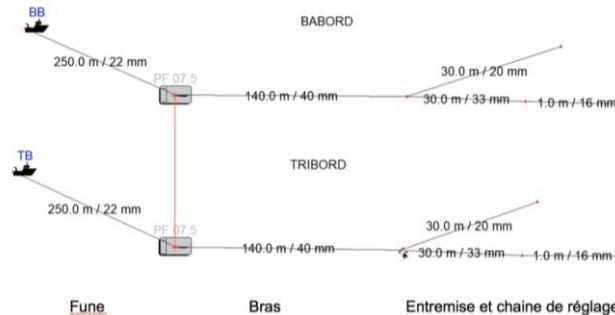
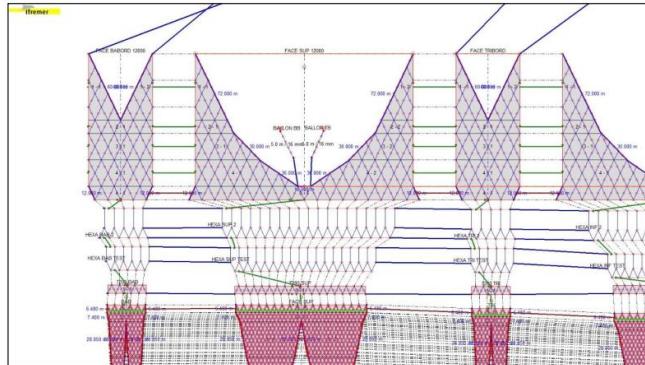


# LE SIMULATEUR

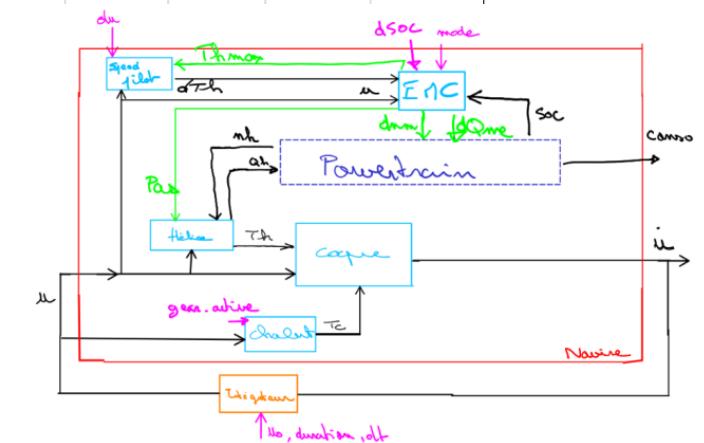
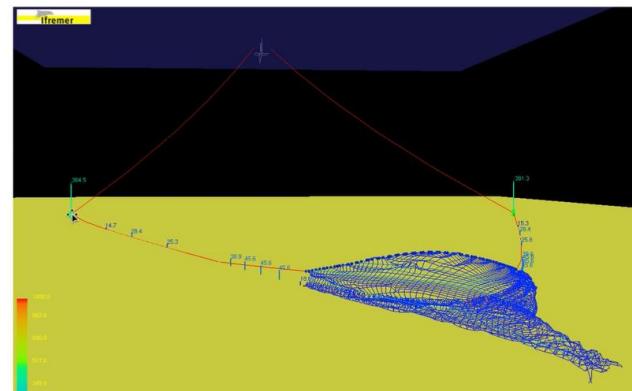
## Construction du modèle 1D dynamique du chalutier + chalut

Equations de la physique et calibrations des modèles d'organes par datasheet + mesures expé.

### Modélisation (quasi-statique) des organes : le chalut, simulation sur DynamiT



Vitesse surface (nœuds)	Ouverture verticale (mètres)	Tension câble (kgf)	Axe X transversal (kgf)	Axe Y vertical (kgf)	Axe Z longitudinal (kgf)
4	54,8	2 937	-	733	325
4,1	53,4	3 062	-	764	334
4,2	52,1	3 191	-	796	340
4,3	50,8	3 324	-	829	345
4,4	49,5	3 461	-	864	349
4,5	48,4	3 602	-	899	353
4,6	47,2	3 746	-	935	357
4,7	46,1	3 894	-	972	361
4,8	45,1	4 046	-	1 010	365
4,9	44,1	4 201	-	1 049	369
5	43,1	4 360	-	1 089	373
5,1	42,2	4 524	-	1 130	378
5,2					4 362
5,3					
5,4					
5,5					
5,6					
5,7					
5,8					
5,9					
6					



- 1 • Plan de maillage
- 2 • Gréement
- 3 • Simulation Dynamique
- 4 • Estim. des efforts  $T_c(u)$

<https://dynamit.ifremer.fr/>

# LE SIMULATEUR

## Construction du modèle 1D dynamique du chalutier + chalut

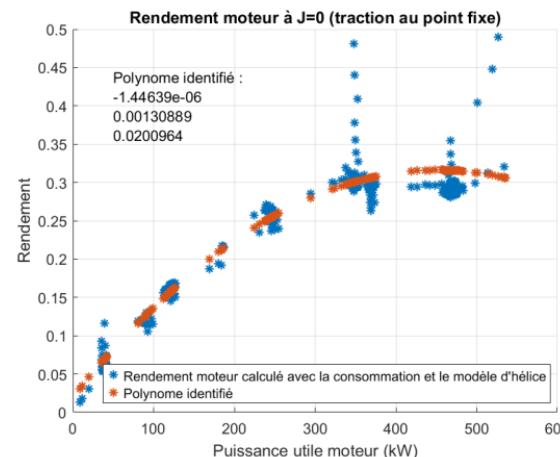
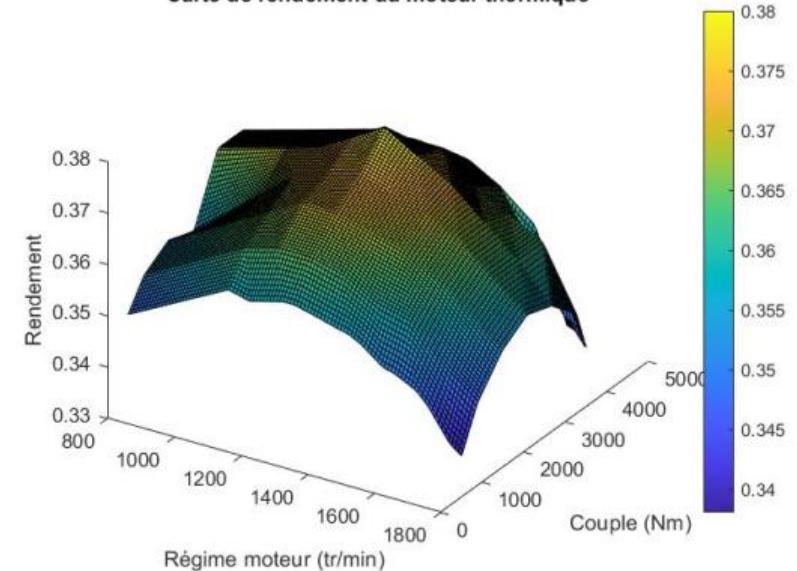
**Equations de la physique et calibrations des modèles d'organes par datasheet + mesures expé.**

### Modélisation (quasi-statique) des organes : le(s) moteur(s) thermique(s)

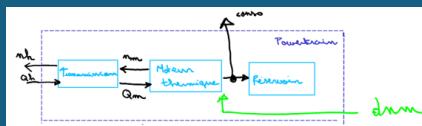
- 1 seul point (nominal) connu !
- Expé. « au point fixe » : mesure au dynamomètre
- Recalage de la carto. sur données en navigation

$$\eta_m(t) = f_m(n_m(t), Q_m(t))$$

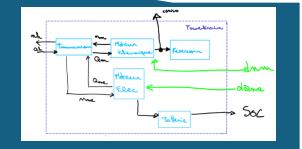
Carte de rendement du moteur thermique



Moteur Actuel : reconstruction carto.



Nouveau moteur :  
carto. disponible



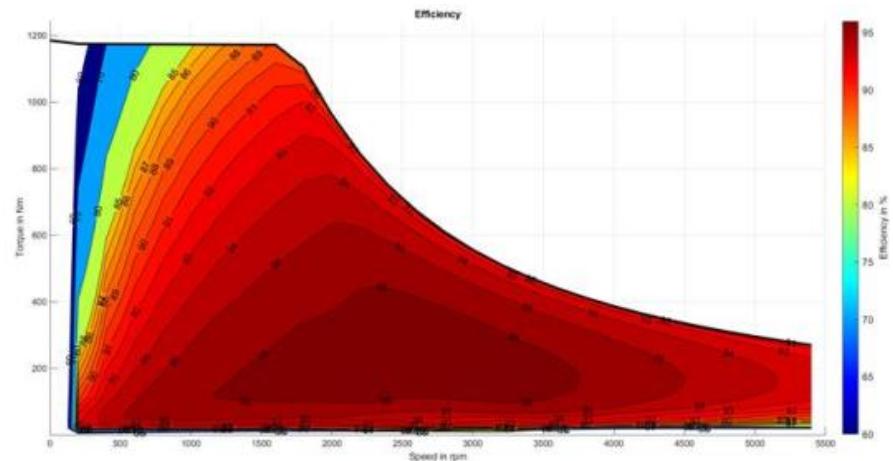
## LE SIMULATEUR

Construction du modèle 1D dynamique du chalutier + chalut

**Equations de la physique et calibrations des modèles d'organes par datasheet + mesures expé.**

Modélisation (quasi-statique) des organes : le(s) moteur(s) électrique(s) + batterie

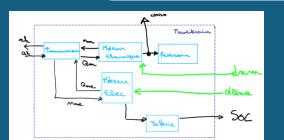
$$\eta_{me}(t) = f_{me}(n_{me}(t), Q_{me}(t))$$



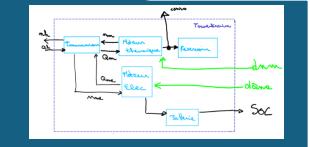
$$SOC(t) = SOC_{init} + \frac{Q_b(t)}{Q_{b\_max}}$$

$$SOC(t) = SOC_{init} + \frac{1}{Q_{b\_max}} \int_0^t I_b(\tau) / \eta_b d\tau$$

Moteur Electrique : carto. disponible



Batterie : Modèle Coulométrique basique

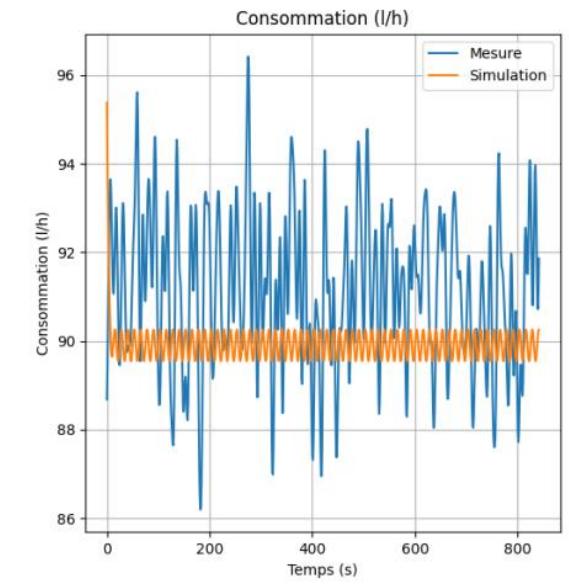
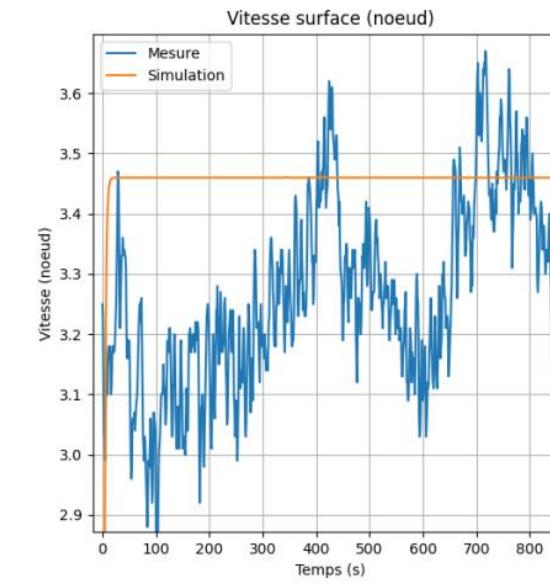
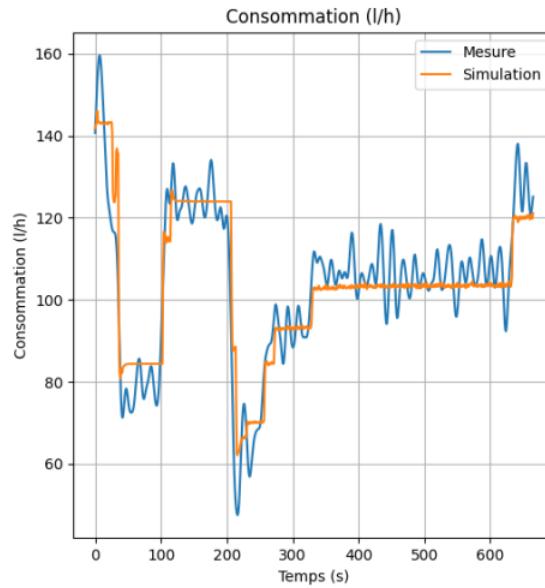
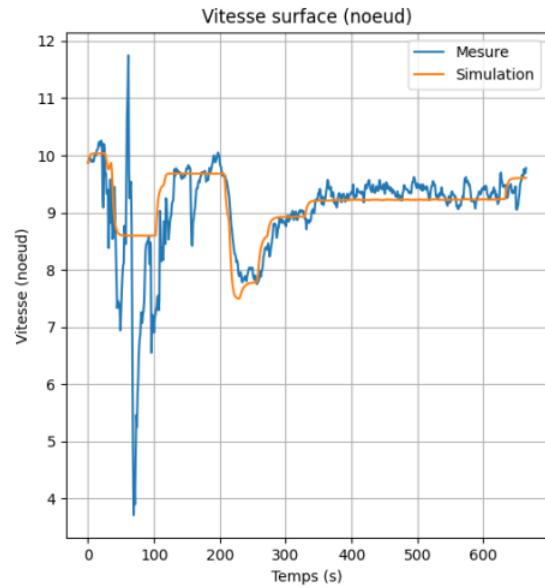


# LE SIMULATEUR

## Construction du modèle 1D dynamique du chalutier + chalut

**Equations de la physique et calibrations des modèles d'organes par datasheet + mesures expé.**

### Validation du « jumeau numérique » du navire actuel (propulsion 100% thermique)



Simulation en navigation

Simulation en pêche pélagique

# SOMMAIRE

1. Contexte et Motivations
2. Les Grandes Lignes du Projet
3. Les Scénarios de Dimensionnement
4. Le Simulateur
5. Le Pilotage de l'Hybridation
6. Conclusion et Perspectives

# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

**2 architectures possibles (100% thermique et hybride parallèle), 2 usages de l'hélice (régime)**

## ▀ Cahier des charges pour l'algorithme de commande : un outil « universel »

- ▀ Pour les 3 modes 2, 3, 4
- ▀ En simulation (dimensionnement) et ensuite en temps réel

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté	Principe
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$	La vitesse $u(t)$ impose la poussée $T_h(t)$ et donc le $pas(t)$ de l'hélice.
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$	À une vitesse $u(t)$ et donc poussée $T_h(t)$ donnée, on a plusieurs combinaisons ( $pas(t)$ , $N_m(t)$ ) possibles.
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$	À une vitesse $u(t)$ et donc $pas(t)$ donné, le couple hélice $Q_h(t)$ est produit par plusieurs combinaisons ( $Q_m(t)$ , $Q_{me}(t)$ ) possibles.
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$ , $Q_{me}(t)$	À une vitesse $u(t)$ et donc poussée $T_h(t)$ donnée, on peut jouer sur les combinaisons ( $pas(t)$ , $N_m(t)$ ) et ( $Q_m(t)$ , $Q_{me}(t)$ ), en considérant leur Interaction.

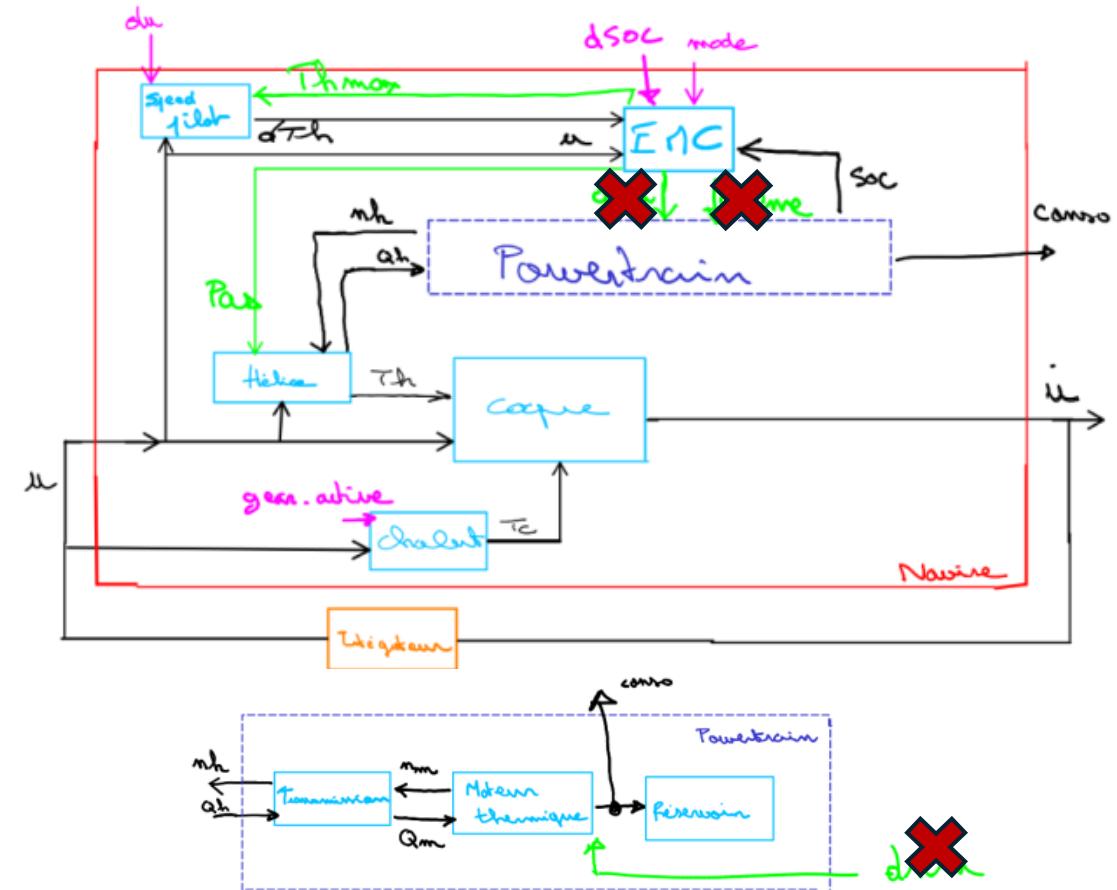
# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Formulation macroscopique des problèmes de pilotage

- Mode 1 (cas actuel) : la vitesse impose le pas !

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	Ø
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$



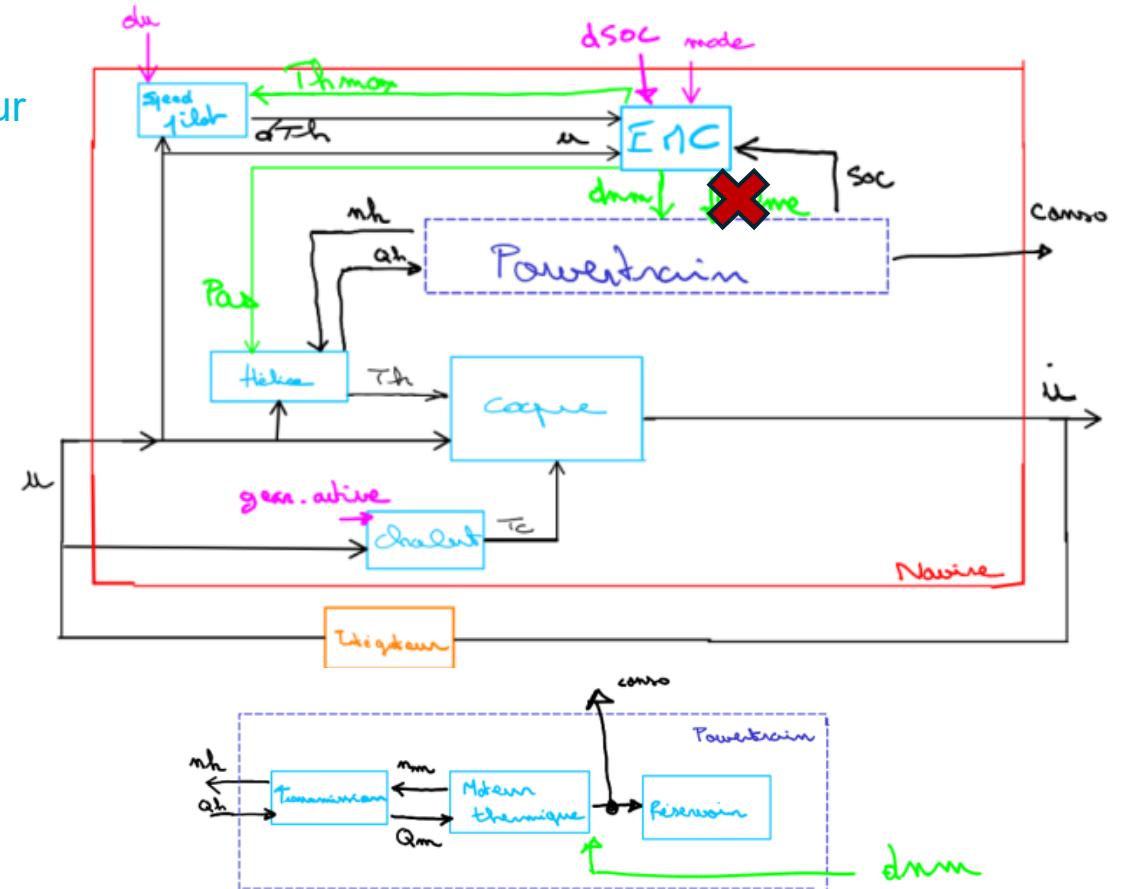
# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Formulation macroscopique des problèmes de pilotage

- Mode 2 – « loi de conjugaison » : compromis régime / couple moteur

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	0
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$



# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

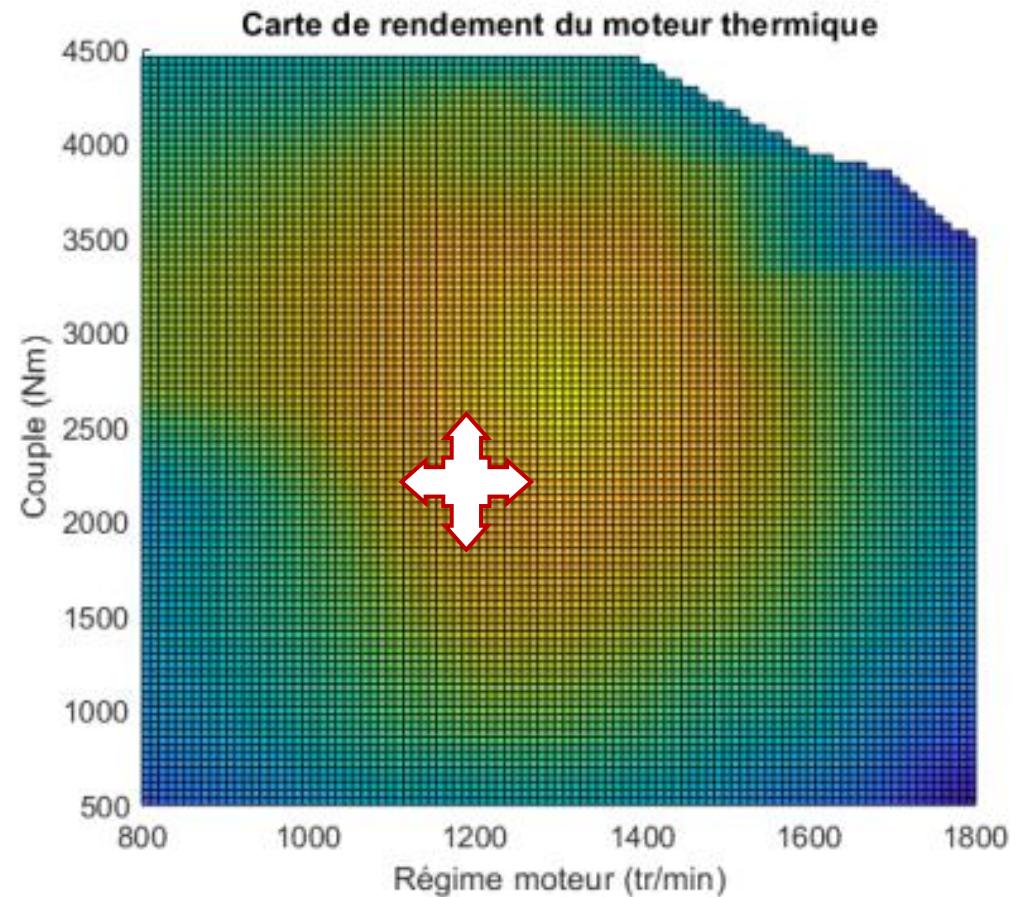
## Formulation macroscopique des problèmes de pilotage

- Mode 2 – « loi de conjugaison » : compromis régime / couple moteur

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$

Usuel : loi statique

Optim. en ligne



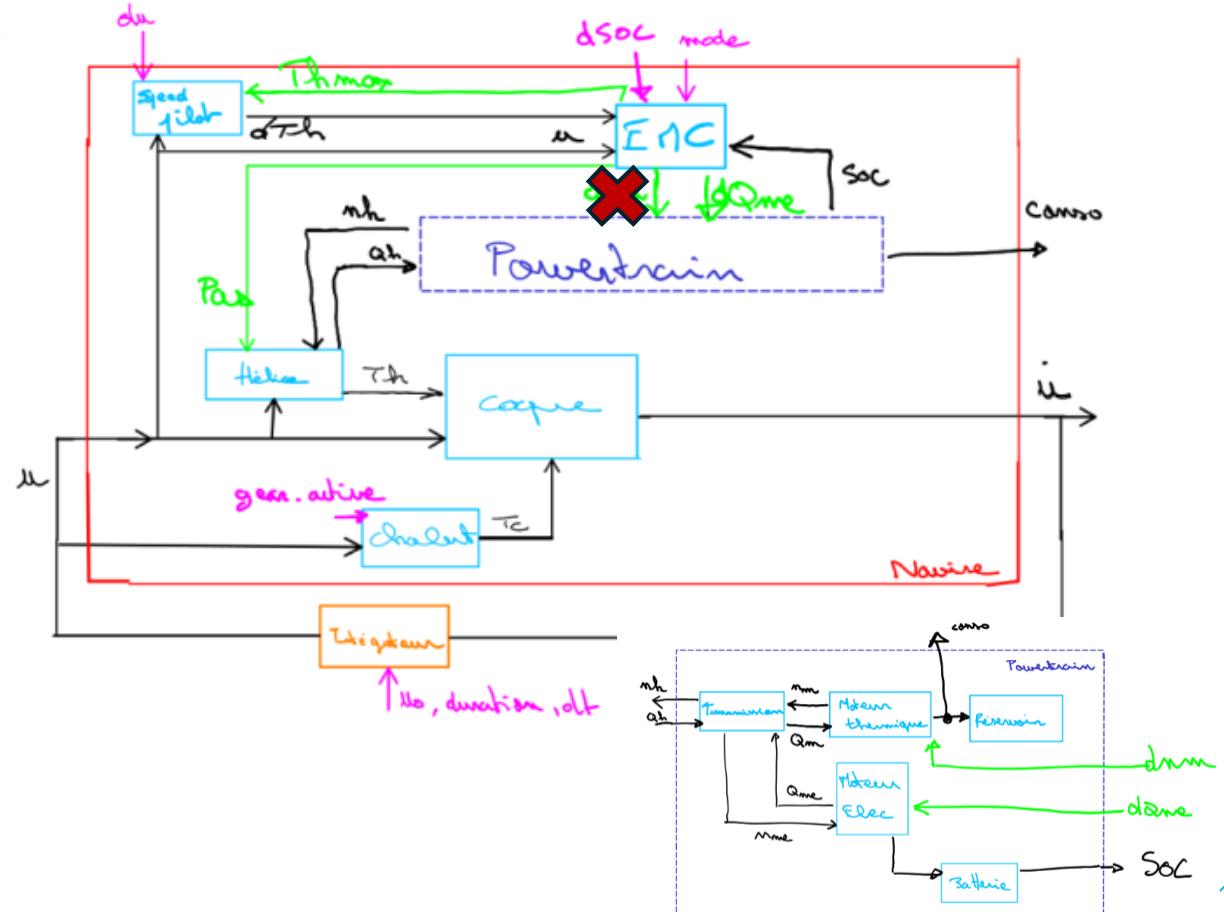
# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Formulation macroscopique des problèmes de pilotage

- Mode 3 – hybridation à régime constant : peu d'intérêt ?  
Sauf acceptabilité utilisateur

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	0
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$



# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

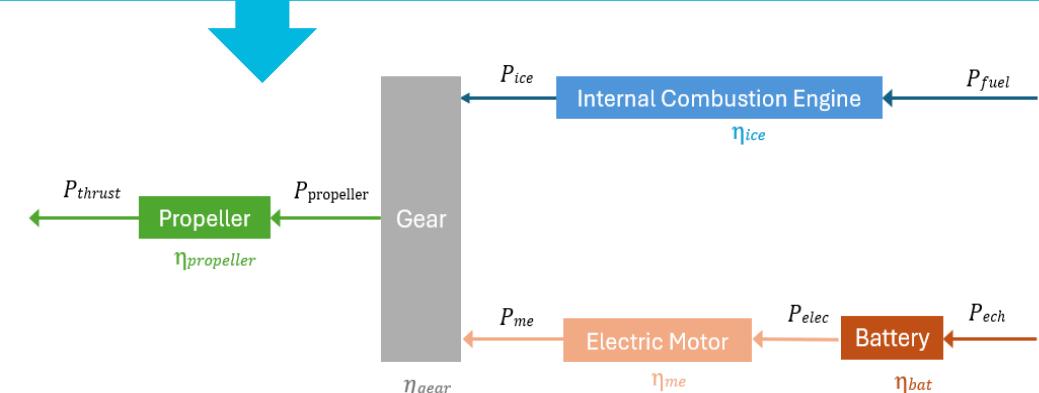
## Formulation macroscopique des problèmes de pilotage

Mode 3 – hybridation à régime constant : peu d'intérêt ?

Sauf acceptabilité utilisateur... et « facilité » du problème !

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$

Identique à Hybridation parallèle en automobile !



$$\eta_{gear} * (\underbrace{\eta_{ice} * P_{fuel}}_{P_{ice}} + \underbrace{\eta_{me} * \eta_{bat} * P_{ech}}_{P_{me}}) = \frac{P_{thrust}}{\eta_{propeller}}$$

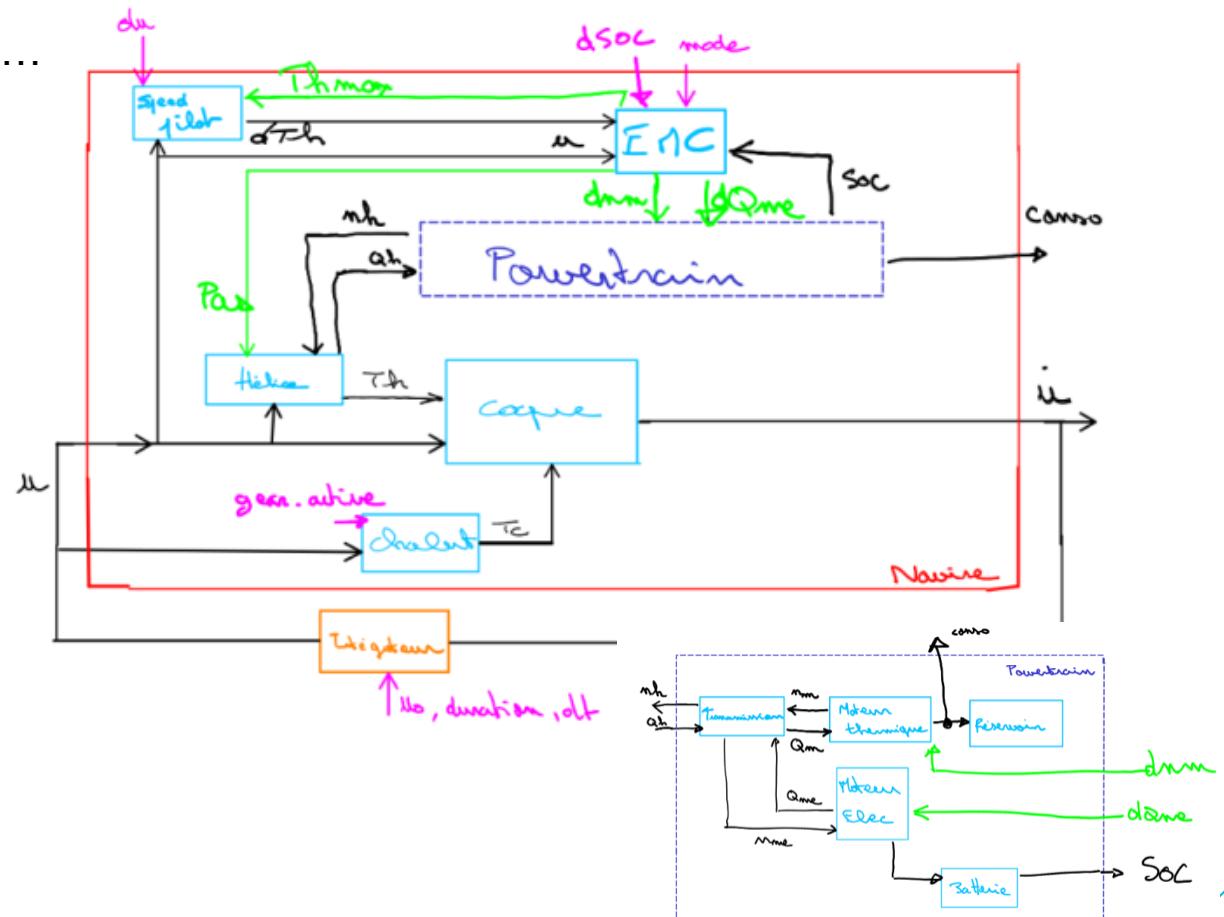
# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

## Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Formulation macroscopique des problèmes de pilotage

- #### ► Mode 4 : deux d.d.l. à gérer ! Formulation en effort / flux...

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$



# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Résolution par ECMS : Equivalent Consumption Minimization Strategy [GS13]

► Approche « pratique » dans le secteur automobile : s'affranchit du modèle des flux de puissance

Fonction coût à minimiser :

$$J(t) = \dot{m}_f(t) + s_0(t) \cdot \dot{m}_{f,eq}(t) \quad (1)$$

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$

Où :

- $\dot{m}_f(t)$  : consommation instantanée de carburant [g/s]
- $s_0(t)$  : facteur d'équivalence (sans dimension)
- $\dot{m}_{f,eq}(t)$  : consommation équivalente de carburant pour l'énergie électrique

Consommation électrique équivalente :

$$\dot{m}_{f,eq}(t) = \frac{P_{batt}(t)}{\eta_{batt} \cdot Q_{lhv}} \quad (2)$$

Guzzella, L. & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*, 3rd Edition. Springer Berlin Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>

# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Résolution par ECMS : Equivalent Consumption Minimization Strategy [GS13]

- Approche « pratique » dans le secteur automobile : s'affranchit du modèle des flux de puissance

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$

Contraintes sur le moteur thermique :

$$T_{m,min} \leq T_m(t) \leq T_{m,max}(\omega_m) \quad (5)$$

$$\omega_{m,min} \leq \omega_m(t) \leq \omega_{m,max} \quad (6)$$

$$P_{m,min} \leq P_m(t) \leq P_{m,max} \quad (7)$$

Zone de fonctionnement admissible (cartographie)

Contraintes sur le moteur électrique :

$$T_{me,min} \leq T_{me}(t) \leq T_{me,max}(\omega_{me}) \quad (8)$$

$$\omega_{me,min} \leq \omega_{me}(t) \leq \omega_{me,max} \quad (9)$$

$$P_{me,min} \leq P_{me}(t) \leq P_{me,max} \quad (10)$$

Contraintes batterie :

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (11)$$

Guzzella, L. & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*, 3rd Edition. Springer Berlin Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>

# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Résolution par ECMS : Equivalent Consumption Minimization Strategy [GS13]

► Approche « pratique » dans le secteur automobile : s'affranchit du modèle des flux de puissance

Fonction coût à minimiser :

$$J(t) = \dot{m}_f(t) + s_0(t) \cdot \dot{m}_{f,eq}(t) \quad (1)$$

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$

Facteur d'équivalence  $s_0$  constant :

- ▶ Dimensionné a priori sur la base du modèle de l'architecture hybride
- ▶ Estimation du coût carburant de la recharge :  
$$s_0 = \frac{1}{\eta_{charge} \cdot \eta_{batt} \cdot \eta_{me}}$$
- ▶ Simple à implémenter mais pas d'adaptation en temps réel

Guzzella, L. & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*, 3rd Edition. Springer Berlin Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>

# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Résolution par ECMS : Equivalent Consumption Minimization Strategy [GS13]

► Approche « pratique » dans le secteur automobile : s'affranchit du modèle des flux de puissance

Fonction coût à minimiser :

$$J(t) = \dot{m}_f(t) + s_0(t) \cdot \dot{m}_{f,eq}(t) \quad (1)$$

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$

Facteur d'équivalence  $s_0$  variable :

- Adaptation en temps réel pour maintenir le SOC autour d'une valeur nominale
- Régulateur PID :  
$$s_0(t) = s_{0,nom} + K_P \cdot e(t) + K_I \int e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}$$
- Avec :  $e(t) = SOC_{nom} - SOC(t)$  (erreur de SOC)

Solution retenue !

Guzzella, L. & Sciarretta, A. (2013). *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*, 3rd Edition. Springer Berlin Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2>

# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Résolution par ECMS : Equivalent Consumption Minimization Strategy [GS13]

► Résolution par l'approche de Guzzella & Sciarretta, Programmation Dynamique en « Temps Réel »

Fonction coût à minimiser :

$$J(t) = \dot{m}_f(t) + s_0(t) \cdot \dot{m}_{f,eq}(t) \quad (1)$$

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$

Équation de Bellman :

$$J_k^*(SOC_k) = \min_{u_k} [L_k(SOC_k, u_k) + J_{k+1}^*(SOC_{k+1})]$$

avec :

- ▶  $J_k^*(SOC_k)$  : coût optimal à l'instant  $k$  depuis l'état  $SOC_k$
- ▶  $L_k(SOC_k, u_k)$  : coût instantané (consommation équivalente)
- ▶  $u_k$  : variable de commande ( $P_{as,k}, Q_{me,k}, \omega_{m,k}$ )

Principe de l'approche Guzzella & Sciarretta :

- ▶ Maillage de l'espace des solutions (variables de commande et états)
- ▶ Application du principe d'optimalité de Bellman

# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Résolution par ECMS : Equivalent Consumption Minimization Strategy [GS13]

► Résolution par l'approche de Guzzella & Sciarretta, Programmation Dynamique en « Temps Réel »

Fonction coût à minimiser :

$$J(t) = \dot{m}_f(t) + s_0(t) \cdot \dot{m}_{f,eq}(t) \quad (1)$$

Équation de Bellman :

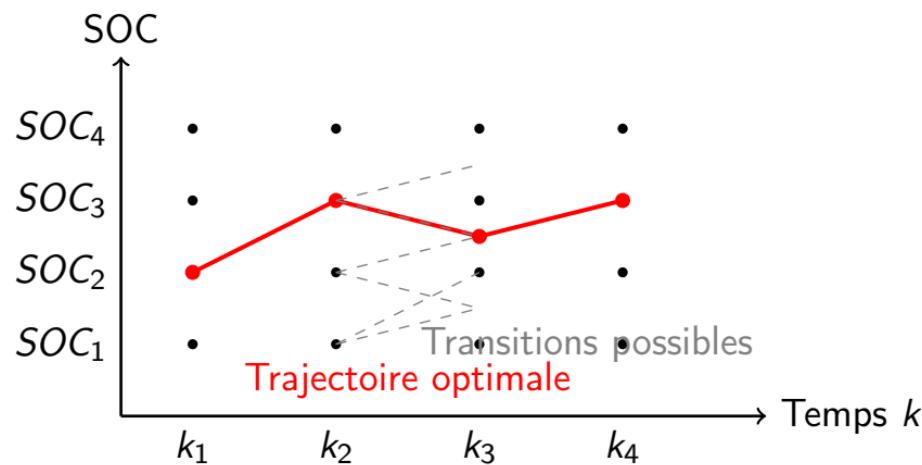
$$J_k^*(SOC_k) = \min_{u_k} [L_k(SOC_k, u_k) + J_{k+1}^*(SOC_{k+1})]$$

avec :

- ▶  $J_k^*(SOC_k)$  : coût optimal à l'instant  $k$  depuis l'état  $SOC_k$
- ▶  $L_k(SOC_k, u_k)$  : coût instantané (consommation équivalente)
- ▶  $u_k$  : variable de commande ( $P_{as,k}, Q_{me,k}, \omega_{m,k}$ )

Principe de l'approche Guzzella & Sciarretta :

- ▶ Maillage de l'espace des solutions (variables de commande et états)
- ▶ Application du principe d'optimalité de Bellman



# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Résolution par ECMS : Equivalent Consumption Minimization Strategy [GS13]

► Résolution par l'approche de Guzzella & Sciarretta, Programmation Dynamique en « Temps Réel »

Fonction coût à minimiser :

$$J(t) = \dot{m}_f(t) + s_0(t) \cdot \dot{m}_{f,eq}(t) \quad (1)$$

Équation de Bellman :

$$J_k^*(SOC_k) = \min_{u_k} [L_k(SOC_k, u_k) + J_{k+1}^*(SOC_{k+1})]$$

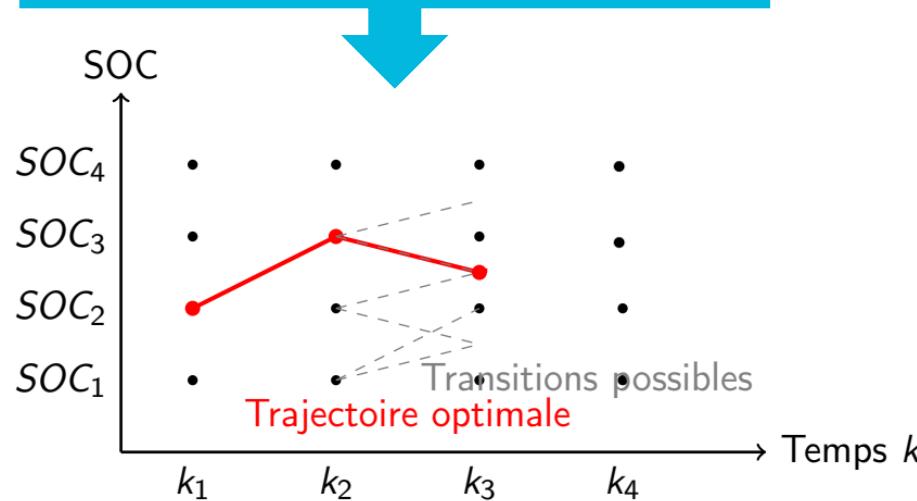
avec :

- ▶  $J_k^*(SOC_k)$  : coût optimal à l'instant  $k$  depuis l'état  $SOC_k$
- ▶  $L_k(SOC_k, u_k)$  : coût instantané (consommation équivalente)
- ▶  $u_k$  : variable de commande ( $P_{as,k}, Q_{me,k}, \omega_{m,k}$ )

Principe de l'approche Guzzella & Sciarretta :

- ▶ Maillage de l'espace des solutions (variables de commande et états)
- ▶ Application du principe d'optimalité de Bellman

En temps réel, on applique la solution  
minimisant  $L_k(SOC_k, u_k) \dots$



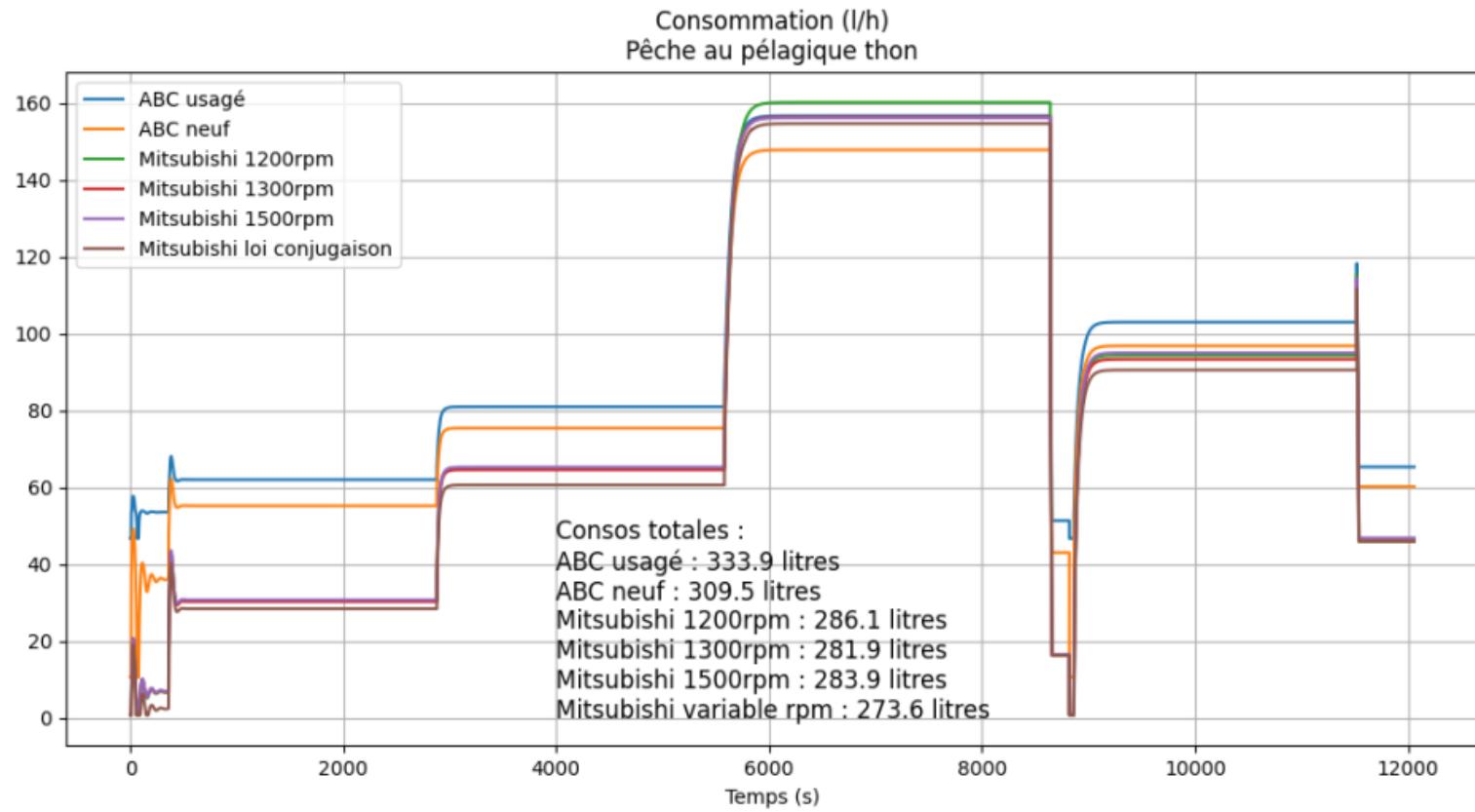
# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Quelques résultats de simulation

### Comparaison de deux moteurs, en régime fixe, et régime variable

Modes	Modèle	Régime moteur	Degrés de liberté
Mode 1	M1 – Thermique	$n_m$ constant	$\emptyset$
Mode 2	M1 – Thermique	$n_m(t)$ variable	$n_m(t)$
Mode 3	M2 – Hybride	$n_m$ constant	$Q_{me}(t)$
Mode 4	M2 – Hybride	$n_m(t)$ variable	$n_m(t), Q_{me}(t)$



# LE PILOTAGE DE L'HYBRIDATION

Comment valoriser les degrés de liberté supplémentaires ?

## Gains de consommation pour quelques configurations matériels et modes de pilotage

		Consommations simulées Dans tous les cas : état de la mer 4 Gains de consommation ( % ) par rapport au moteur ABC actuel (usagé)							
		Mode 1 (Diesel, régime constant)		Mode 2 (Diesel, régime variable)		Mode 3 (Hybride, régime constant)		Mode 4 (Hybride, régime variable)	
		Moteur ABC		Moteur Mitsubishi					
		Actuel (référence)	Neuf	nm = 1300 rpm Rm = 5,103	nm ∈ [1200rpm, 1500rpm] Rm = 5,103	Hybride nm = 1300 rpm Rm = 5,103 / Rme = 6,608 Bosch EMS1 16J20 Lehmann_AN25106	Hybride nm ∈ [1200rpm, 1500rpm] Rm = 5,103 / Rme = 6,608 Bosch EMS1 16J20 Lehmann_AN25106		
		Gains de conso par rapport au moteur ABC actuel (usagé)							
Scénario de pêche	Pélagique thon	0,0	7,3	15,6	18,1	16,6	19,9		
	Pélagique merlu	0,0	6,8	13,2	15,7	14,0	17,3		
	Fond	0,0	6,2	6,4	8,4	7,3	9,7		
	Fond Optimisé	0,0	6,9	7,7	9,5	8,4	10,8		
	<b>Gains moyens</b>	0,0	6,8	11,7	14,1	12,6	15,6		

► Remarque : « Fond » et « Fond optimisé » font références à un chalut avec un maillage conventionnel ou « optimisé ». ⇒ Gain de consommation de 5% en moyenne...

# SOMMAIRE

1. Contexte et Motivations
2. Les Grandes Lignes du Projet
3. Les Scénarios de Dimensionnement
4. Le Simulateur
5. Le Pilotage de l'Hybridation
6. Conclusion et Perspectives

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### Les contributions du projet

**Une expérience d'instrumentation « lourde » rarement réalisée pour ce type de navire.**

- Un an de data collecté : reste la question de sa diffusion...
- Identification des capteurs « minimaux » nécessaires pour réaliser un monitoring énergétique constant par les armateurs.

**Une meilleure compréhension des flux d'énergie, et des différents points de fonctionnement « distincts » du chalutier.**

- Quelques idées préconçues à revoir...

**Une réflexion sur le dimensionnement de la propulsion des chalutiers : jusqu'à présent dimensionnement sur le seul point fixe (puissance max.)**

- Une approche « système » pas du tout connue dans ce domaine, mais qui serait pourtant utile...

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Et la suite ?Scientifiquement...

### Un algorithme de pilotage à améliorer...

- ▶ **Algorithme « temps réel » : Réduire l'espace de décision en insérant des contraintes sur les cartographies variables en temps réel.**
- ▶ **Algorithme « hors ligne » voulu : pour chercher les solutions optimales.**

### Vers un outil de dimensionnement...

- ▶ **Le simulateur de navire est « opérationnel ». Mais pour le moment test « manuel » pour estimer les performances énergétiques de la configuration hybride.**
- ▶ **Couplage avec des outils d'aide au dimensionnement tel que OpenMDAO espéré à plus long termes.**



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Et la suite ? Point de vue « projet »...

### Des pistes de financement « FEAMPA » pour 2026 / 2027

- Hybridation effective du chalutier ; projet de deux ans.

### Autre(s) projet(s) dans le domaine des chalutiers

- Projet européen LIBFISH : réduction de l'impact écologique des chaluts de fond



Fig. 7. Schematic view of the sweep and bridle rigging arrangement used during the sea trials. Conventional otter board (A) and the SAO (B). By shifting from conventional to the SAO, only backstrop and warp were changed.

M. Eighani, T. Veiga-Malta, et F. G. O'Neill, « Hydrodynamic performance of semi-pelagic self-adjusting otter boards in demersal trawl fisheries », *Ocean Engineering*, vol. 272, p. 113877, mars 2023.



**MERCI**

## Activité Codex : Thèmes Véhicules et Mobilités

Activité de ces dernières années...

### Listing des projets depuis 10 ans...

- 2023 / HYBA – Hybridation Bretagne Atlantique / projet collaboratif :

Fédération France Pêche, Appel « Enjeux Actuels » ; 18 mois

**Sujet : Hybridation d'un chalutier**

Naval

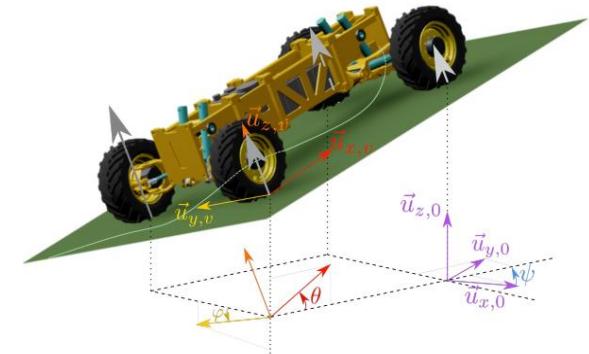


- 2019 / STAR4AGRI / Thèse Cifre société Dintec – Secom Engineering ;

Thèse Cifre ; 3 ans

**Sujet : Suivi de trajectoire autonome et robuste en milieu agricole**

Off-road



- 2019 / Projet Comorque / Projet RFI – Atlantistic2020 (Région Pays de la Loire) ;

Post-doc ; 12 mois

**Sujet : Dimensionnement d'une remorque à assistance électrique**

Off-road



## Activité Codex : Thèmes Véhicules et Mobilités

Activité de ces dernières années...

### Listing des projets depuis 10 ans...

- 2018 / Projet Chassis Brake International – Hitachi Astemo (Contrat) ;

Post-doc ; 3 ans

Veh. Auto.



**Sujet : Véhicule autonome 4 roues directrices, E.S.P.**

- 2017 / Projet Steer & Share / Projet RFI - Atlanstic2020 ;

Thèse Région ; 3 ans

**Sujet : Modélisation cybernétique du conducteur pour la réalisation  
d'un contrôle haptique partagé du volant et l'adaptation du système homme-machine**

Veh. route

PACCE



- 2016 / ANR Autoconduct / IEED VEDECOM (porteur), Stellantis, Continental,

UMR LAMIH, Univ. Gustave Eiffel, LS2N (ex. IRCCyN) ;

Thèse 36 mois

Veh. route

PACCE

**Sujet : conception d'une stratégie de contrôle partagé pour les transitions entre  
conduite manuelle et automatisée**



## Activité Codex : Thèmes Véhicules et Mobilités

Activité de ces dernières années...

### Listing des projets depuis 10 ans...

- ▶ **2015 / AMI SILENSEAS / AMI ADEME Corican (Navire du Futur) :**

**Chantier de l'Atlantique, LS2N, Stirling Design ;**

**Post-doc ; 3 ans**

**Sujet : *Paquebot à voiles ; pilotage de l'usine électrique (hybride power supply), orientation automatique des voiles***

**Naval**



Orient Express Corinthian

- ▶ **2015 / ANR VIROLO++ / Gustave Eiffel, UEVE IBISC, Gendarmerie Nationale,**

**U.P. Sud, LS2N, Editions Nat. du Permis de Conduire, ;**

**Post-doc ; 42 mois**

**Sujet : *Véhicule autonome 4 roues directrices, E.S.P.***

**2 roues**

**PACCE**

