

# Les alimentations pour la propulsion spatiale électrique

**Stéphane Mazouffre**

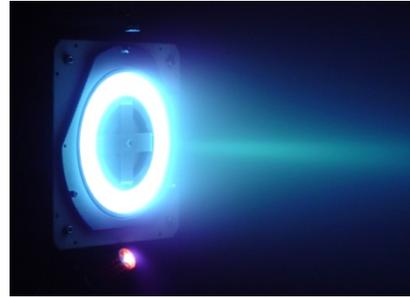
*Dir. Recherche, CNRS - ICARE*

*Resp. Equipe Propulsion Electrique*

*Directeur du laboratoire ORACLE*

# Classification des systèmes propulsifs

Propulsion électrique



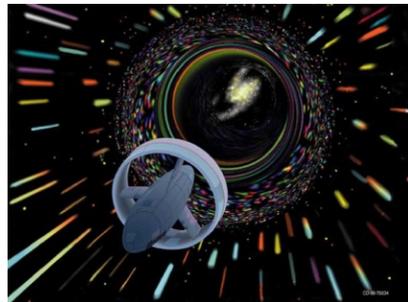
Propulsion chimique



Propulsion nucléaire



Propulsion exotique



Propulsion par faisceaux



## Principe Action – Réaction

Propulsion d'un véhicule spatial

→ conservation de la quantité de mouvement

Equation du mvt pour un système à masse variable :

$$\mathbf{F}_{ext} + \frac{dm}{dt} \mathbf{v}_{rel} = \mathbf{F}_{ext} + \dot{m} \mathbf{v}_{rel} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt}$$

$\mathbf{F}_{ext}$  Forces extérieures

$\mathbf{v}_{rel}$  Vitesse d'éjection

$\mathbf{v}$  Vitesse du véhicule

$\mathbf{T} = \dot{m} \mathbf{v}_{rel}$  Poussée

## Equation de Tsiolkovsky

### Hypothèses

- vitesses colinéaires
- absence de forces extérieures
- $\mathbf{v}_{\text{rel}}$  constante

$$\Delta v = v_f - v_0 = v_e \operatorname{Ln} \left( \frac{m_0}{m_f} \right) = v_e \operatorname{Ln} \left( 1 + \frac{m_e}{m_f} \right)$$

$\Delta v$     incrément de vitesse

$v_e$     vitesse d'éjection

$m_0$     masse initiale =  $m_f + m_e$

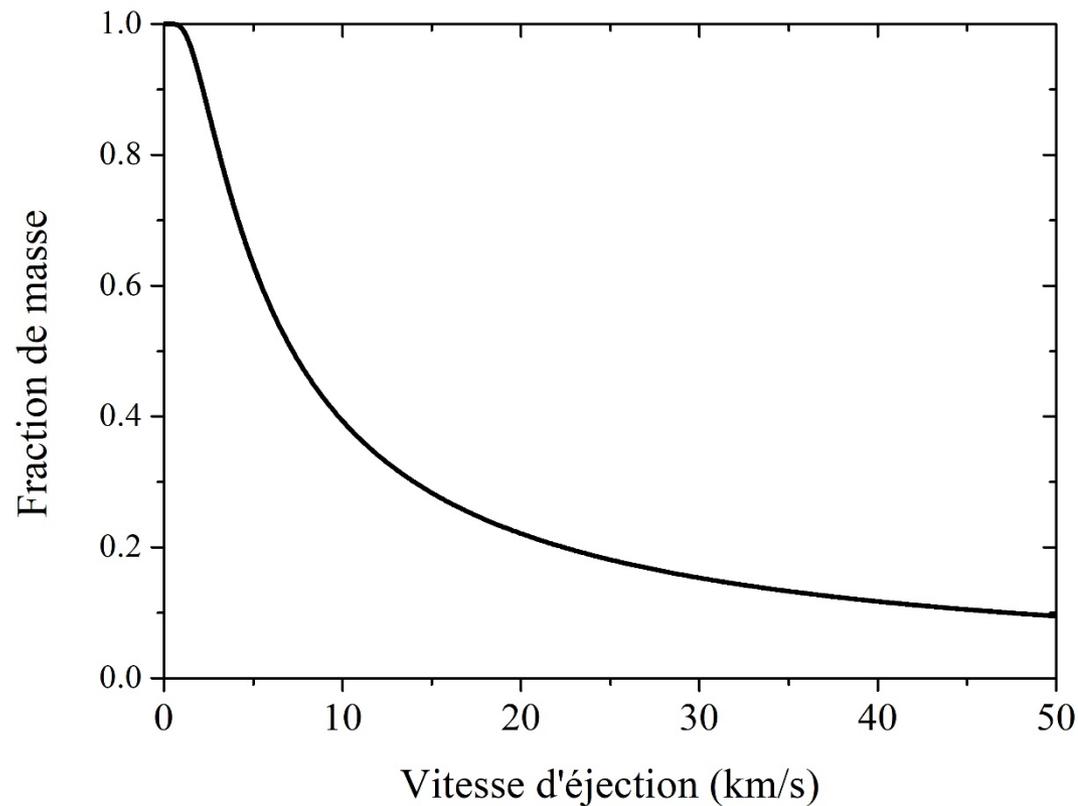
$m_f$     masse finale

$m_e$     masse d'ergol

## Consommation d'ergol

Variation de la masse d'ergol avec  $\Delta v$ 

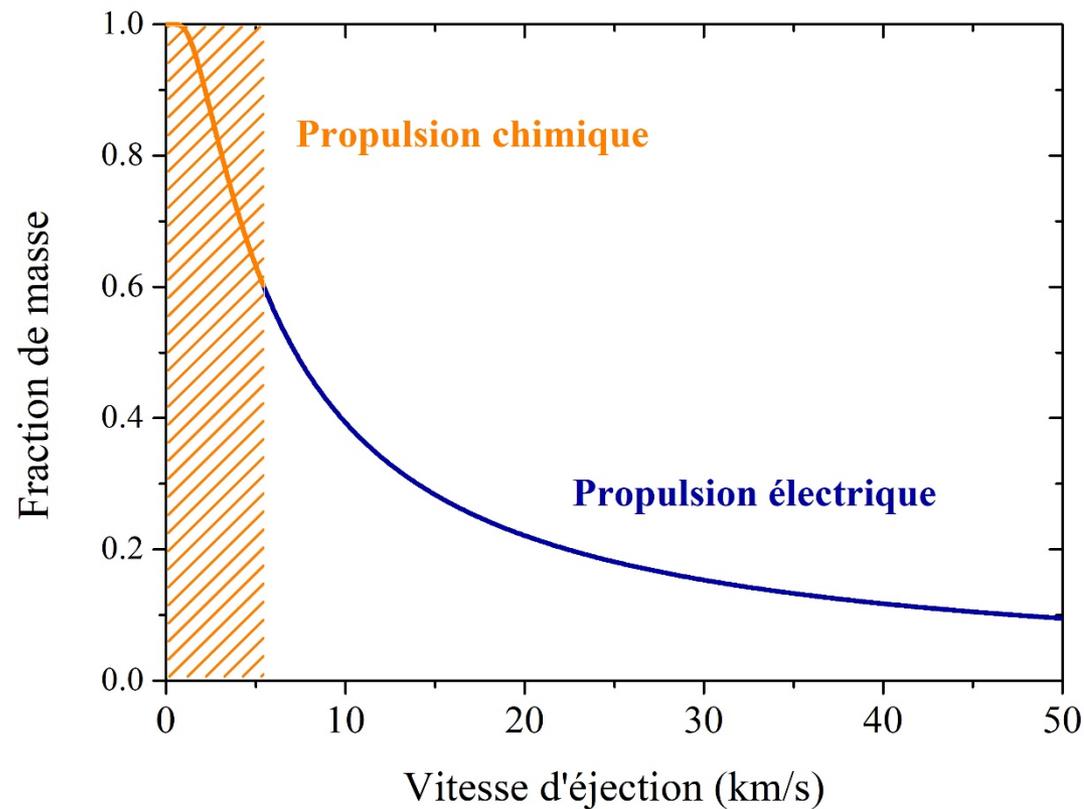
$$m_p = m_f \left( \exp\left(\frac{\Delta v}{v_e}\right) - 1 \right) = m_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Delta v}{v_e}\right) \right)$$



## Consommation d'ergol

Variation de la masse d'ergol avec  $\Delta v$ 

$$m_p = m_f \left( \exp\left(\frac{\Delta v}{v_e}\right) - 1 \right) = m_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Delta v}{v_e}\right) \right)$$



## Masse d'un satellite

Satellite de télécommunication  
 masse sèche = 2000 kg  
 opération en orbite GEO

Masse totale pour transfert et contrôle d'orbite/attitude

Lanceur	Propulsion chimique			Propulsion électrique	
	Hydrazine	Mono-prop. green	Bi-prop.	PH	MIG
	<b>Masse au décollage (kg)</b>				
<i>Atlas V411</i>	6390.42	4394.11	4551.22	2309.30	2162.16
<i>Proton M – 5 burns</i>	2897.34	2659.82	2678.06	2164.33	2092.47
<i>Proton M – 4 burns</i>	-	2659.82	2678.06	2164.33	2092.47
<i>SeaLaunch (Zenit 3)</i>	5708.88	3723.13	3837.97	2201.05	2106.52
<i>Falcon 9 v1.1</i>	-	-	-	2414.07	2214.07
<i>Ariane 5</i>	5634.03	4436.31	4521.85	2395.10	2203.55
<i>Cyclone 4</i>	-	-	-	2586.84	2275.00

SES - EPIC Workshop 2017

# Catégories en PE

Electromagnétique

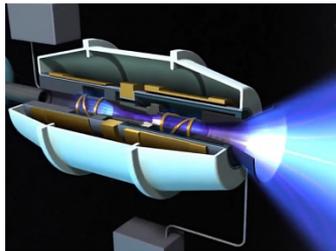
MPD



Propulseur Hall



VASIMR

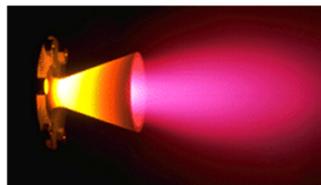


Moteur ionique

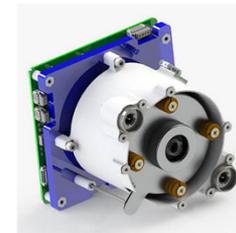


Plasma

Arcjet



FEEP



Electrothermique

Electrostatique

## Propulseurs électrostatiques

Rendement > électro-thermiques

Rendement > électro-magnétique pour  $P < 50$  kW

Très grande vitesse d'éjection

Les plus utilisés aujourd'hui

### Technologies

Propulseurs à courant de Hall

Moteurs ioniques à grilles

Propulseurs à effet de champ

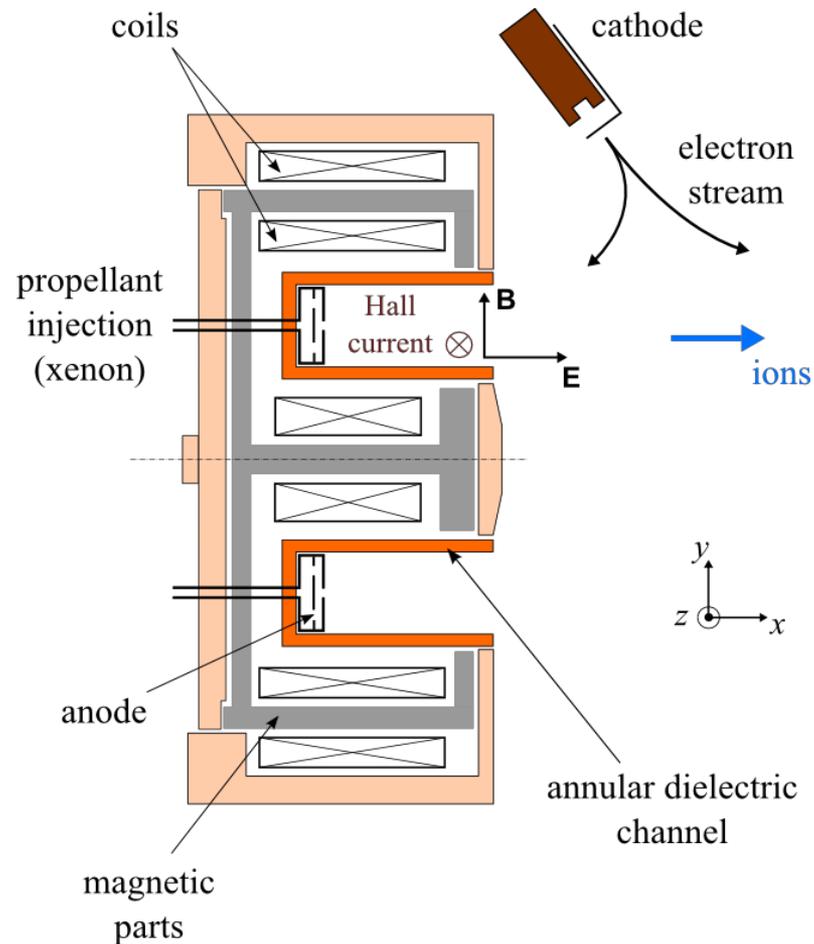
Propulseurs à liquide ionique

# Propulseur à courant de Hall

## Accélérateur sans grilles à barrière magnétique

Pas de gaine plasma, pas de limite de charge d'espace

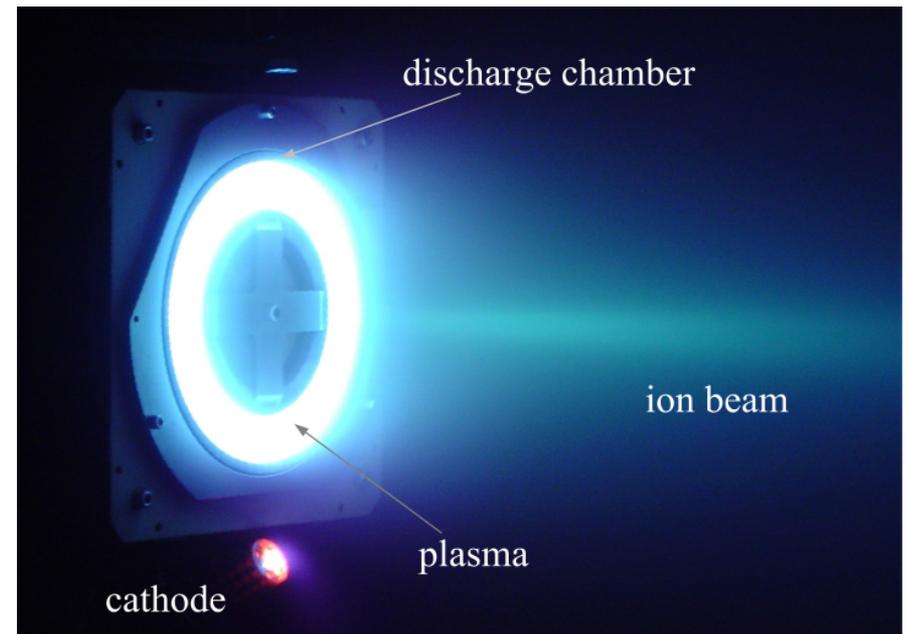
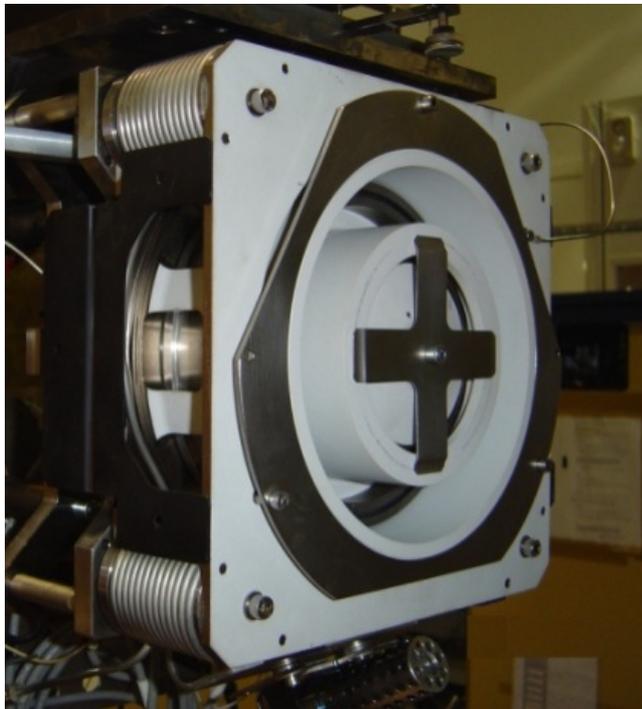
Courant d'ions élevé (grande poussée)



## Propulseur Hall

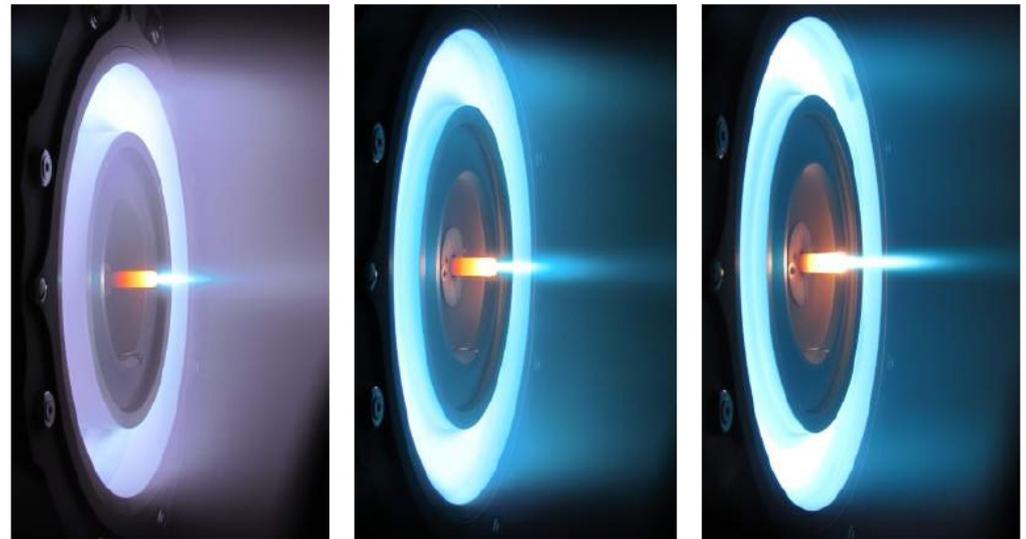
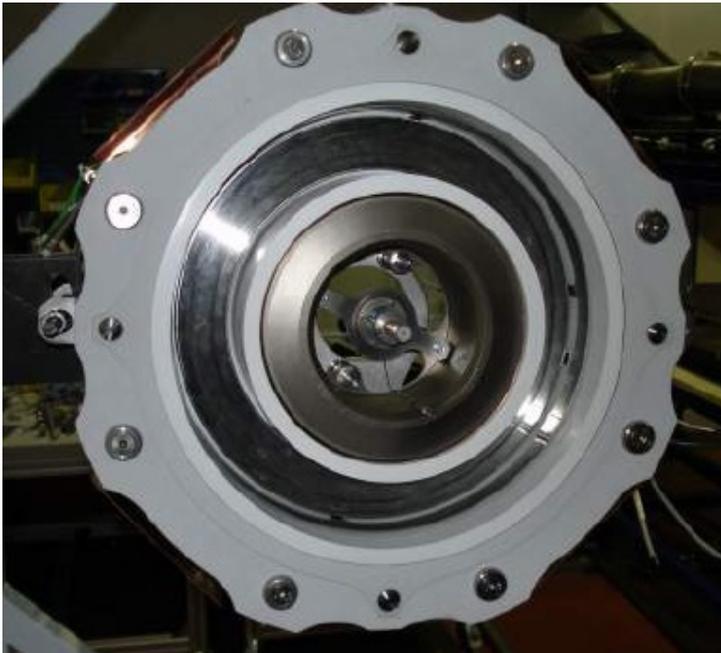
### Propulseur PPS<sup>®</sup>X000-ML

puissance = 5 kW



## Propulseur Hall

**Propulseur PPS20k-ML**  
puissance = 20 kW



## Composants

### **Propulseur à courant de Hall = source DC**

3 composants nécessitent de la puissance

Décharge cathode – anode

Cathode

Bobines magnétiques

## Décharge plasma

Puissance : 50 W à 50 kW

Courant : 0,3 A à 100 A

Tension : 200 V à 600 V

Stabilisation en tension

Courant contrôlé par le débit d'ergol (xénon)

## Décharge plasma

Puissance : 50 W à 50 kW

Courant : 0,3 A à 100 A

Tension : 200 V à 600 V

Stabilisation en tension

Courant contrôlé par le débit d'ergol (xénon)



Delta SM400 AR8  
1500 W, 400 V 8 A



Delta SM1500 CP30  
15 kW, 1500 V 30 A

## Cathode

### Cathode creuse

source d'électrons

émission thermo-ionique (W, W-BaO, LaB6...)

chauffage à 1200 °C avant démarrage  
effet Joule (contrôle en courant)  
15 A, 15 V

chauffage coupé au démarrage si  $P > 200$  W  
mode auto-thermique (décharge)

apport de puissance si  $P < 200$  W  
chauffage ou décharge ( $P \approx 30$  W)

## Cathode



Elektro Automatic PSI 9200 70  
5 kW 200 V 70 A



Magna Power XR  
2 kW 50 V 40 A

## Bobines magnétiques

Bobine : cuivre + isolant avec noyau ferromagnétique (fer) + circuit  
champ  $B \approx 200 \text{ G}$

Courant = 1 – 10 A  
(limiter le chauffage)

Tension  $\approx 5 - 10 \text{ V}$

Bobines en série si possible (minimiser nb alimentations)

$$\text{Puissance} = P_{\text{bobine}} \times n$$

$n$  croît avec taille

Alimentation par  $I_d$  (point ft fixe) employée

## Bobines magnétiques



Keithley 2231 A 303  
90 W 3 A 30 V



TTi QL355p  
100 W 4 A 25 V



TTi QL355tp  
75 W × 2 5 A 15 V

## Baie d'alimentations

### Moyen d'essais national PIVOINE-2G



Baie d'alimentations

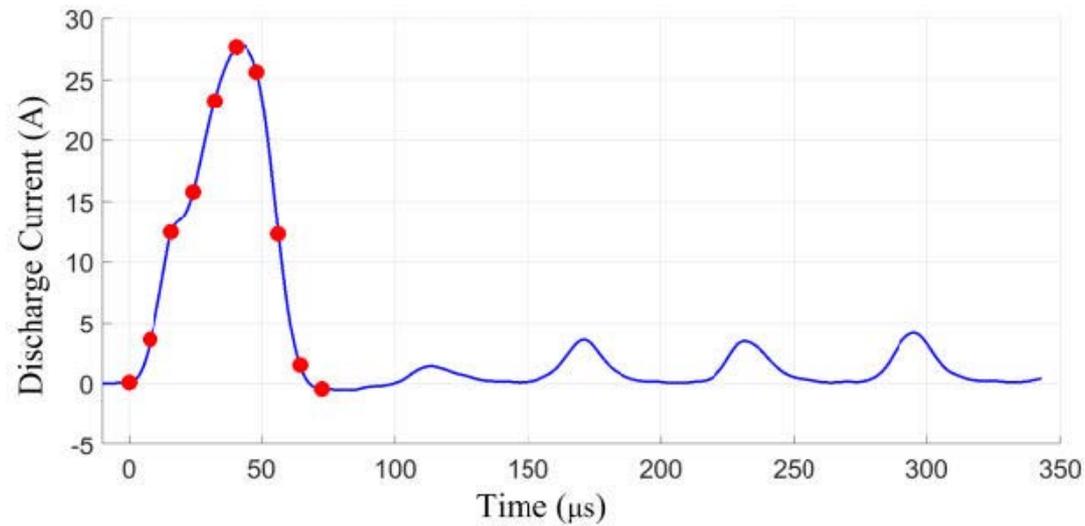
14 sources

50 W – 30 kW

Contrôle via automate

## Protection &amp; Filtres

## Pic de courant au démarrage



Shilin Yan, IEEE TPS 46 2018

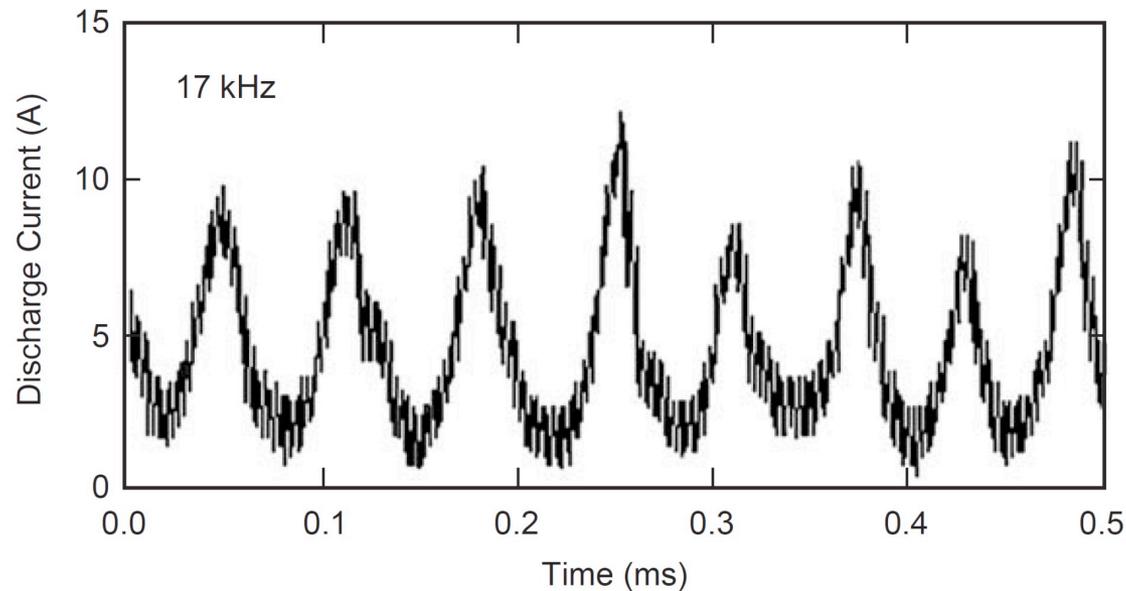
$I_d = 50 - 300 \text{ A}$   
durée = qq 10 μs

Protéger les alimentations  
fusibles  
diodes

## Protection &amp; Filtres

**Fortes oscillations de  $I_d$** 

kHz au GHz

max. énergie  $\approx$  15 kHz (respiration)

Fundamentals of EP, D. Goebel

Protection (lissage) via filtre RLC ou RL

→ impact sur les performances !

## Alimentations de vol

### Puissance d'entrée

Satellites et sondes → panneaux solaires (cellules photovoltaïques)  
35%, 200 W/kg

+ batteries

Puissance disponible (I, V) dépend

- architecture
- température

→ **utilisation Transformateurs + Régulateur**

Globalement, système de puissance à rendement élevé ( $R > 95\%$ )

Mode « direct drive » testé

## Alimentations de vol

### Qualification

Longue durée de vie en environnement hostile (vide, radiations)

$$t > 10000 \text{ h } (> 1 \text{ an})$$

Cycles

$$n > 5000$$

Résistance aux vibrations + chocs

Fiabilité > 99,9 %

architecture simple

Rapport  $P/m$  grand

→ **Coût très élevé**