

Projet Court AAE 2023/2024

Caractérisation expérimentale d'un arc pour des conditions aéronautiques haute puissance

Porteurs : Cathy Rond (Safran) et Dunpin Hong (GREMI)

Présentation orale faite par Cyril (Safran) et Dunpin (Gremi) le 20 mars 2024 à l'AG de l'AAE

Transparents faits principalement par Cathy

Campagne GREMI - Safran

21-25 Août 2023

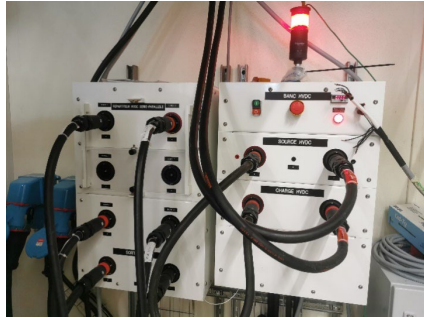


Hugo Meunier (SEP, Safran)
Frederic Canevet (SEP, Safran)

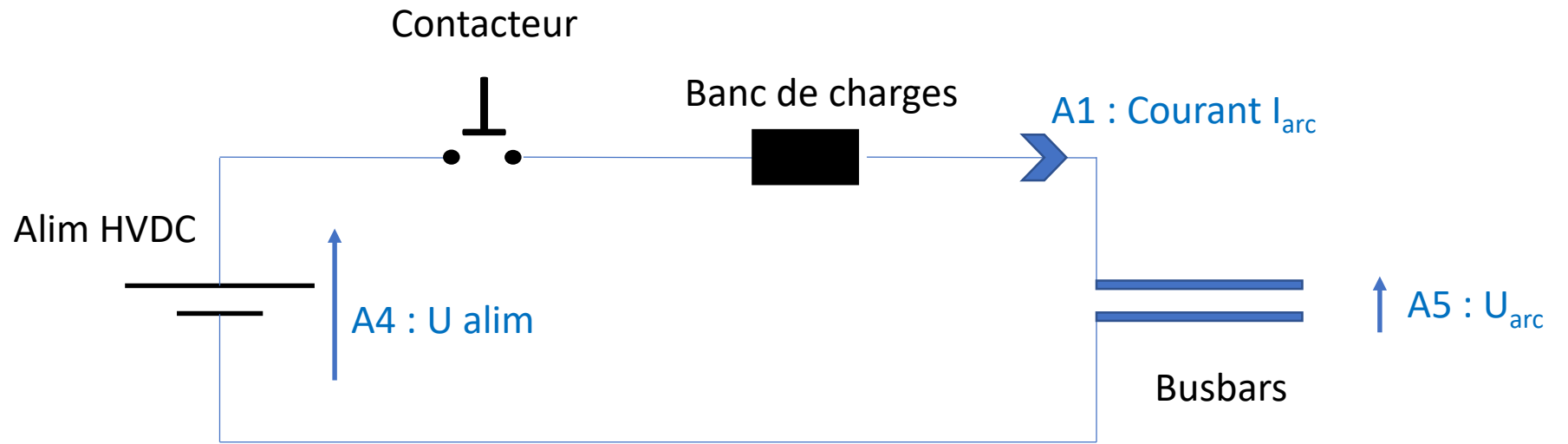
Cyril Van de Steen (Saftech)
Cathy Rond (Saftech)

Dunpin Hong (Gremi)
Hervé Rabat (Gremi)

Moyen d'essai (alim DC, U up to 800V, I up to 250 A)



A3 : trig in
A2 : trig camera



Aluminium 1050A (99%) + traitement Cu/Ni/Ag
4 x 25 x 140 mm

Configuration : FOD (Foreign Object Debris, Cu ou Sn)



Configuration :
Ecartement (25 mm/s)

Diagnostic 1 – Signaux électriques

Diagnostic 2 – Dynamique de l'arc



Oscilloscope

Acquisition/Enregistrement : 100 kHz

Camera rapide Safran SEP : Photron SA4

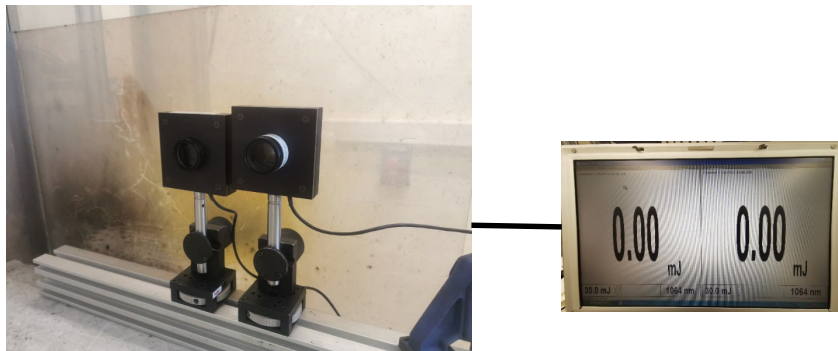
Objectif 18-270 mm (obturateur F3,5-6,3)

Camera rapide GREMI: Photron SA5

Objectif AF-S 40 mm (obturateur F2,8)

Avec un Doubleur et Filtre passe bande

Diagnostic 3 – Energie rayonnée

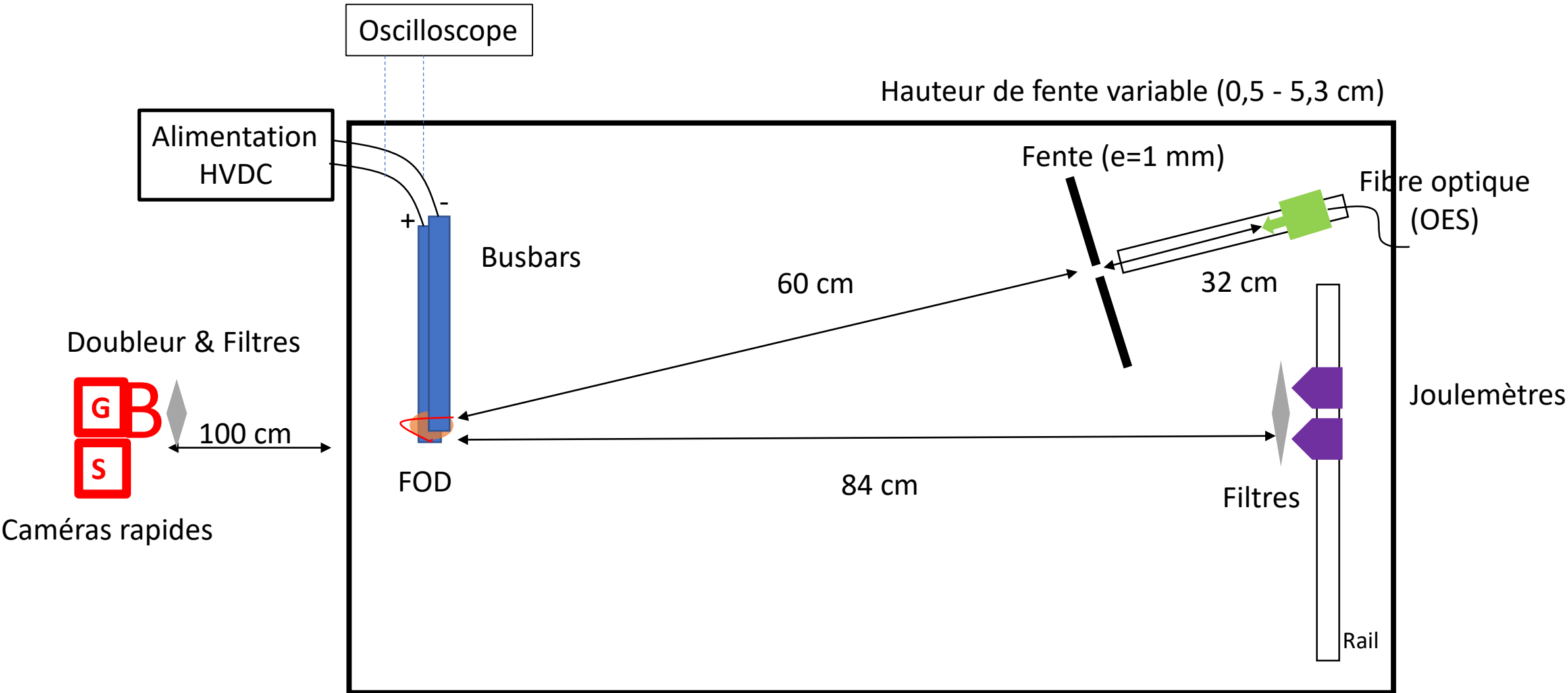


2 Joulemètres : XPLF12, from Gentec Electro-Optics avec Filtres Gentec (F1, F2 et F3)

Diagnostic 4 – Spectroscopie d'émission (OES)



Banc d'essai – FOD - Test 28-63



Vue de dessus

Résumé des essais

- 92 essais réalisés
- 65 essais exploités
- 2 configurations d'initiation : FOD et écartement

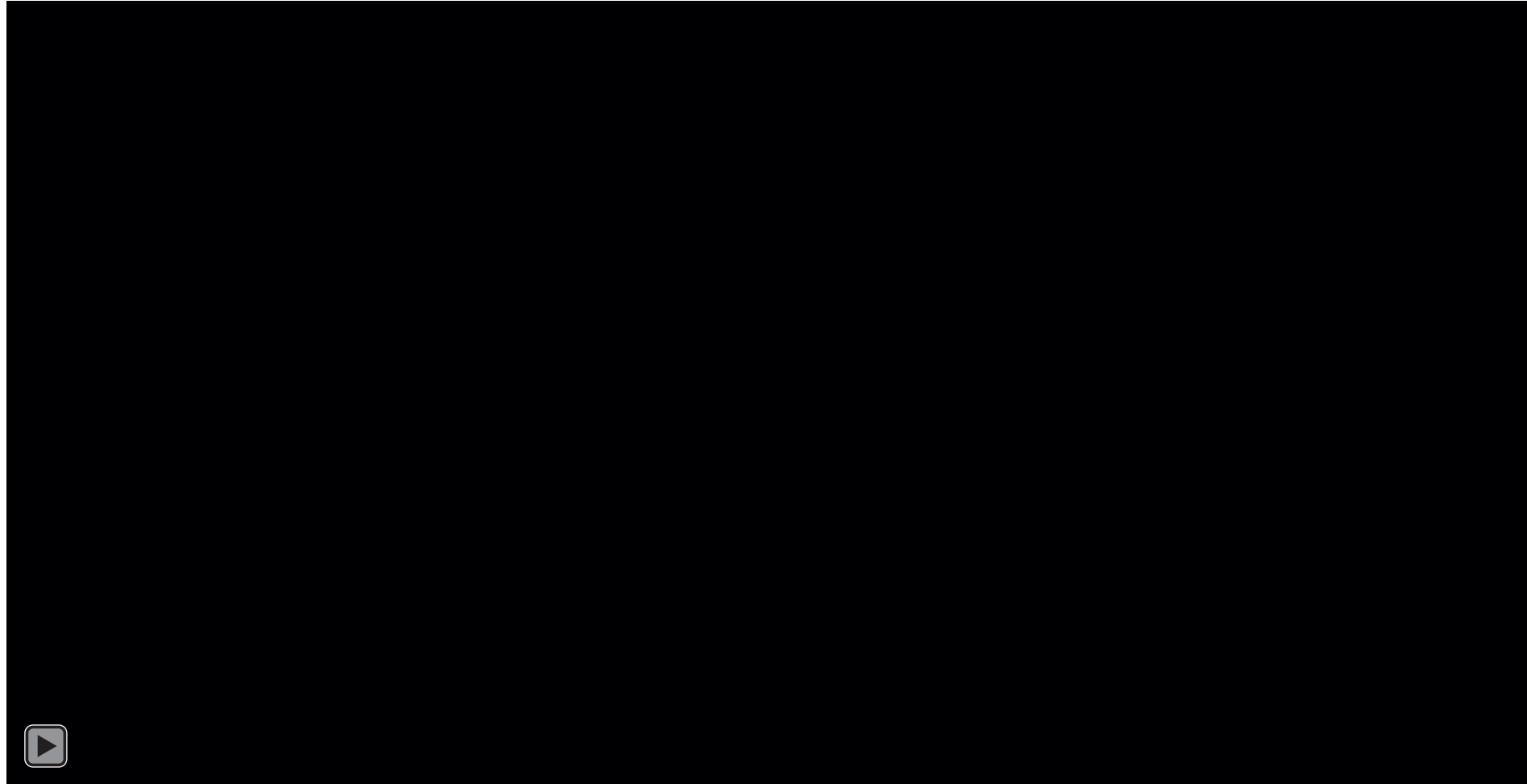
FOD

N°	Tension alim (V)	Courant alim (A)	Energie (J)	Durée (ms)	FOD
28-37	800	180	3676	127	Cu
38-43	800	180	3859	124	Sn
44-54	540	180	2209	124	Cu
55-63	800	120	2400	110	Cu

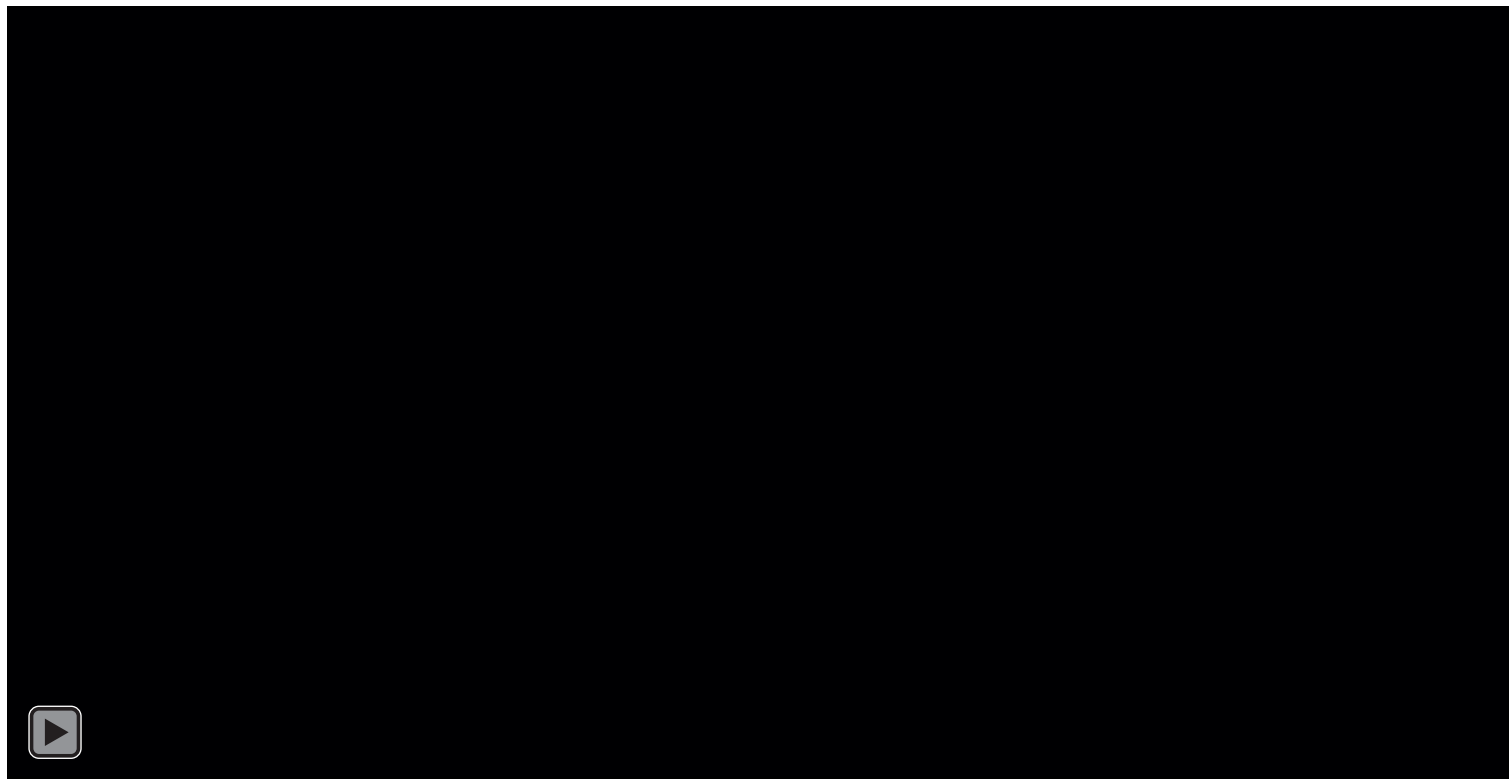
Ecartement

N°	Tension alim (V)	Courant alim (A)	Energie (J)	Durée (ms)
64-74	800	160	1168-4530	290-630
75-86	800	240	710-4945	119-695
87-92	540	250	1850-5310	271-705

FOD typique (28, 800 V, 180 A)

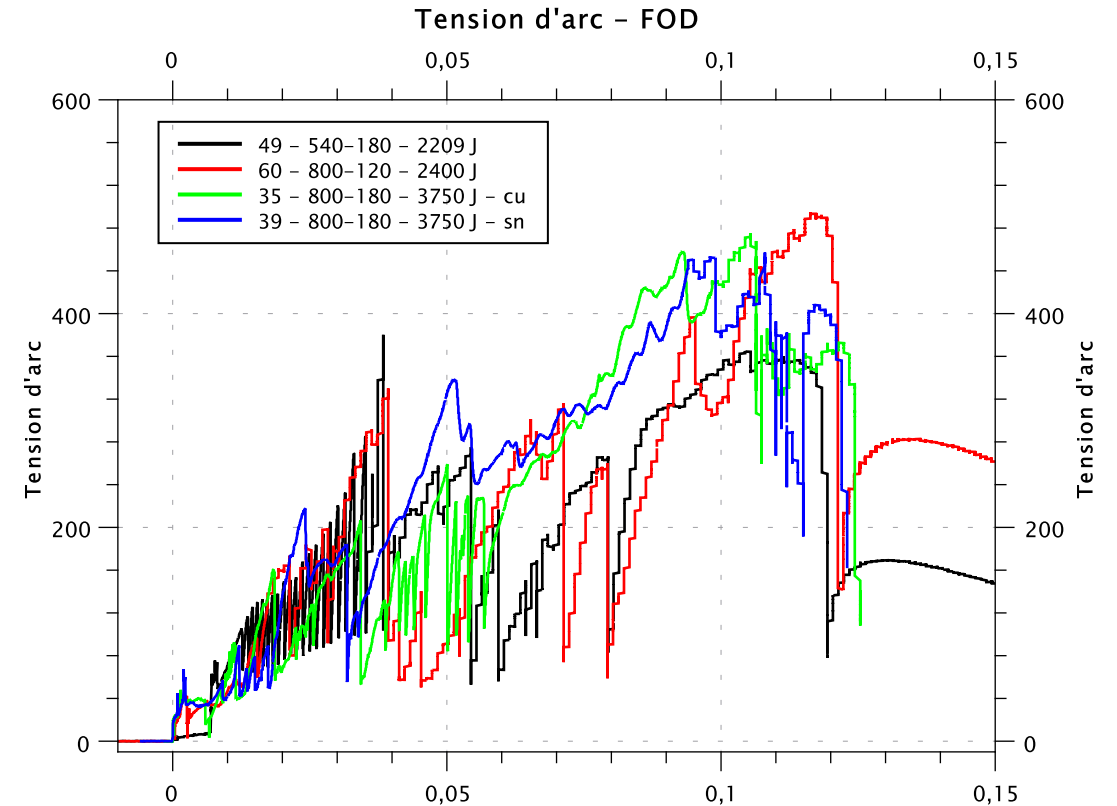
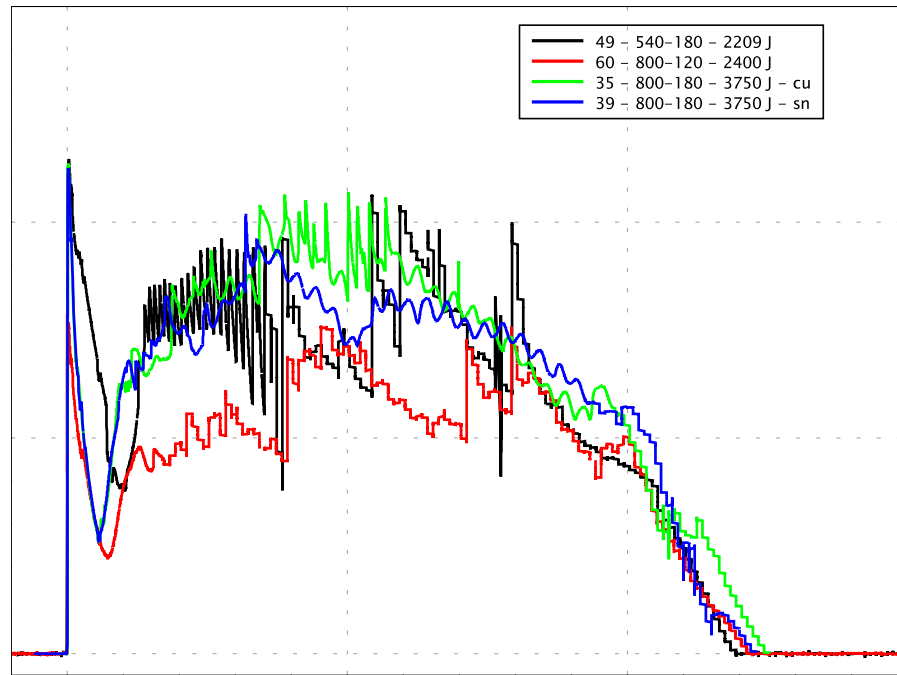


Ecartement (66, 800 V, 160 A)



Courant HVDC

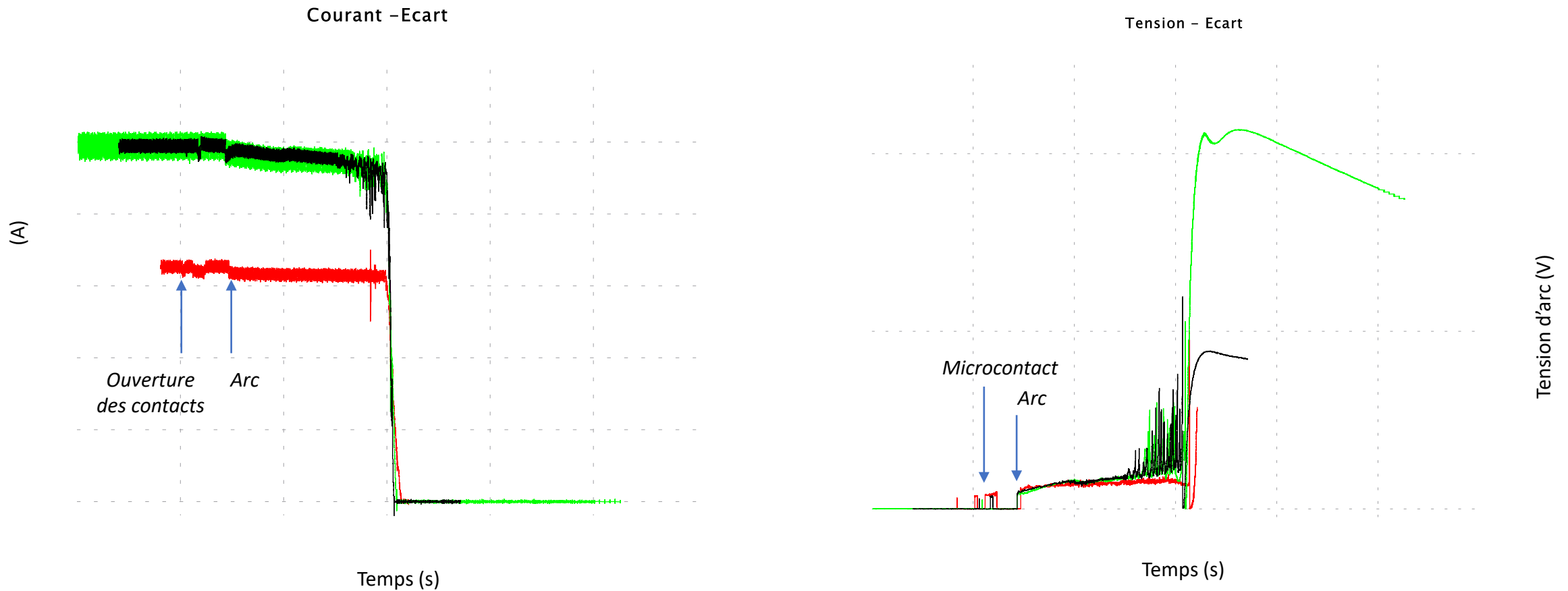
FOD – influence des conditions d'alim (U&I)



Ouverture
contacteur

- Variation de I_{arc} [100-200] A pendant l'arc
- Variation importante de U_{arc} [40 – 500] V pendant l'arc
- Pas d'influence évidente des conditions d'alimentation sur l'évolution de U_{arc} (et I_{arc})

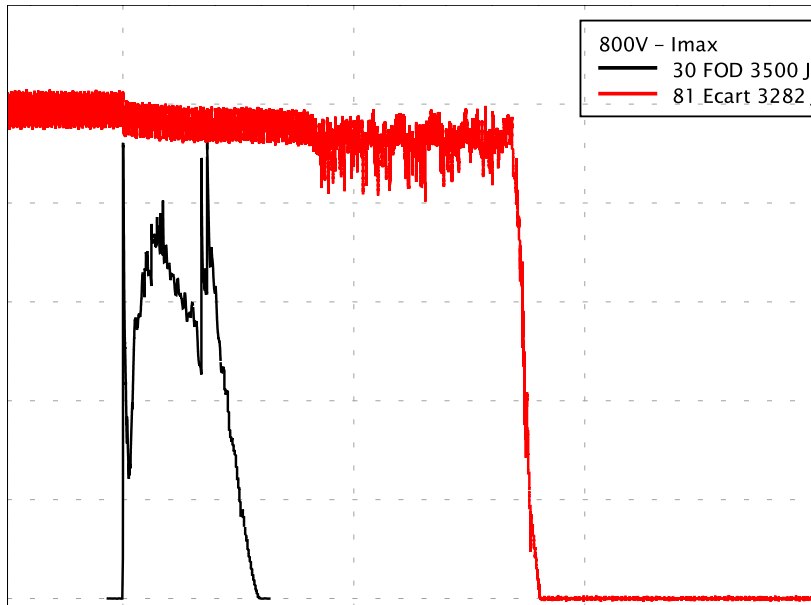
Ecartement – influence des conditions d'alim (U&I)



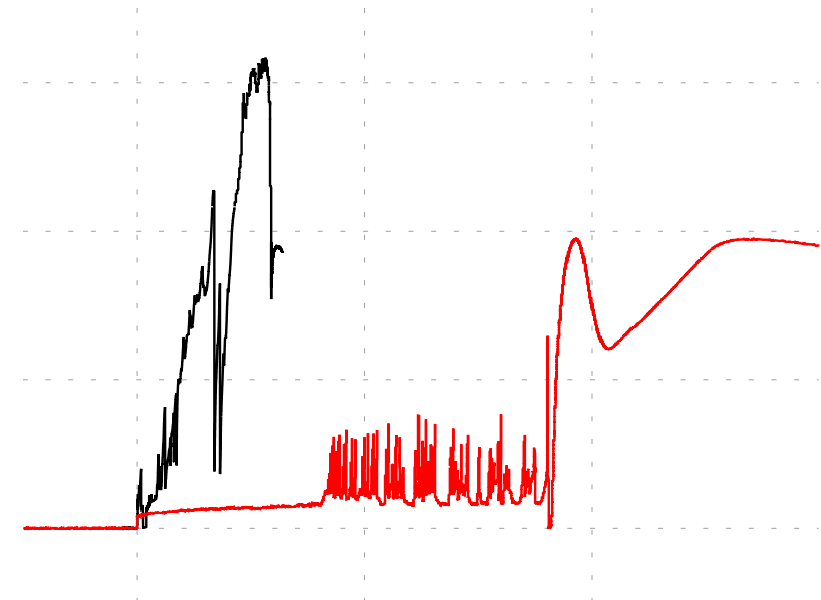
- $I_{\text{arc}} = I_{\text{consigne}}$
- U_{arc} reste faible en valeur « continue » [20 – 40] V
- U_{arc} ne varie pas avec la tension de consigne => elle est imposée par l'arc => l'énergie est pilotée par I alimentation
- Présence de fluctuations sur certains signaux U_{arc}

Comparaison FOD – Ecartement pour la même énergie

Conditions 800 V - I_{max}



Temps (s)



Temps (s)

- Pour une même énergie : U_{arc} , I_{arc} et les durées d'arc sont très différentes entre FOD et Ecartement

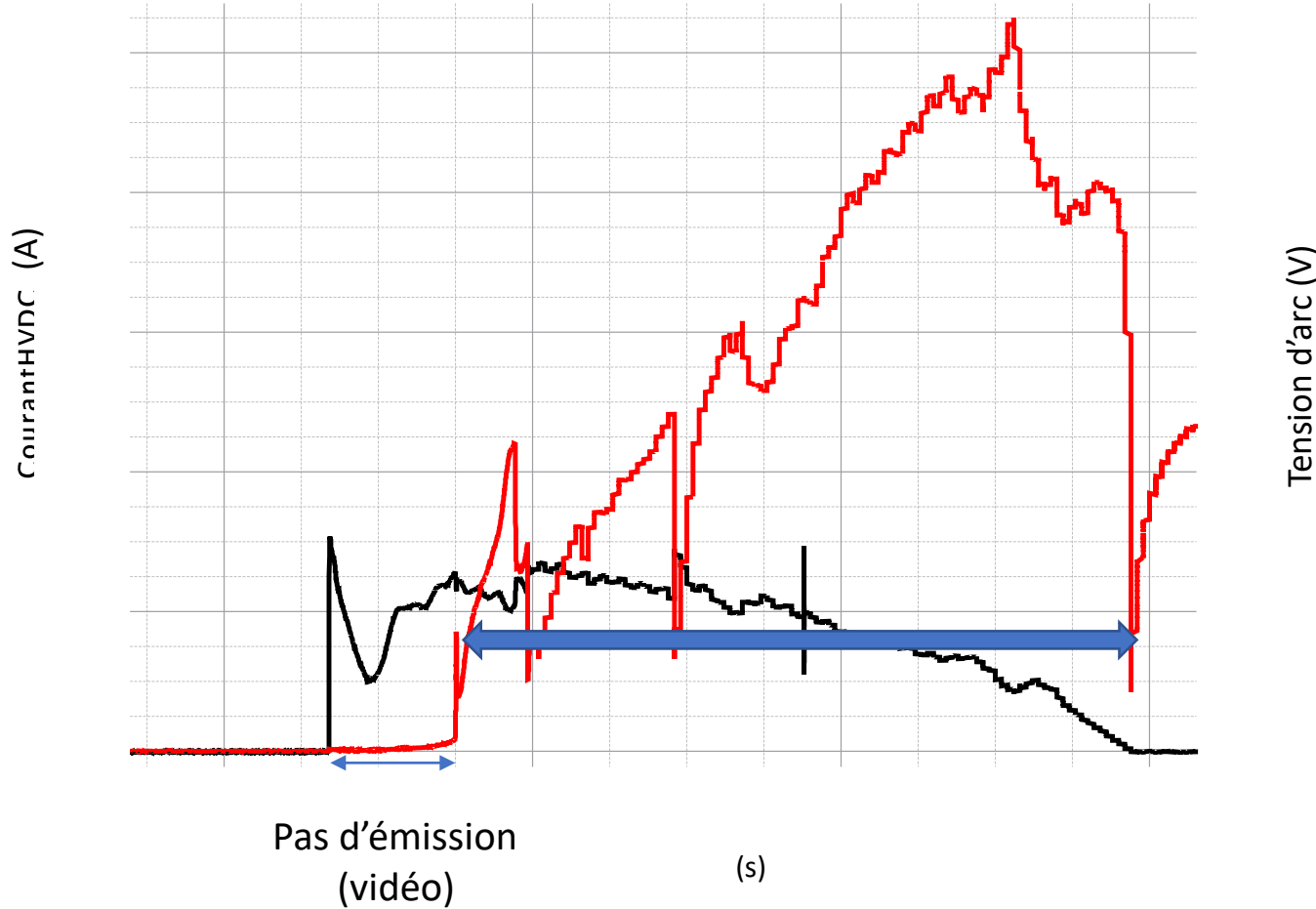
A discuter :

Est-il utile de refaire des manip avec la même durée d'arc (en contrôlant la durée par écartement) ?

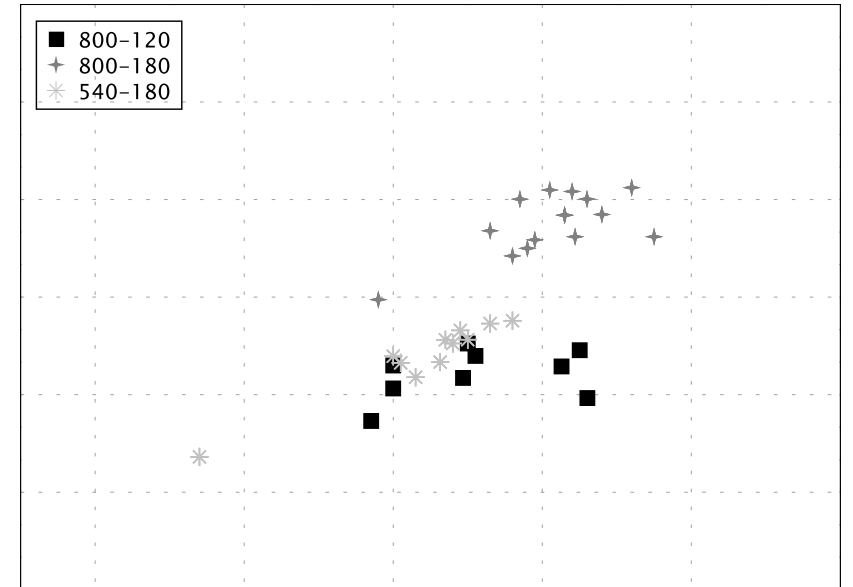
Ex : l'énergie de 81 serait de 850 J pour une durée d'arc de 120 ms (comme l'essai 30), donc pas comparable (3500 J) ! Si on veut une énergie comparable avec une durée comparable, il faut augmenter le courant d'alim de l'essai 81 : 240 A => 600 A (pour 30 $I_{alim}=180A$)

Si on raisonne en termes de coupure, la durée d'arc peut être intéressante, mais côté endommagement et détection l'énergie est peut être plus pertinente

Energie électrique vs durée, FOD



Tension d'arc (V)



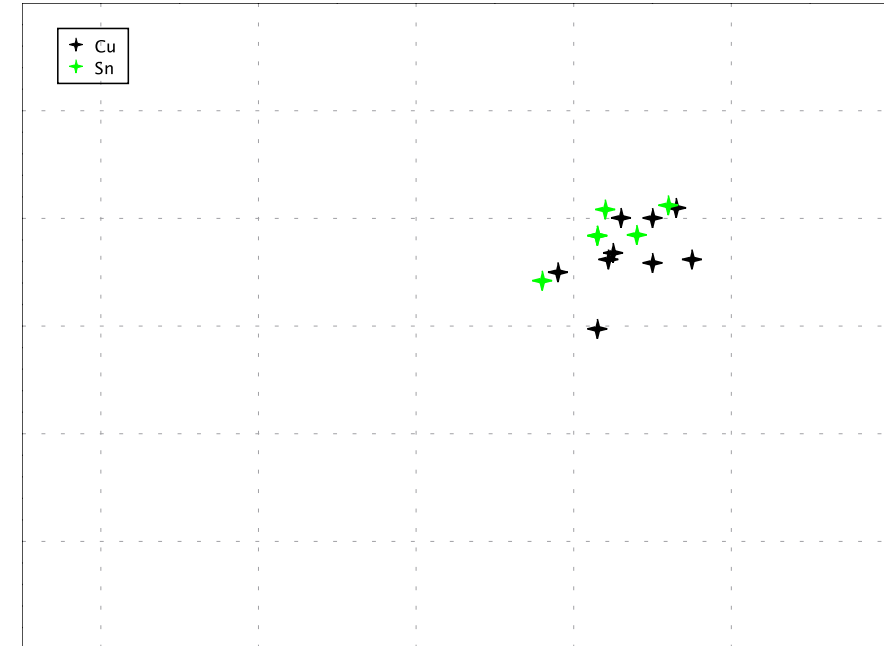
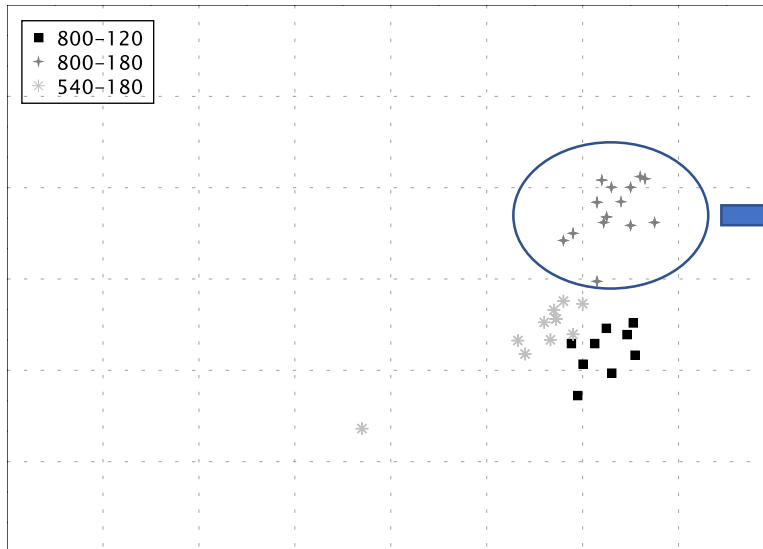
- Calcul de l'énergie par $E = \int U_{arc} \cdot I_{arc} \cdot dt$

- Pas de comportement linéaire évident entre durée et énergie électrique
- Dispersion significative (similaire avec signaux électriques)

Energie électrique vs durée

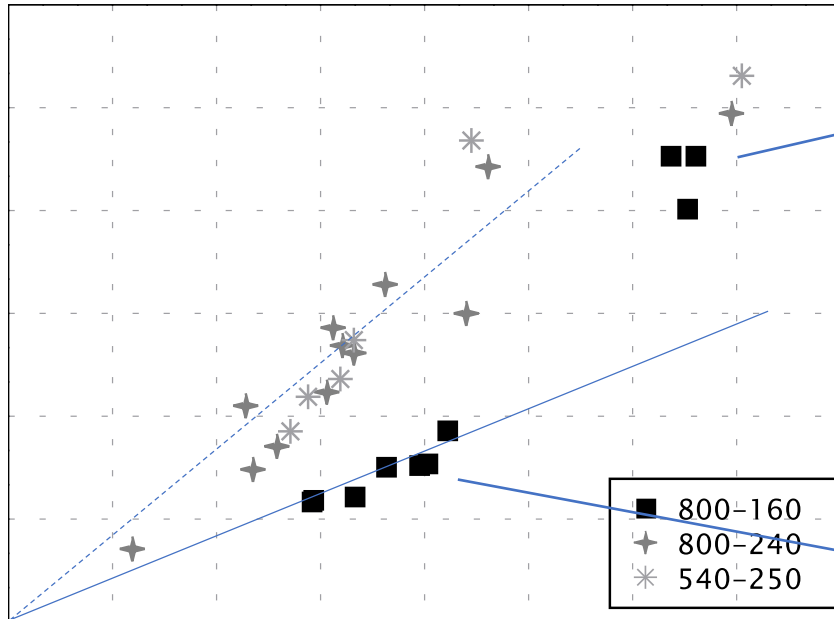
FOD

Influence Cu - Sn

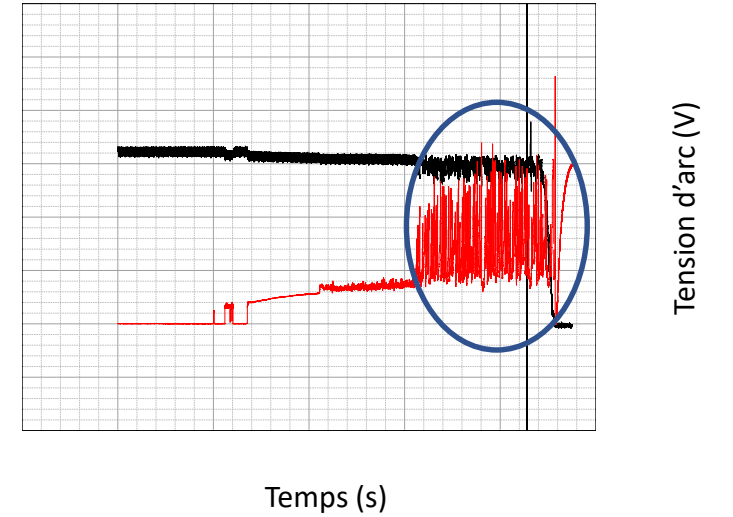


- Pas d'influence visible de la nature du FOD sur l'énergie électrique

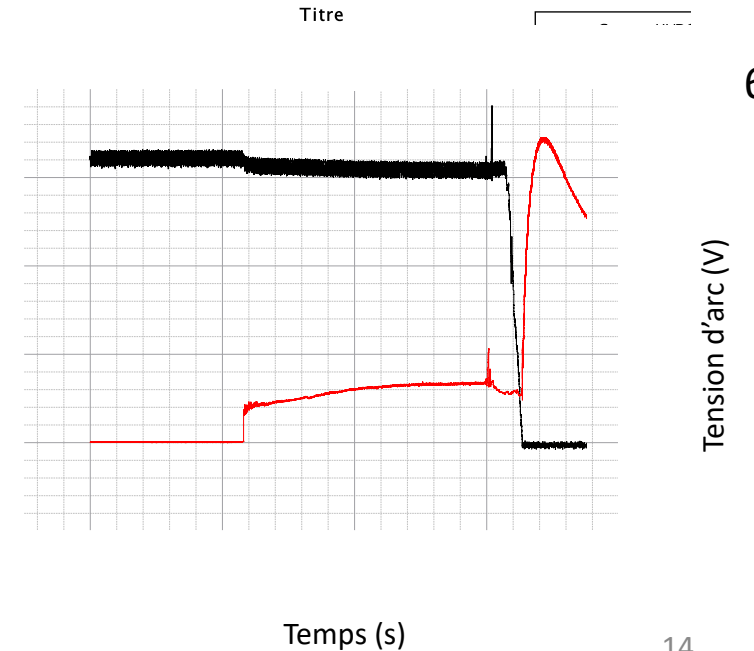
Energie électrique vs durée Ecartement



- Même tendance pour 800-240 et 540-250 (car courant similaire)
=> Energie pilotée par I_{arc} ($U_{consigne} > U_{arc}$)
- Comportement presque linéaire
- Mise en évidence de fortes fluctuations sur U & I pour certains essais



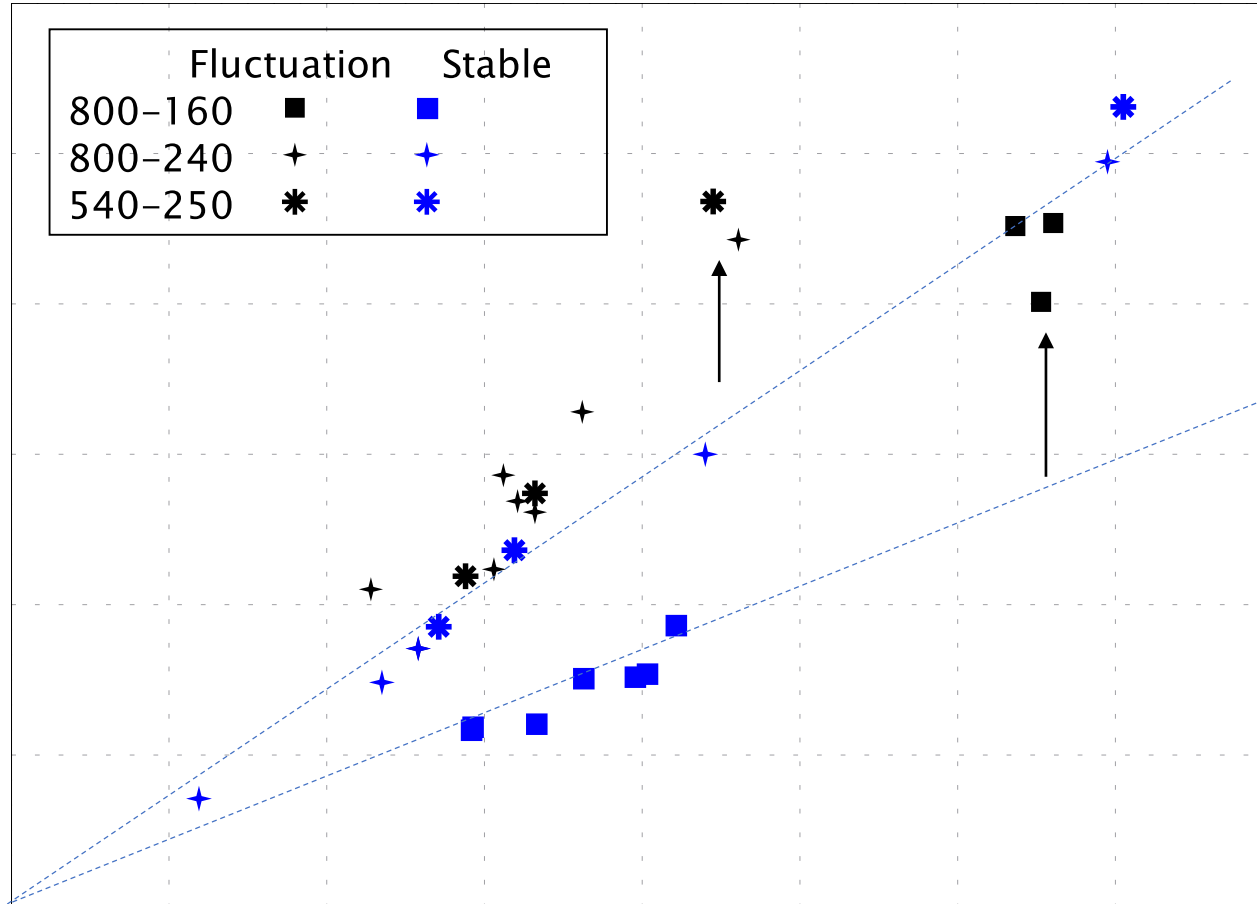
65



66

Energie électrique vs durée

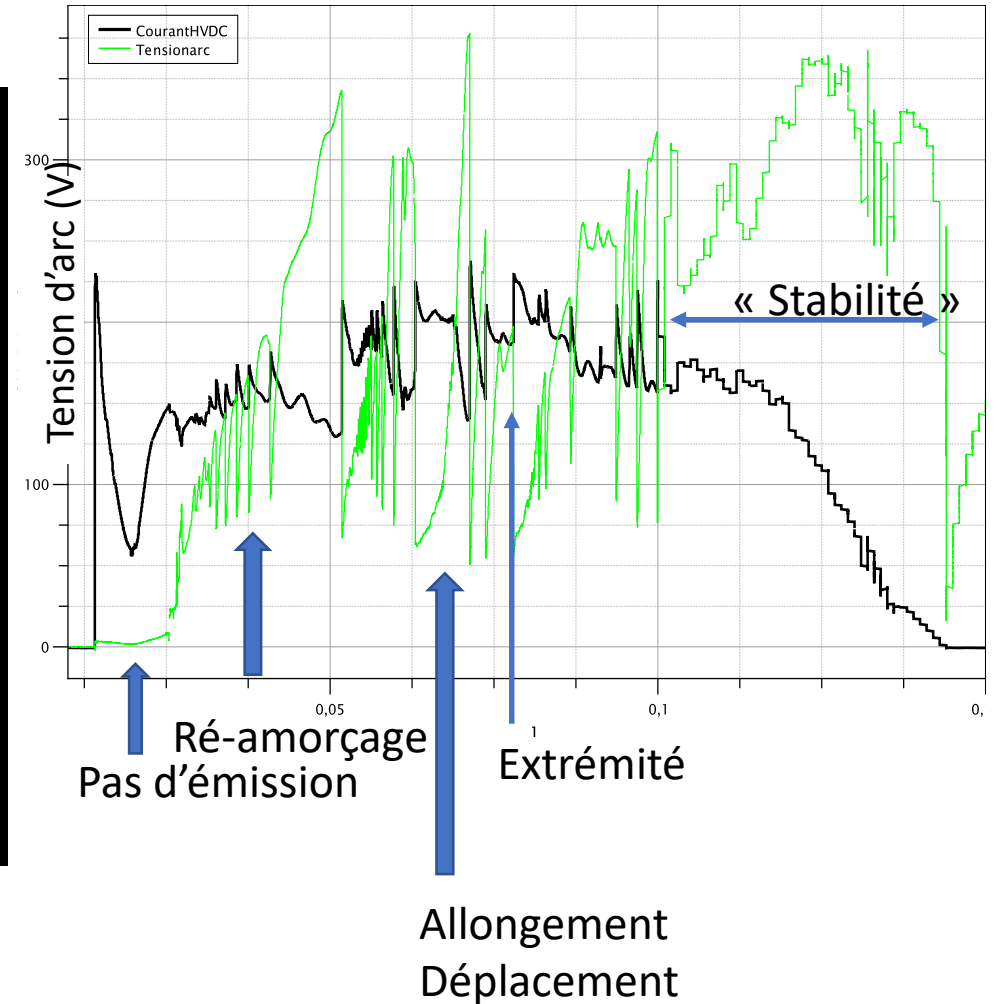
Ecartement



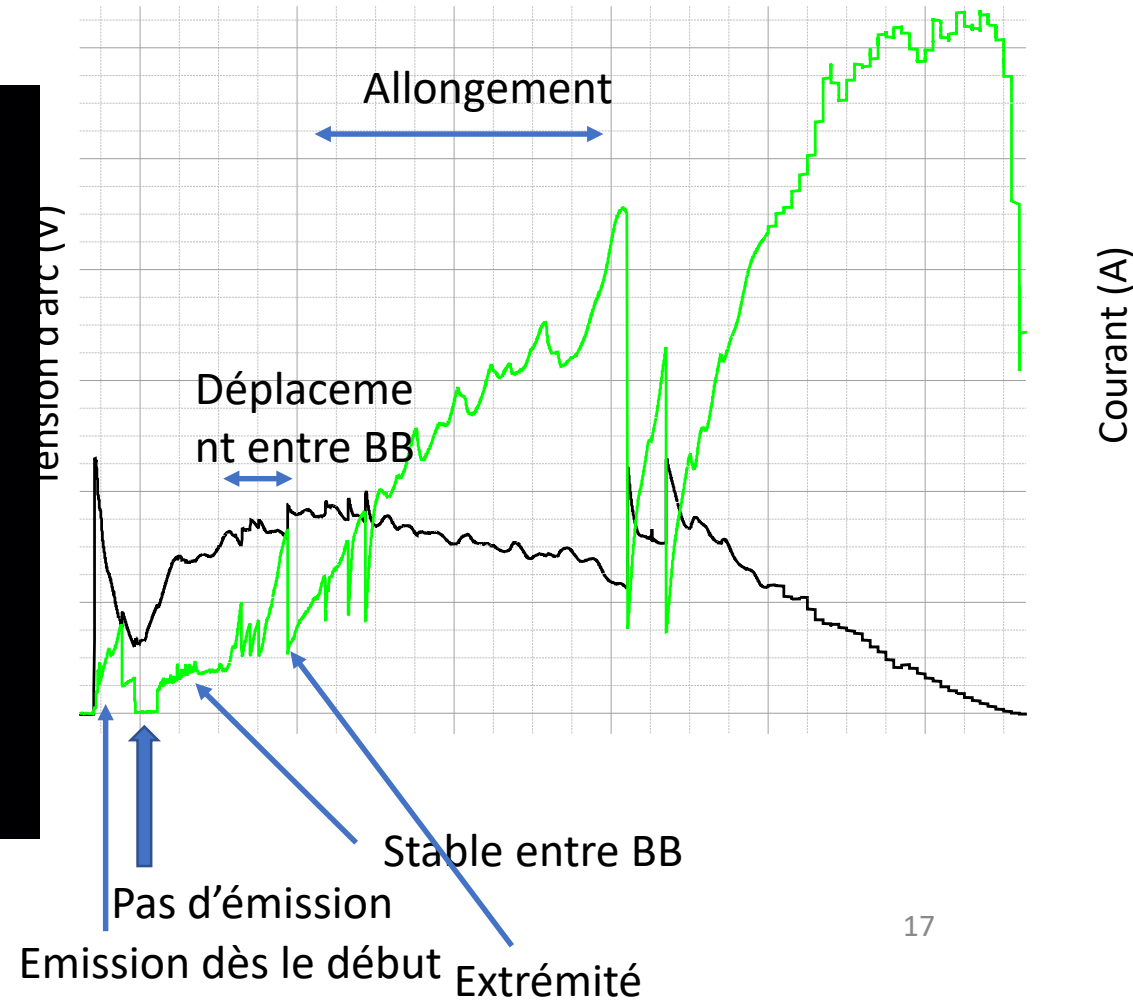
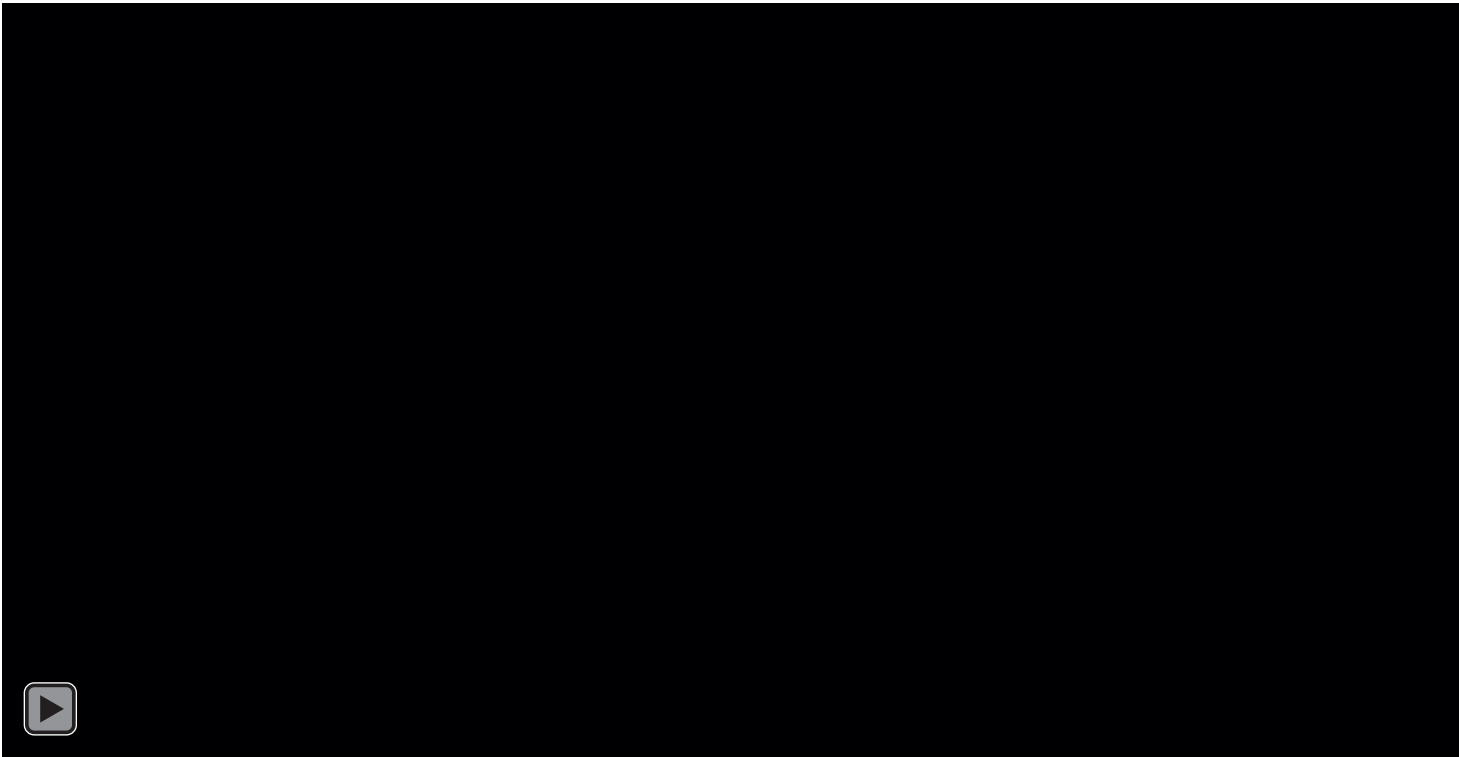
- Identification des essais avec fluctuations (noir)
- La présence des fluctuations augmente l'énergie électrique
- L'apparition des fluctuations ne dépend pas de la durée de l'arc
- Puissance => fluctuations

	Fluctuations	NO
800-160	65	66
	67	68
	69	70
		71
		72
		73
		74
800-240	76	75
	77	79
	78	80
	81	82
	83	
	84	
	85	
	86	
540-250	87	88
	89	92
	90	
	91	

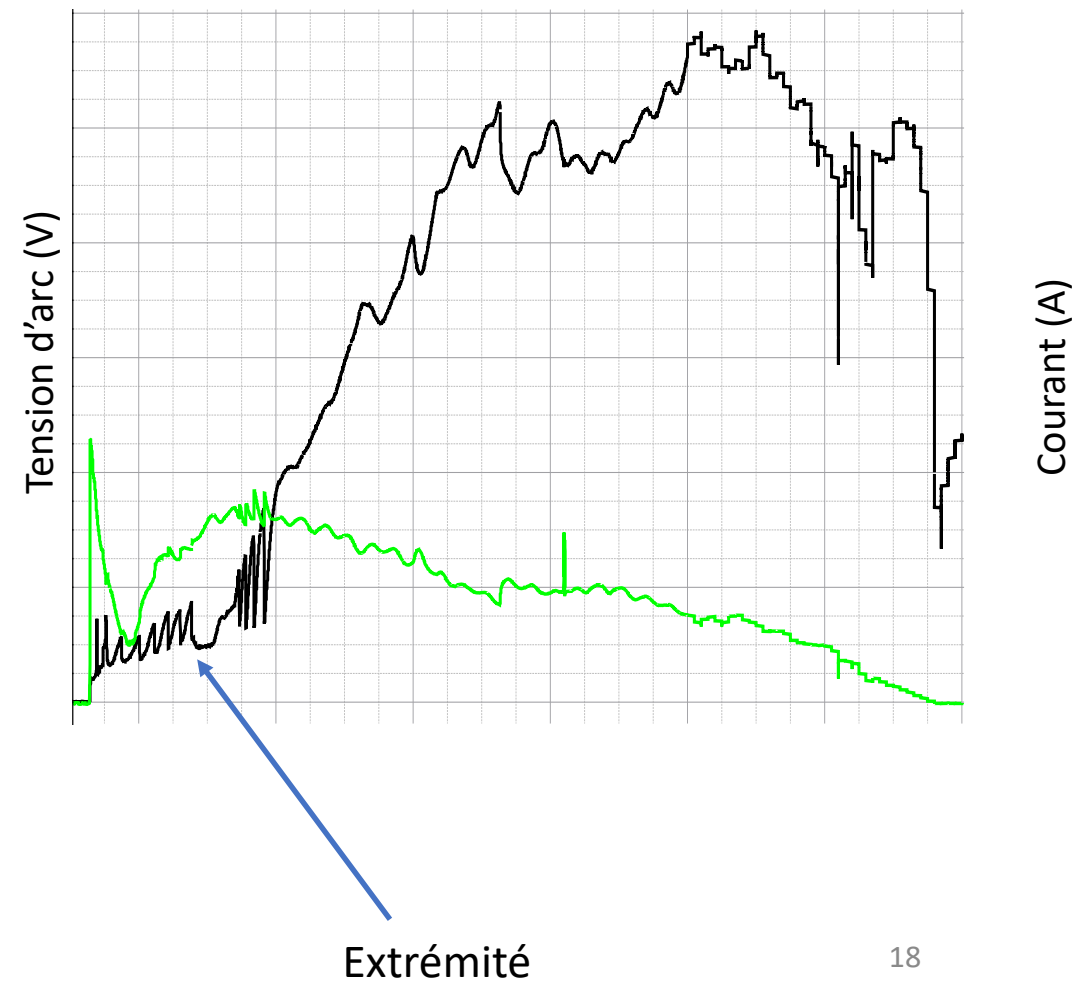
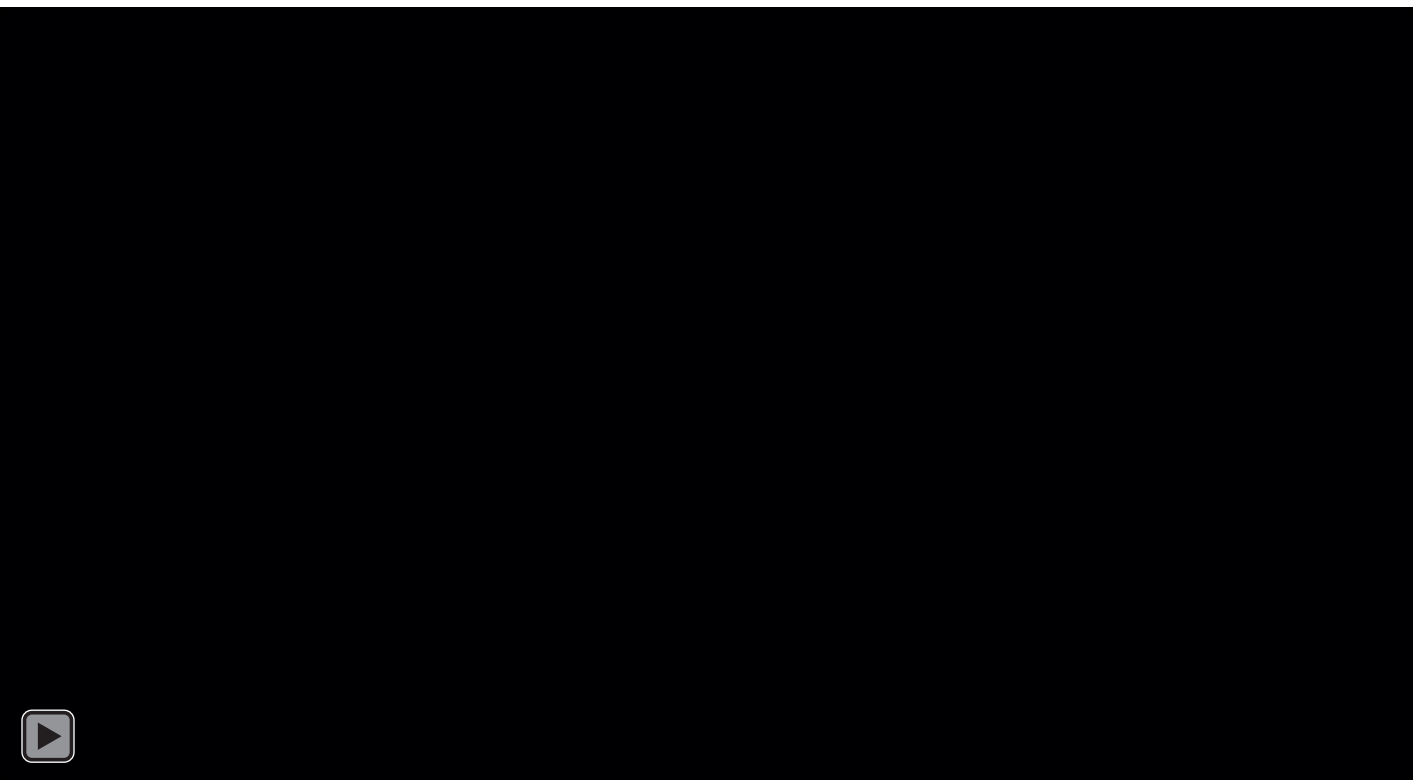
FOD (28, 800 V, 180 A), vidéo déjà vue



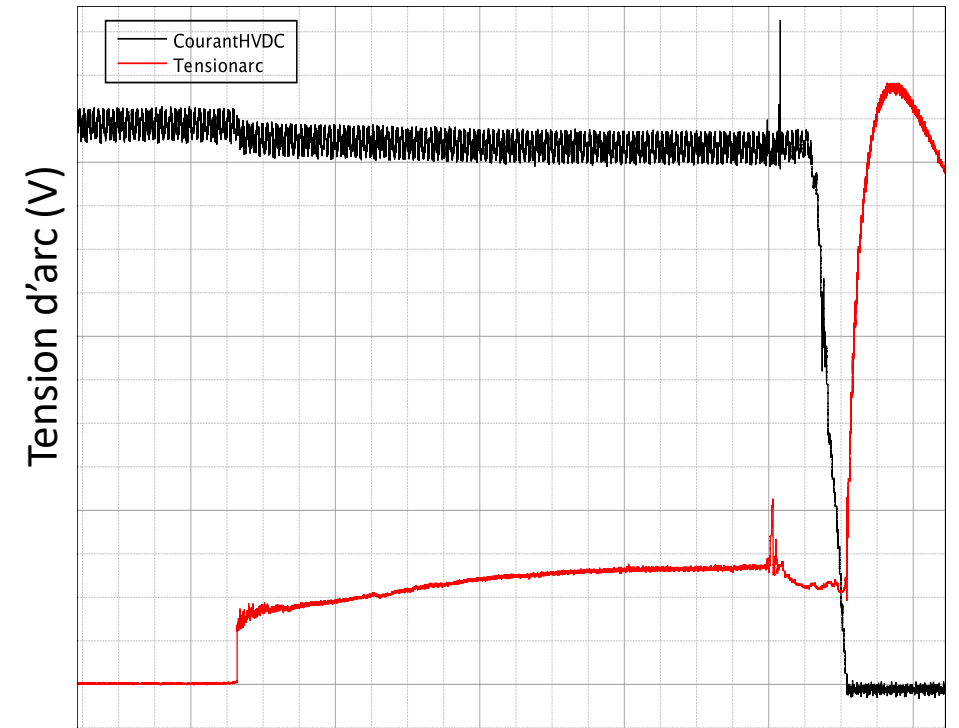
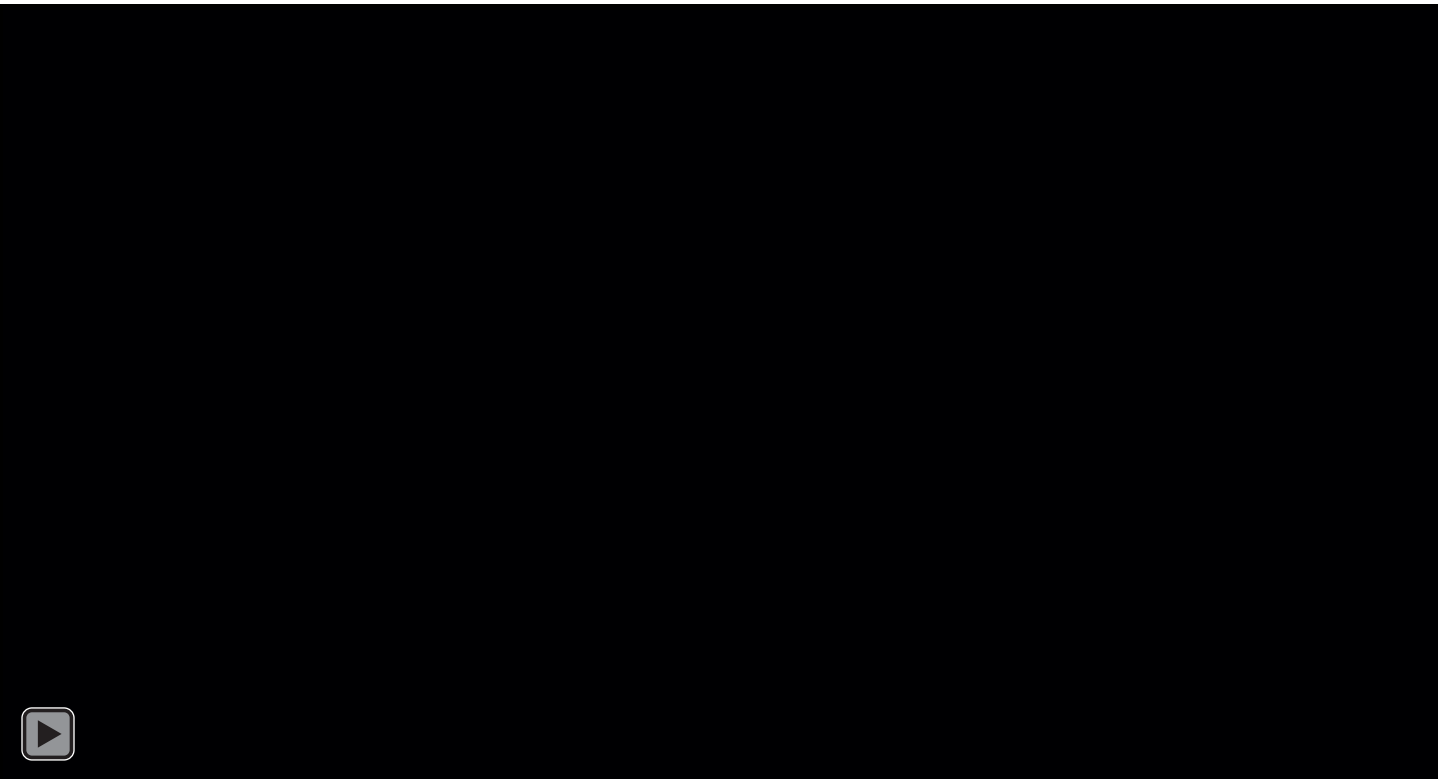
FOD (30, 800 V, 180 A)



FOD (41, 800 V, 180 A) *dezoom*



Ecartement (66, 800 V, 160 A), vidéo déjà vue



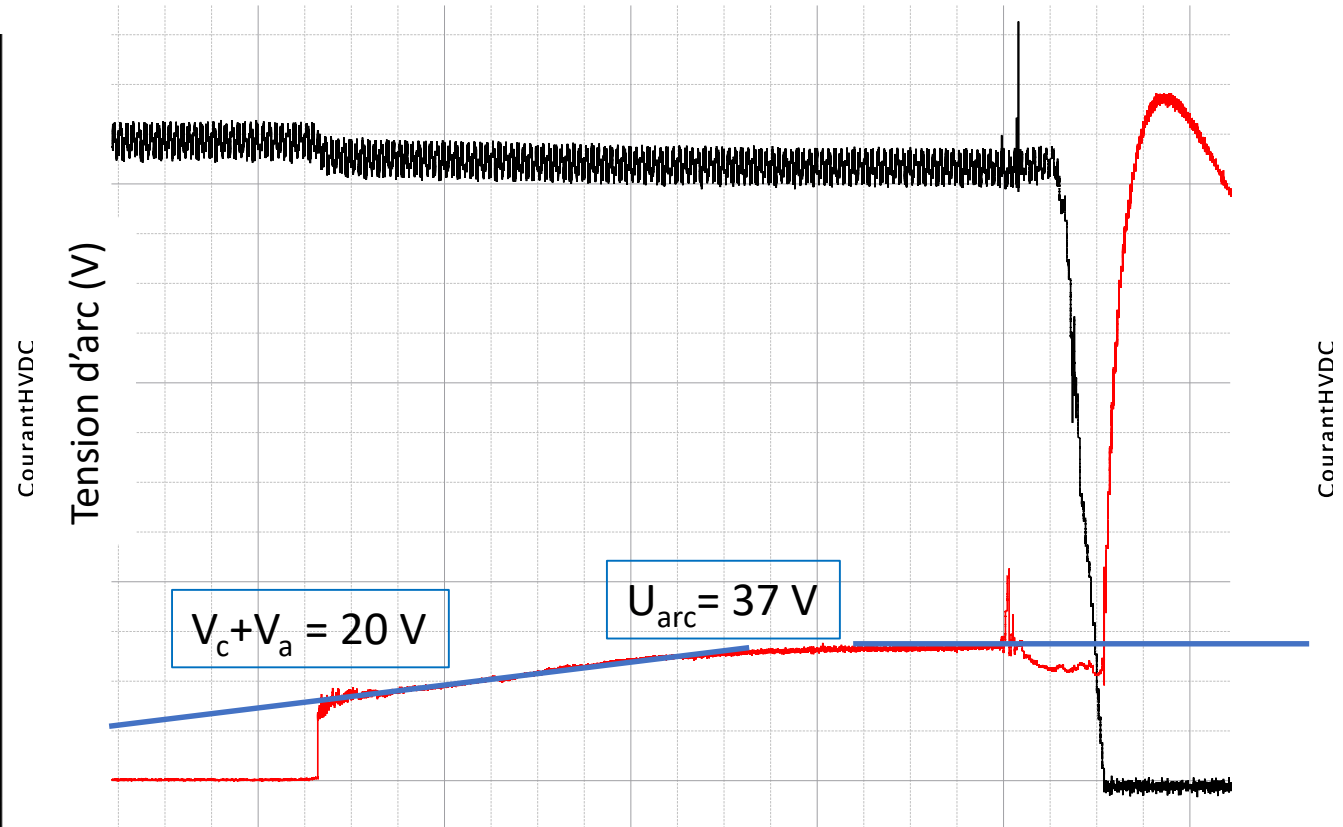
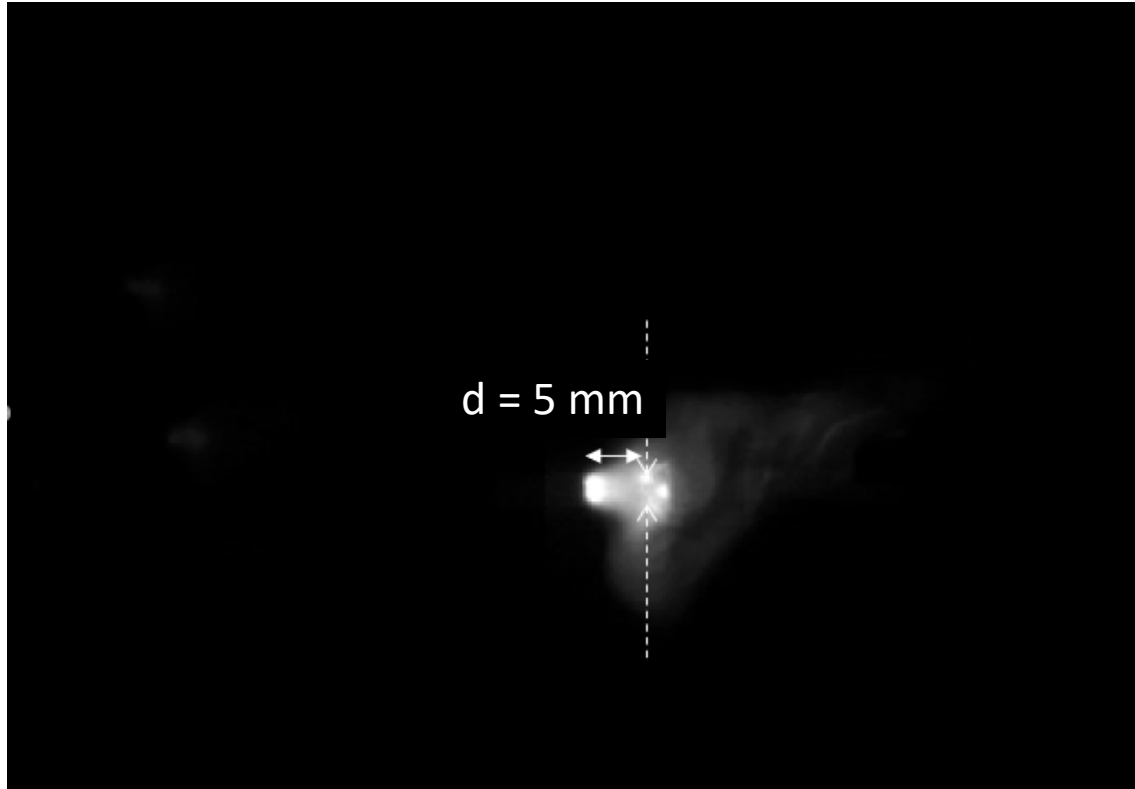
Arc stable

Champ électrique (de 66)

Connaissance du champ électrique

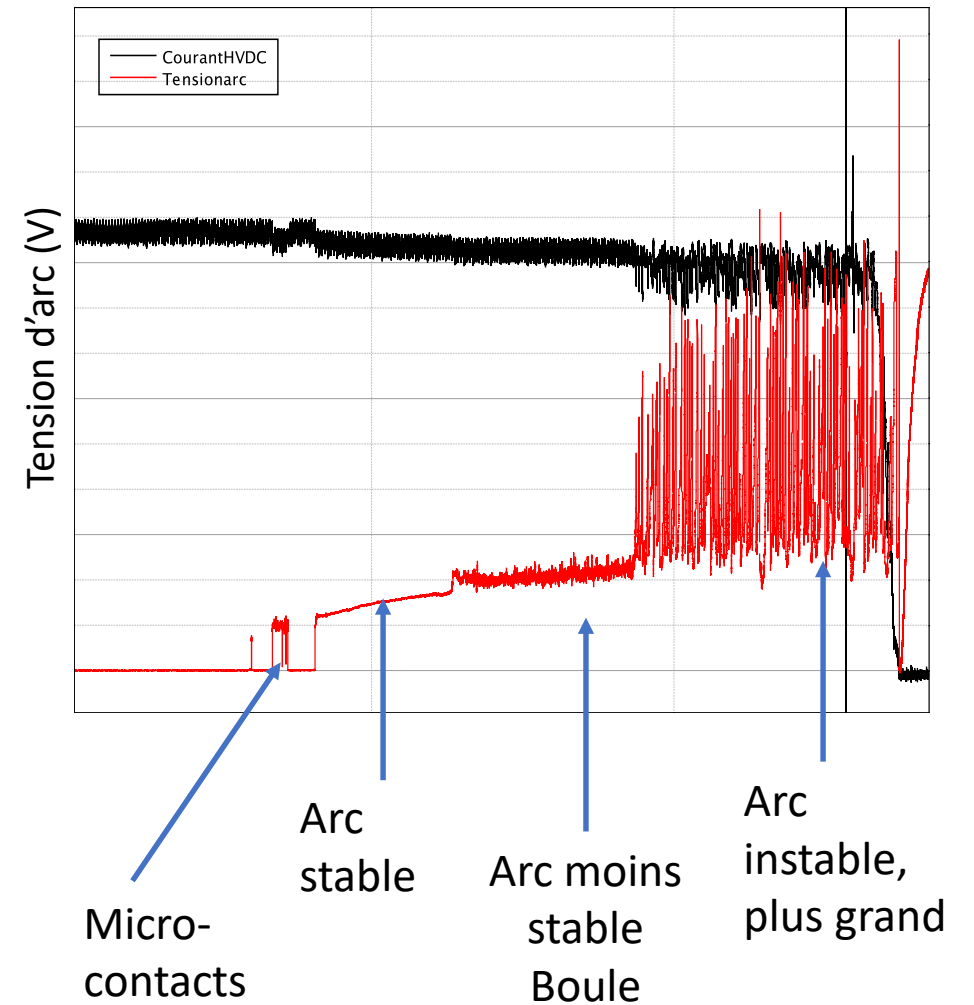
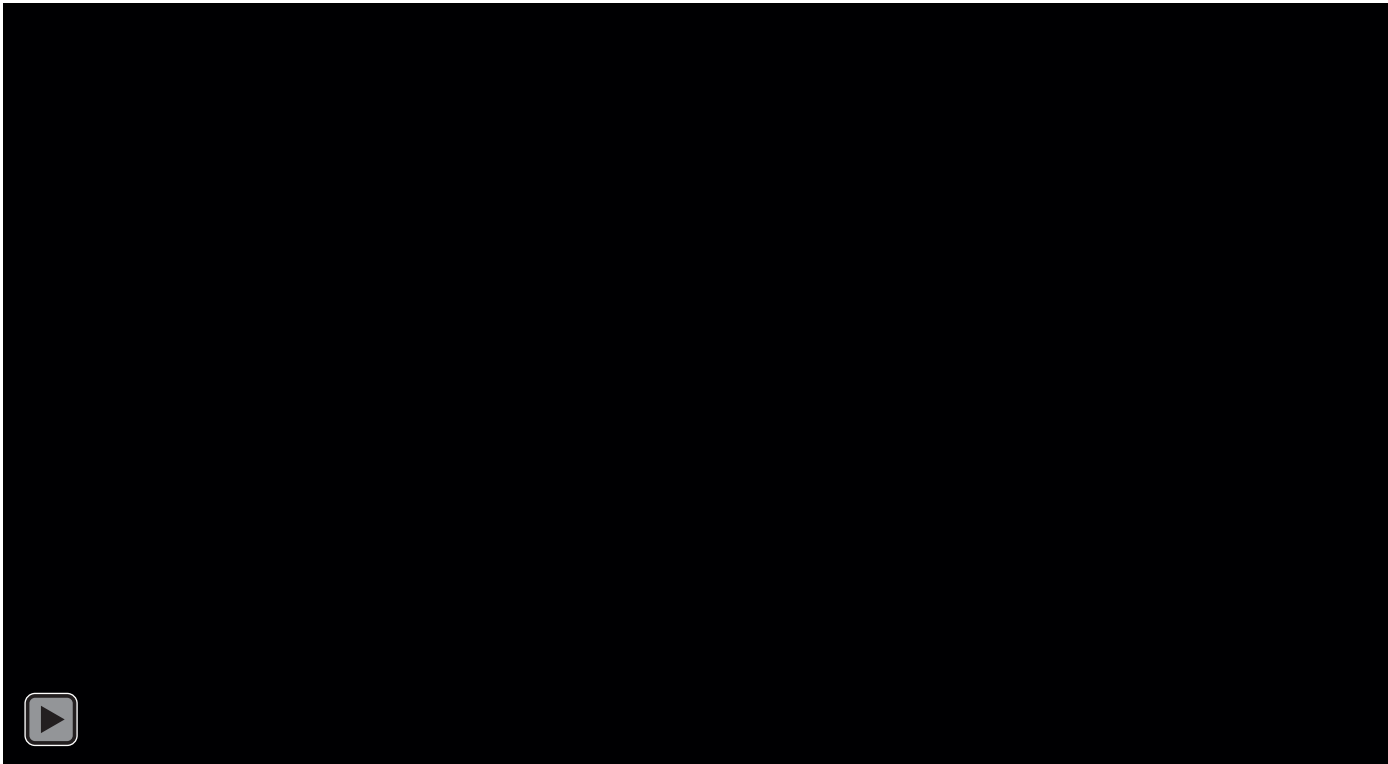
$$U_{arc} = V_C + V_A + d \times E_m$$

➔ $E \sim 3.4 \text{ kV/m} \quad ((37-20)\text{V}/5\text{mm})$

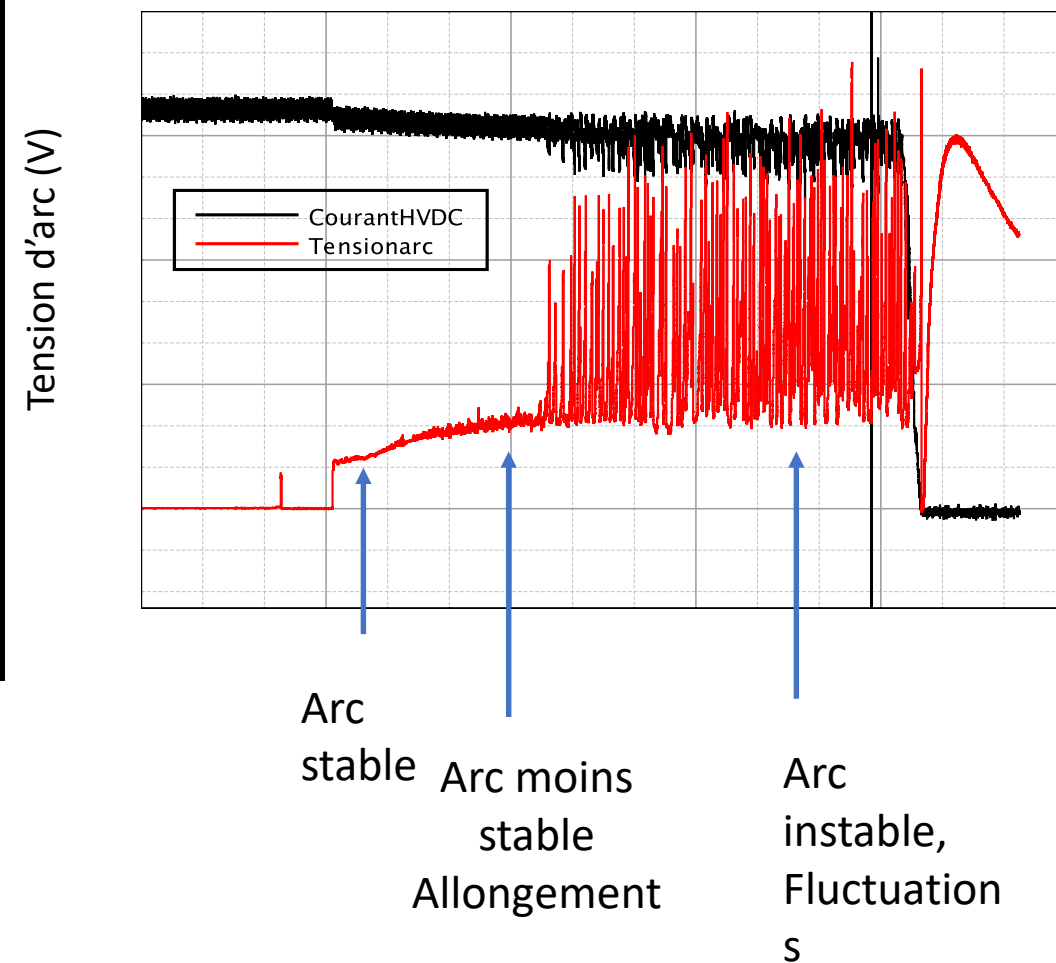
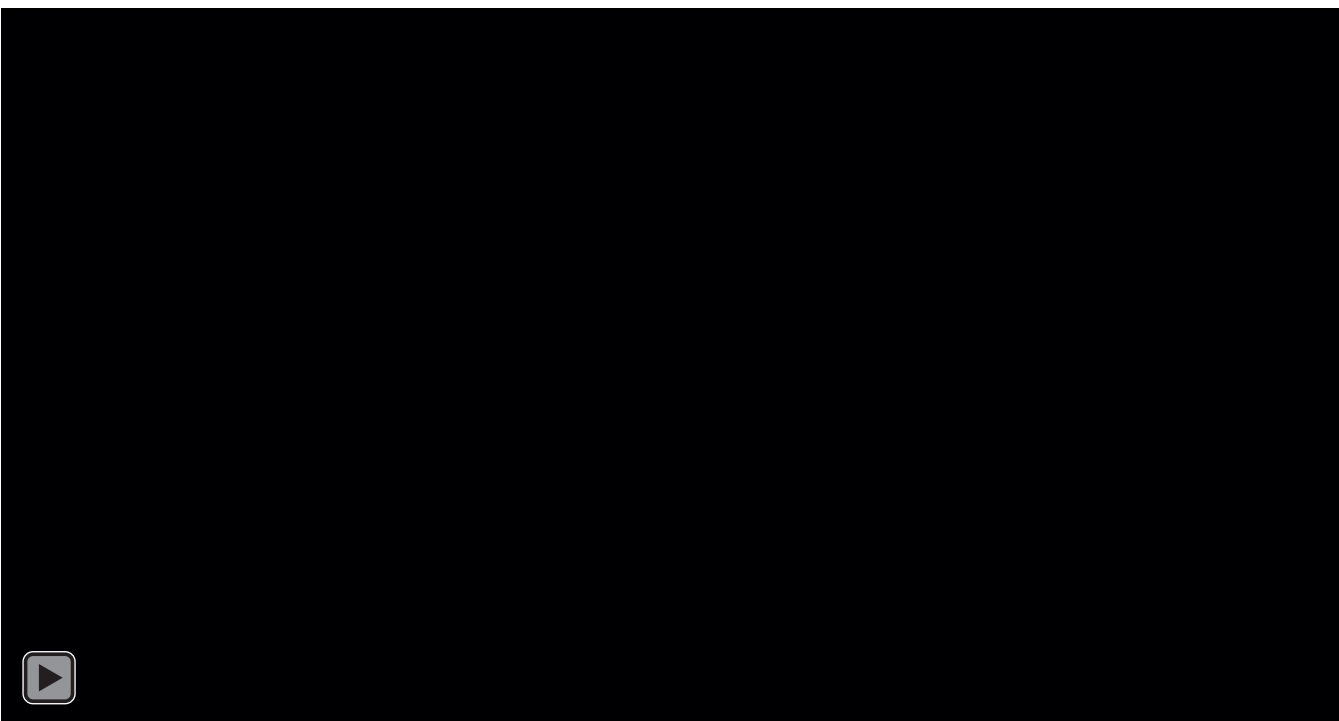


Arc stable

Ecartement (65, 800 V, 160 A) (saturation)



Ecartement (67, 800 V, 160 A) (non saturé)



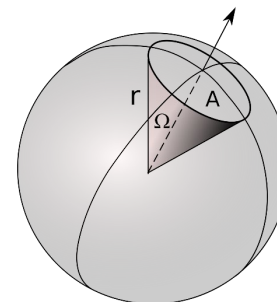
Joulemètres

	Longueur d'onde	100nm	190nm	280nm	315nm	400nm	800nm	1200nm	1400nm	2700nm	2800nm	3000nm	4000nm	20000nm
Nom court	gamme	UVC		UVB	UVA	Visible	IRA		IRB			IRC		
M0	Détecteur nu	détecteur nu												
M1	Filtre F1	détecteur nu												
M2	Filtres F1+F2	20% moins												
M3	Filtres F1+F3	20% moins												
C0 (M0-M1)	nu - F1	UVC*												
C1 (M1-M2)	F1-(F1+F2)	UVA-UVB				un peu (20%)								
C2 (M2-M3)	(F1+F2)-(F1+F3)						visible							

Gamme	Uv _(A+B)	Vis	IR _A	Tot
Calculs	F1-(F1+F2)	(F1+F2)-(F1+F3)	F1+F3	Nu

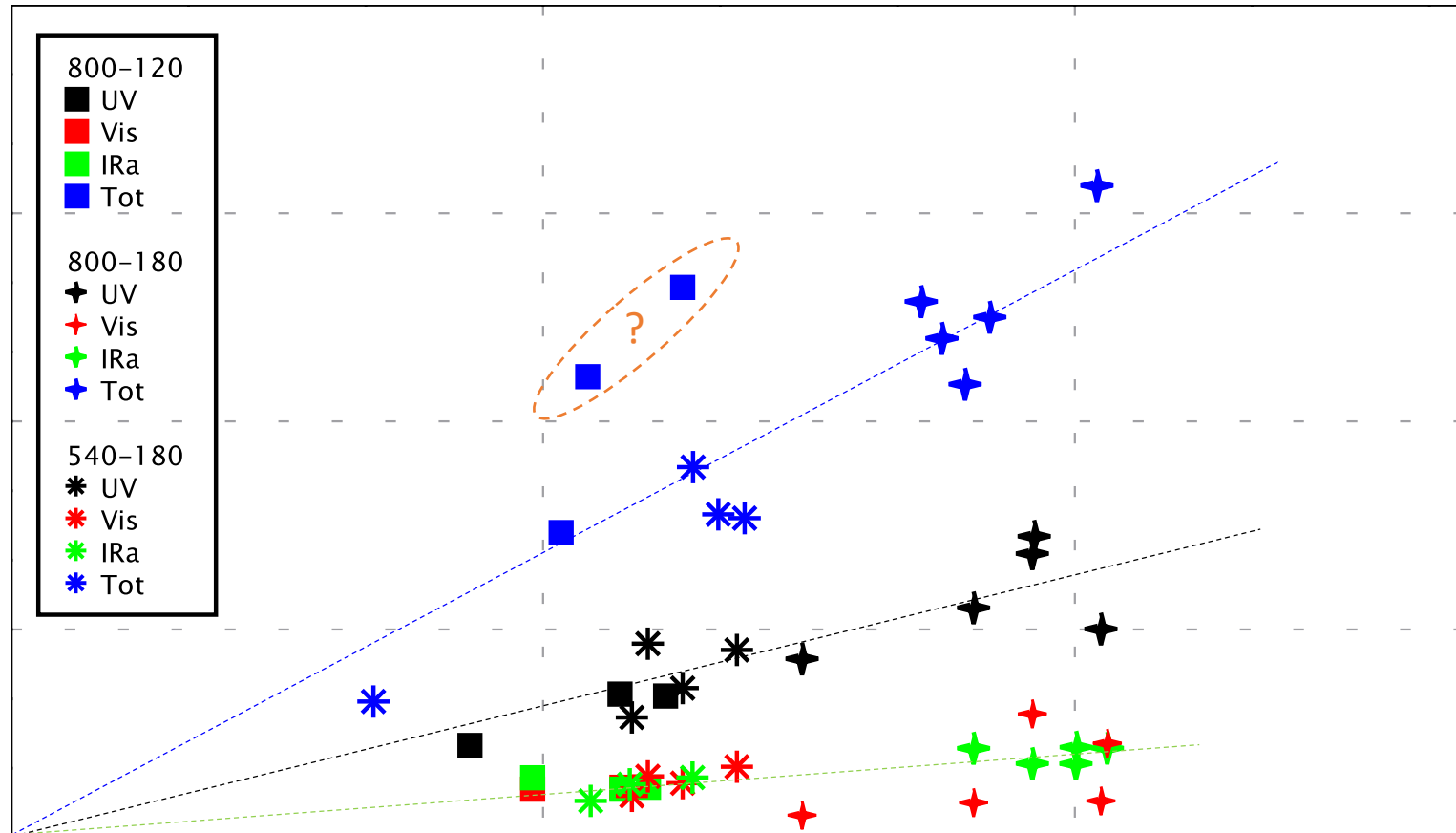
Estimation de l'énergie radiative totale (prise en compte de l'angle solide de collection)

$$E_{tot} = E_{mes} \frac{4\pi}{\Omega} \quad \Omega = \frac{A}{r^2}$$



r (distance arc-capteur) = 79 cm
S (surface capteur) = 113.09 mm²

uv	vis	ir	tot
$F1-(F1+F2)$	$(F1+F2)-(F1+F3)$	$F1+F3$	Nu

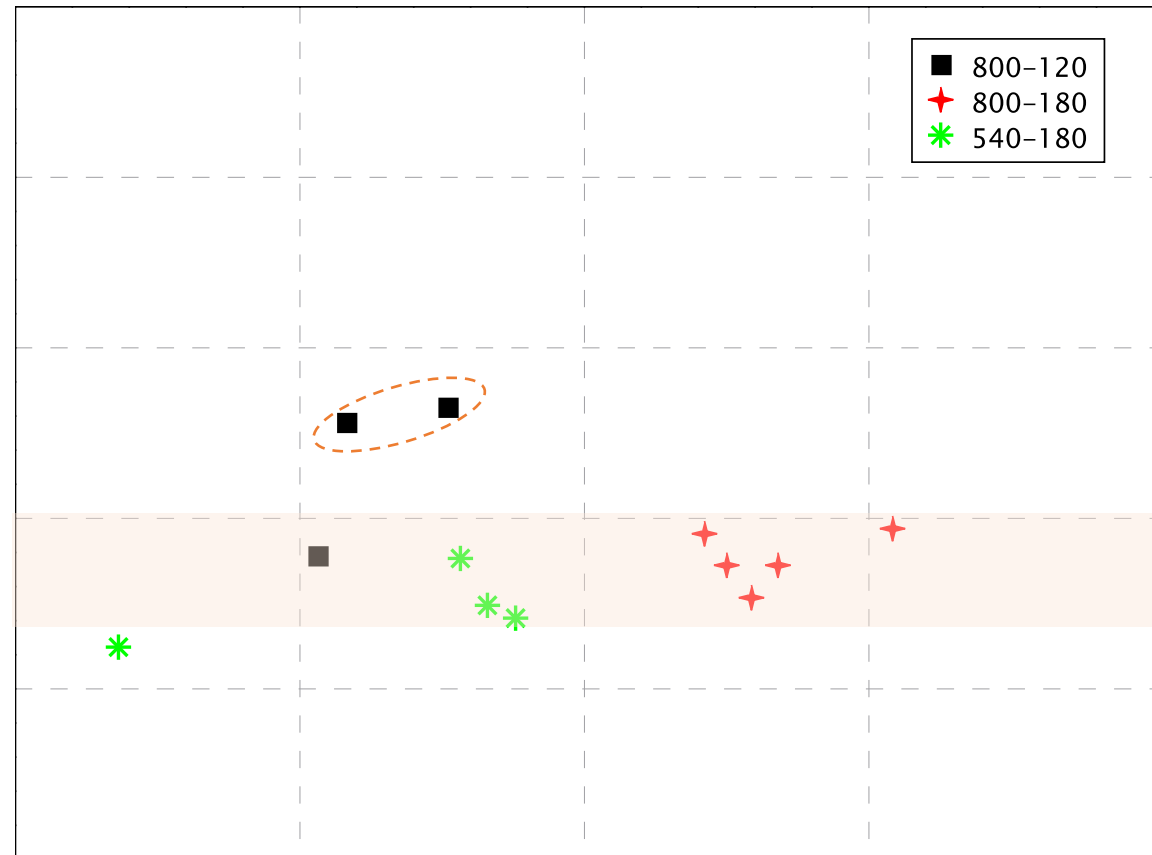


- Pas de corrélation évidente avec les conditions d'alim
- Comportement quasi linéaire
- Visible faible
- $UV > IR_a = Vis$

FOD

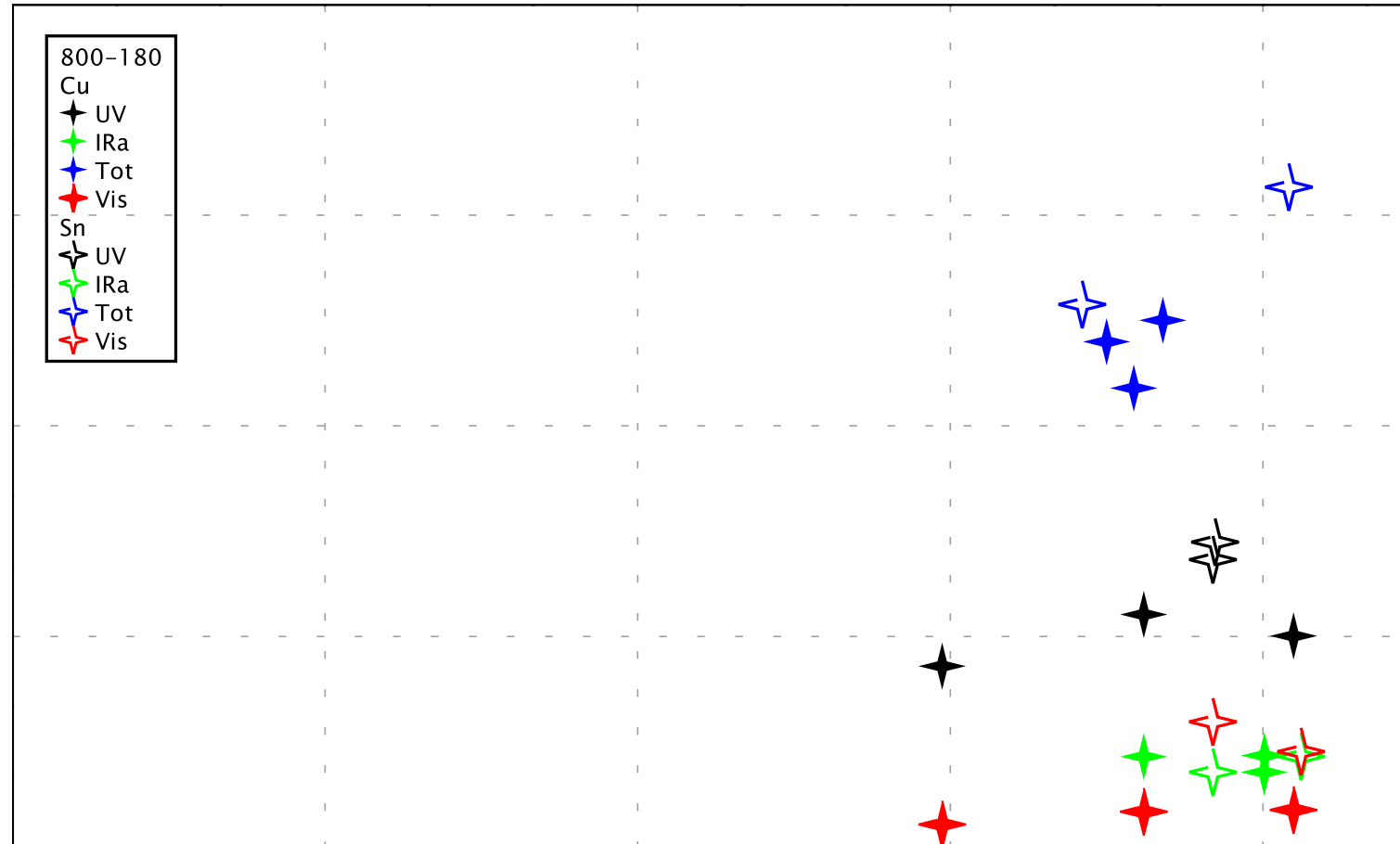
Comparaison avec l'énergie électrique injectée

$$E_{\text{rad}}/E_{\text{elec}} = 30-40\%$$



Influence de la nature du FOD

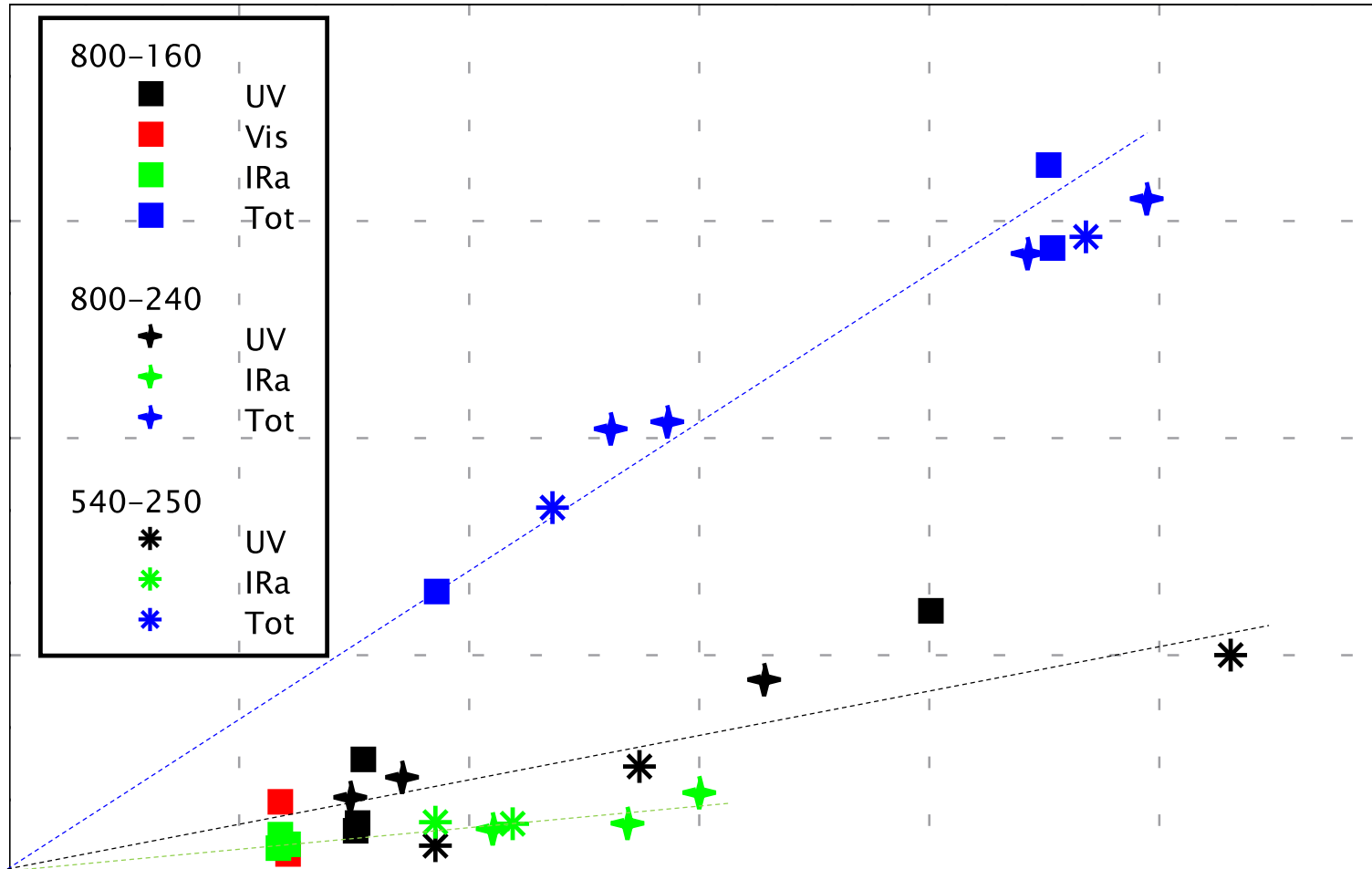
Uv(A+B)	vis	IR _A	tot
F1-(F1+F2)	(F1+F2)- (F1+F3)	F1+F3	Nu



En comparaison, l'influence de la nature du FOD se fait principalement dans le visible et un peu dans l'UV (35% d'écart).

Ecart

uv	vis	ir	tot
$F1-(F1+F2)$	$(F1+F2)-(F1+F3)$	$F1+F3$	Nu



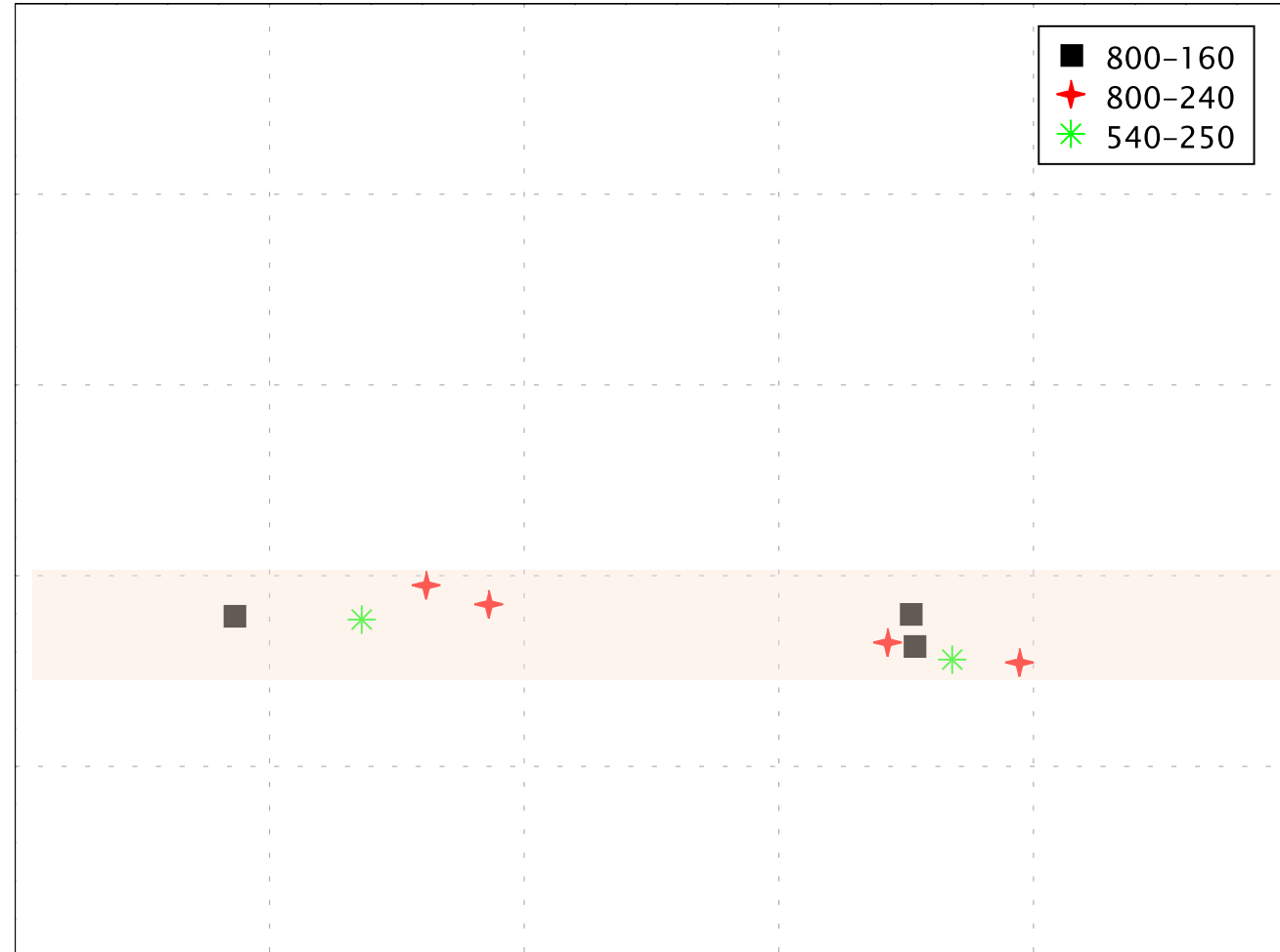
- Mêmes tendances que FOD
- Pas de corrélation avec les conditions d'alimentation
- Comportement quasi linéaire
- $UV > Ir_a = Vis$

Ecartement

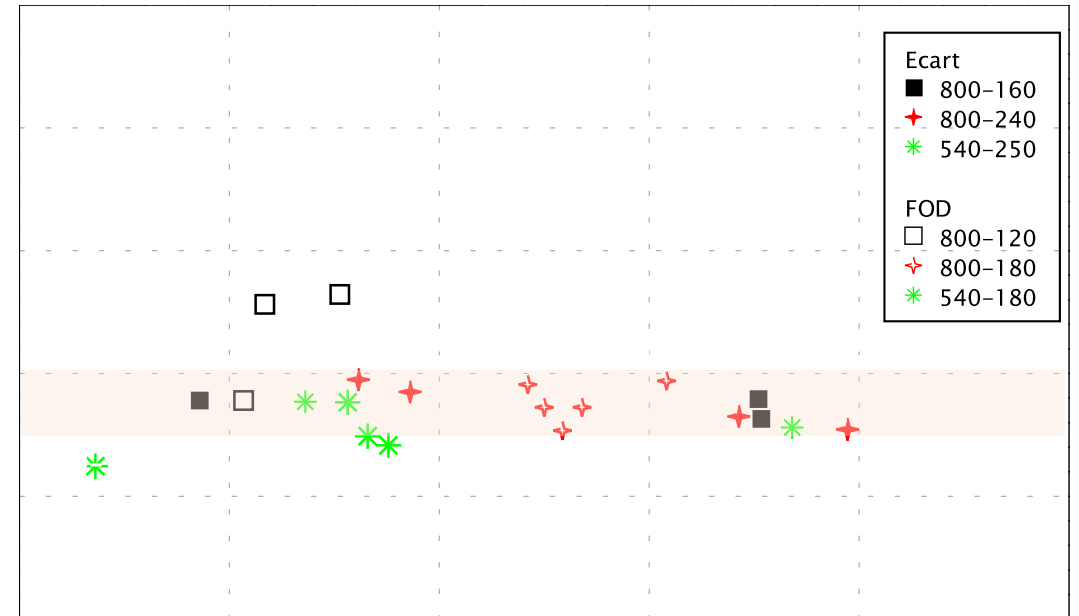
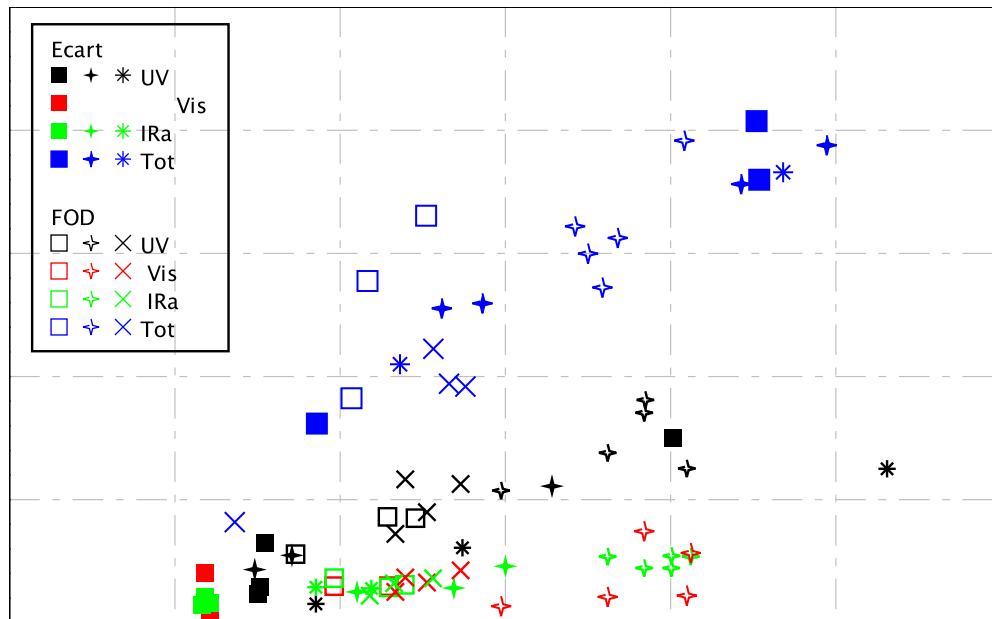
Comparaison avec l'énergie
électrique injectée

$$E_{\text{rad}}/E_{\text{elec}} = 30\text{-}40\%$$

Les résultats ne dépendent pas de la
présence des fluctuations
(si fluctuations => + de rayonnement)



Comparaison FOD - Ecartement



Pas de différence significative entre FOD et Ecartement pour une énergie donnée

Go to OES

Conclusion d'étude

- Comparaison difficile entre les essais
=> comparaison à même énergie (mais U_{arc} , I_{arc} et durée différents)
- FOD :
 - Arc peu stable ;
 - Ré-amorçage
 - Allongement ($\nearrow U_{arc}$)
 - $U_{arc} = [40 - 500] \text{ V}$
 - $I_{arc} = [100-200] \text{ A}$
- Ecartement :
 - Arc stable ;
 - Apparition d'instabilités sur certains essais
 - Energie est pilotée par I alimentation (consigne)
 - $U_{arc} = [20 - 40] \text{ V}$
 - $I_{arc} = I_{consigne}$
- Pas d'influence significative de la nature du FOD
- L'énergie rayonnée représente 30-40% de l'énergie électrique dissipée
- UV majoritaire
- Répartition spectrale : Pas de différence entre FOD et écartement sauf UV_C
- Espèces observées par OES
- Arc par écartement plus chaud que FOD (raie ionique)

FOD	Al, Ag, Cu, Ni(?)		H(?)
Ecart	Al, Ag, Cu(?)	Al ⁺ , Ag ⁺ (?)	H(?), N(?)

Communications, bilan financier, perspectives

- Présentation par Cathy Rond et discussions à Saftec. Le 11/03 entre 14h-17h45. Nous étions 13 participants.
- Présentation à l'AAE (le 20/03)
- Communication à la conférence Int. Conf. On Laser-Plasma-Radiation (Juin 2024). Investigation of electric arcs ignited by FOD for high power aeronautic conditions (***Acknowledgement: The authors thank the French "Association Arc Electrique" for partial funding of this work.***)
- Soumission d'un article souhaitée (avec le remerciement à l'AAE bien sûr)
- Nouvelles manip (?) => besoins Safran?
 - Refaire écartement avec durée contrôlée (*i.e. : ouverture et fermeture contrôlées*) → NON
 - OES avec résolution spatiale, temporelle, spectrale (*très périlleuse*) → NON

- Bilan financier :

Virement par l'AAE	7104	
TVA (20%)		1184
Frais de gestion (11%)		651.2
Disponible initiale	5268.8	
Frais de Mission DH à Niort (avec voiture)		1023.95
Frais de Mission HR à Niort (sans voiture)		510.14
Reste (maintenant)	3734.71	
Dépenses initialement prévus : filtres interférentiels, fibre optique, mission (à Niort, à Toulouse pour des réunions).		

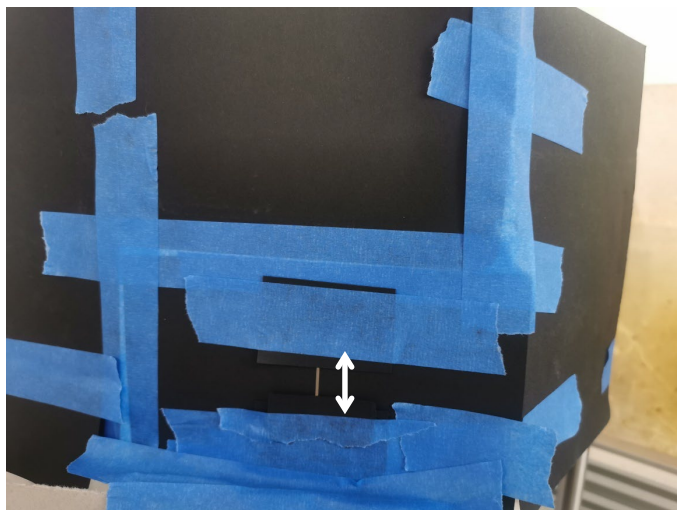
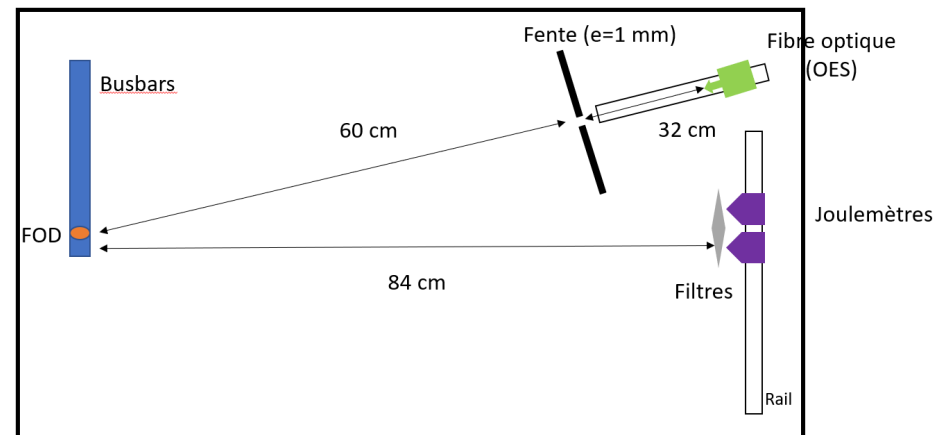
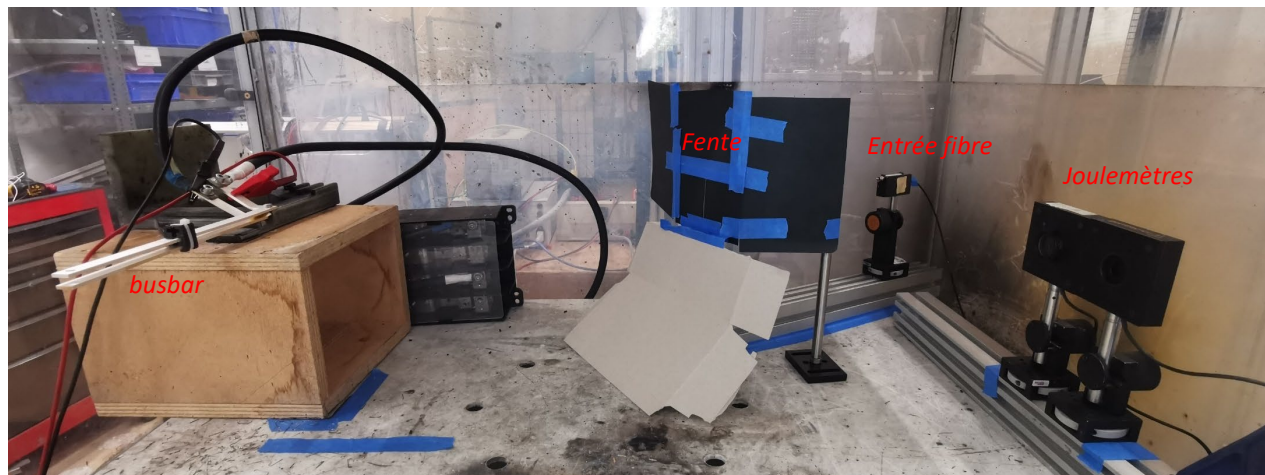
Projet Court AAE 2023/2024

Caractérisation expérimentale d'un arc pour des conditions aéronautiques haute puissance

Merci pour votre attention

Merci pour l'aide accordée

OES (Optical Emission Spectroscopy) – avec 3^{eme} montage

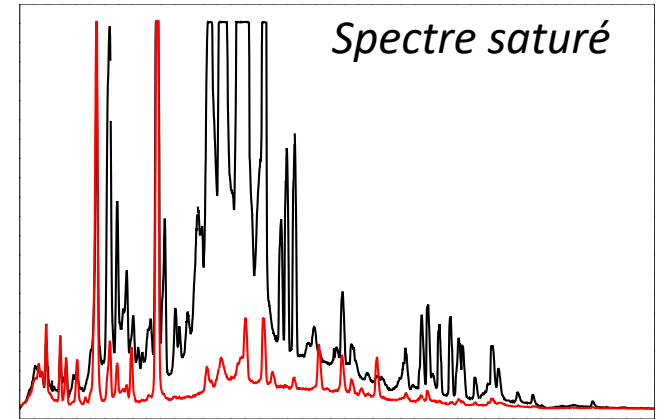


Fente 1 x 20 mm



OES (Pas de résolution spatio-temporelle)

- Identification des raies
- Comparaison FOD-Ecartement
- Peut-on avoir une idée sur la température

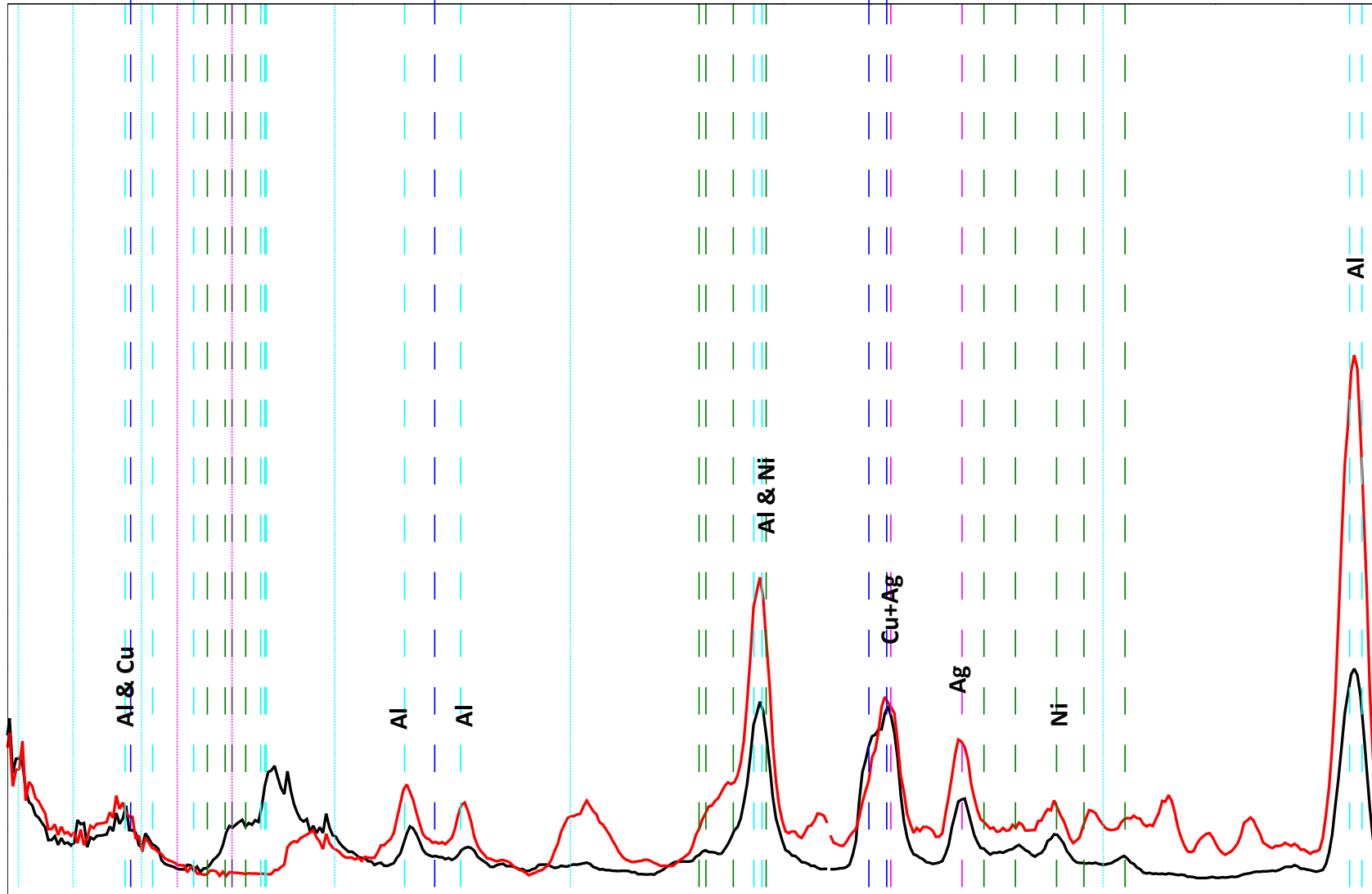


Spectres non saturés

	FOD	Ecart
800-lmax	33	79
	38	81
	40	84
	41	86
	42	
800-lmin	57	
	63	
540-250	48	88
	50	
	54	

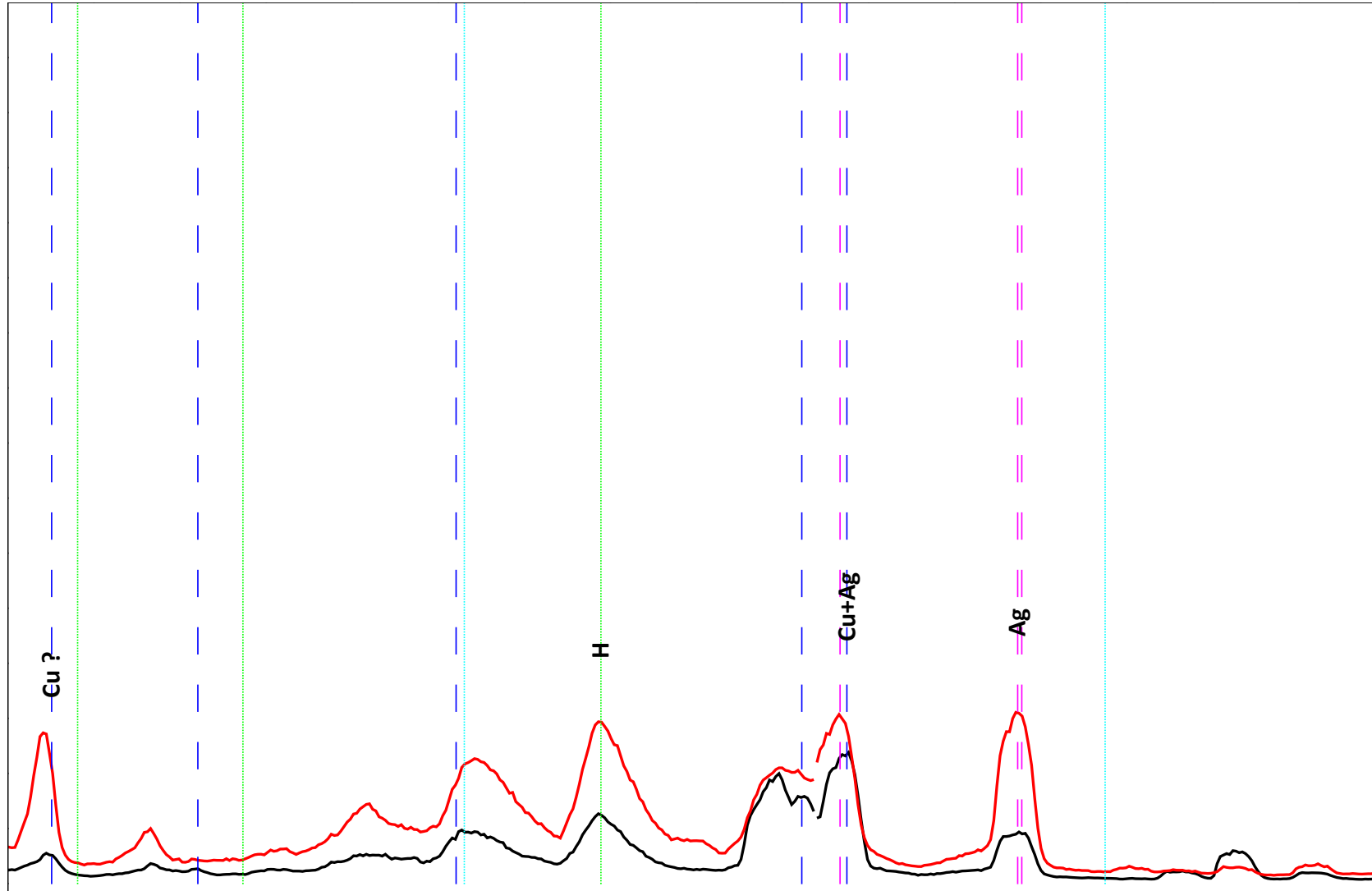
FOD 200-400 nm

- Par comparaison avec le NIST
- Par gamme de longueur d'onde



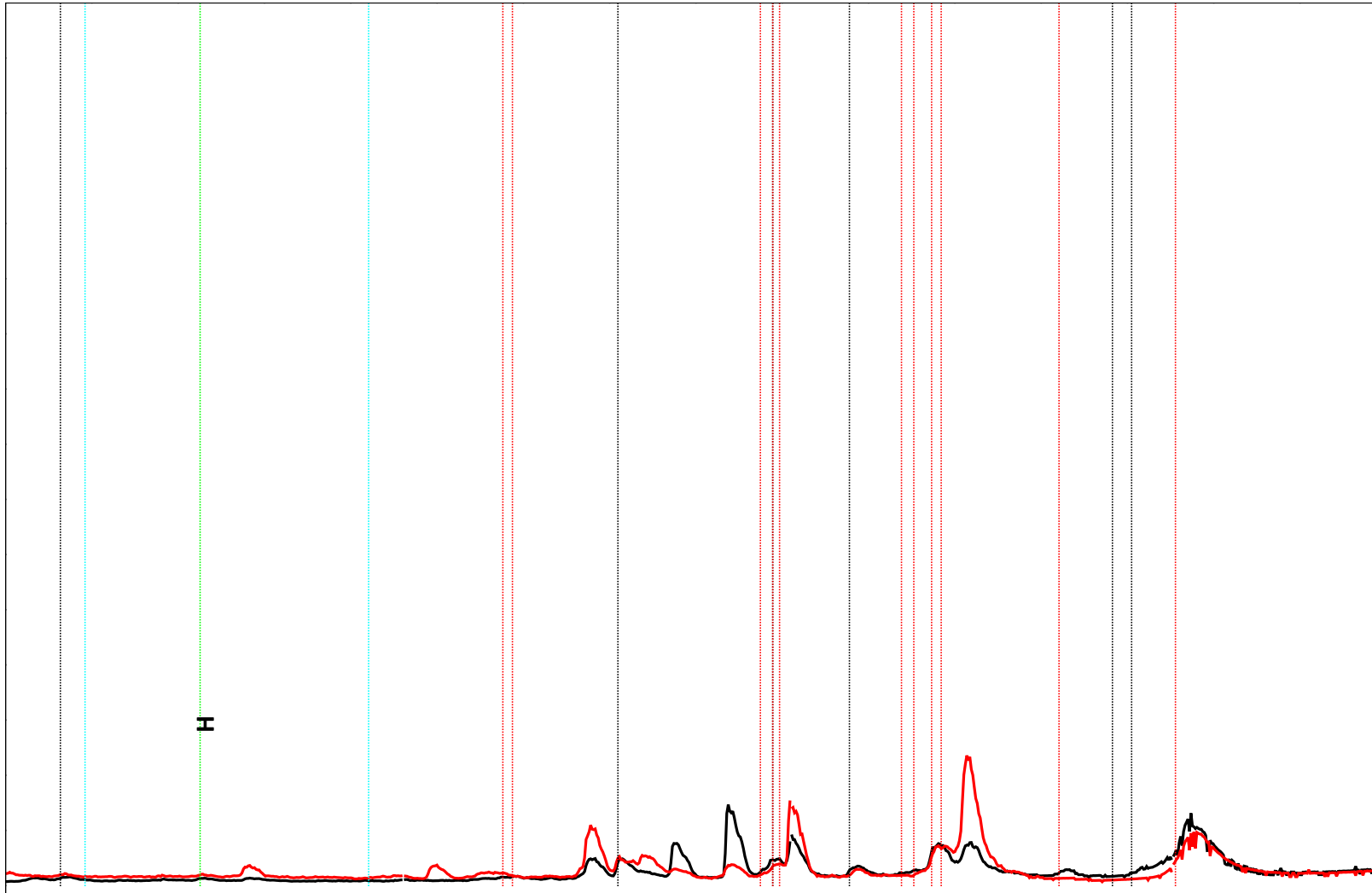
FOD 400-600 nm

- Par comparaison avec le NIST
- Par gamme de longueur d'onde

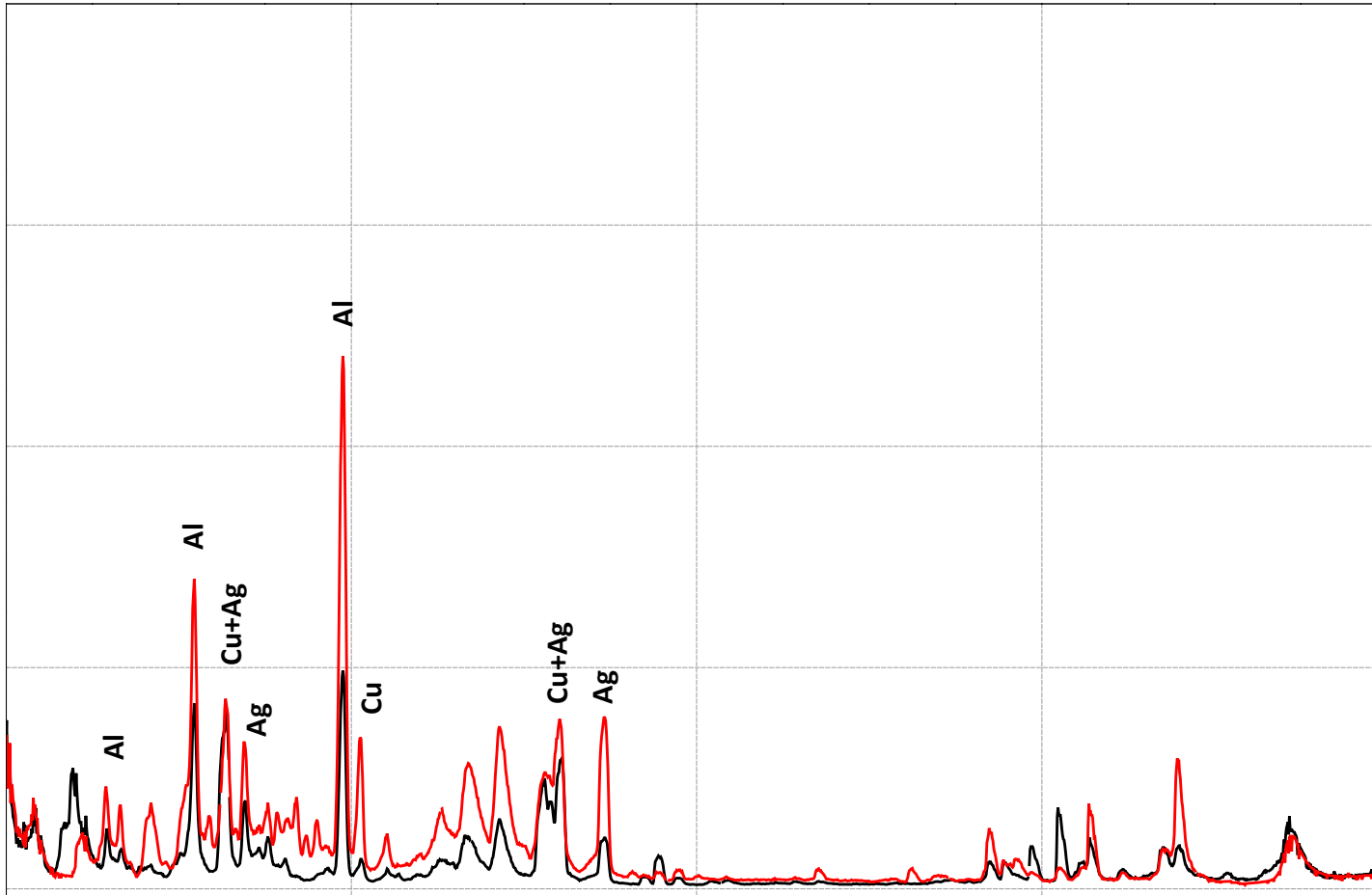


FOD 600-1000 nm

- Par comparaison avec le NIST
- Par gamme de longueur d'onde



FOD - résumé



- **Espèces identifiées :**

Ag

Al

Cu

Ni ?

H ? (beta seulement)

Pas ion métallique

- **Espèces non détectées**

C, O, Fe, C₂, N₂, N₂⁺

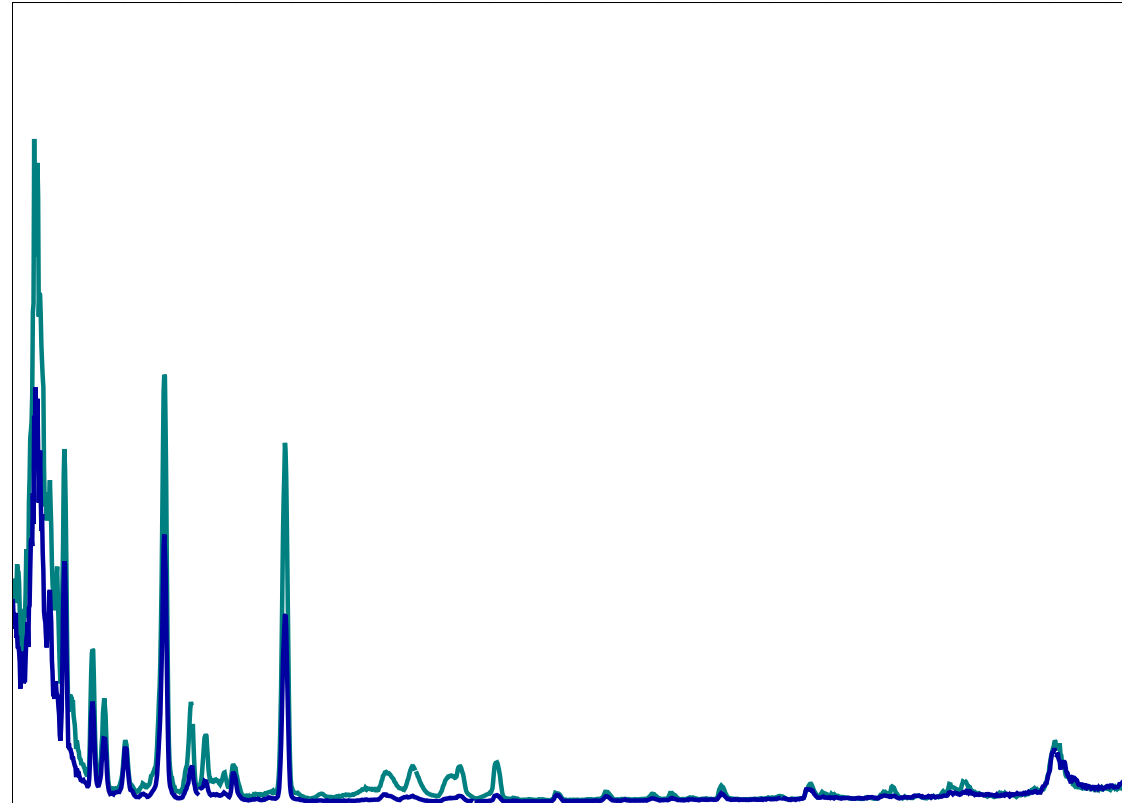
- De nombreuses raies non identifiées

Ecartement

Les spectres sont beaucoup plus reproductibles d'un essai à l'autre

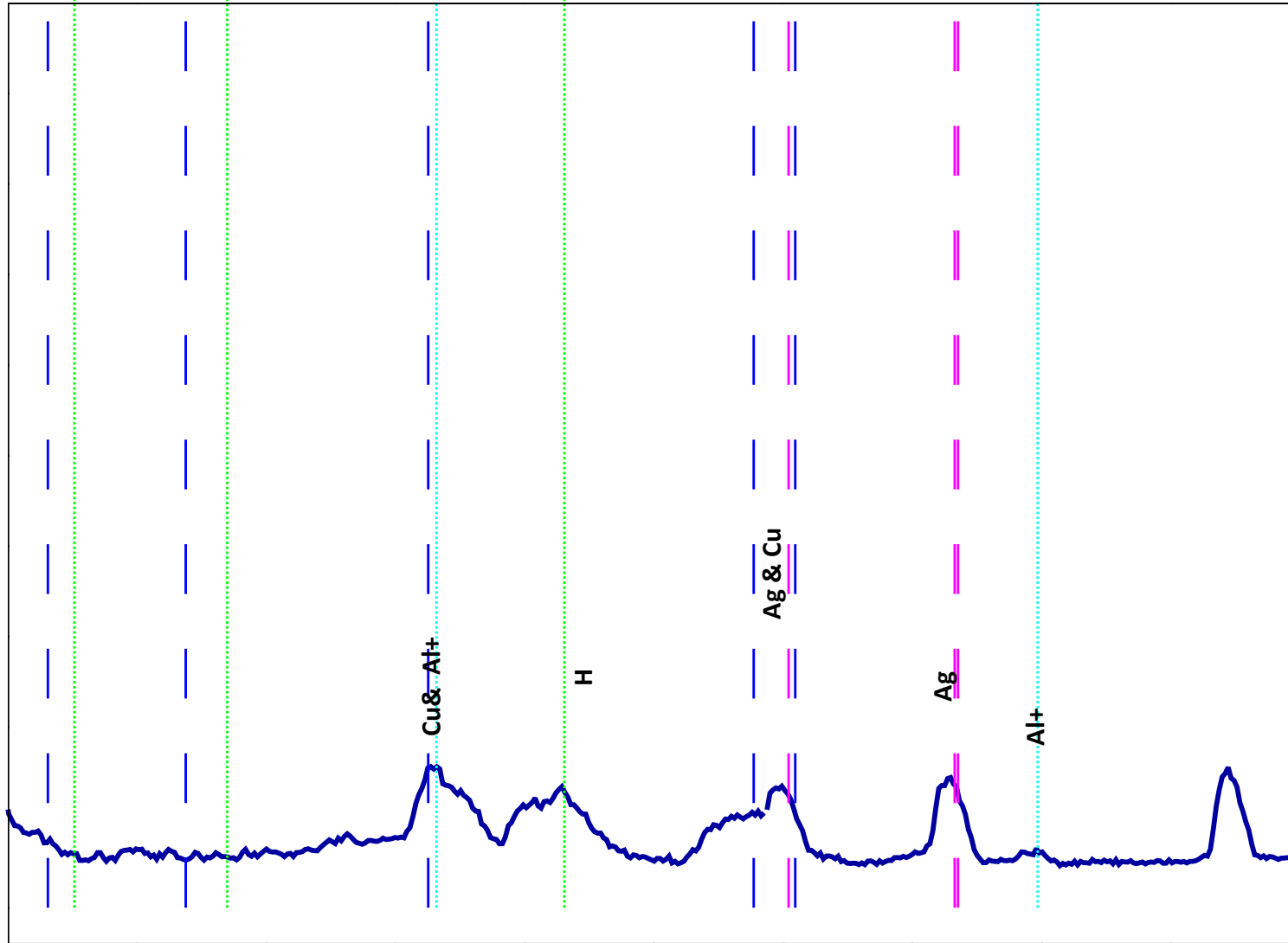
Essai 84 = 2860 J

Essai 86 = 4000 J



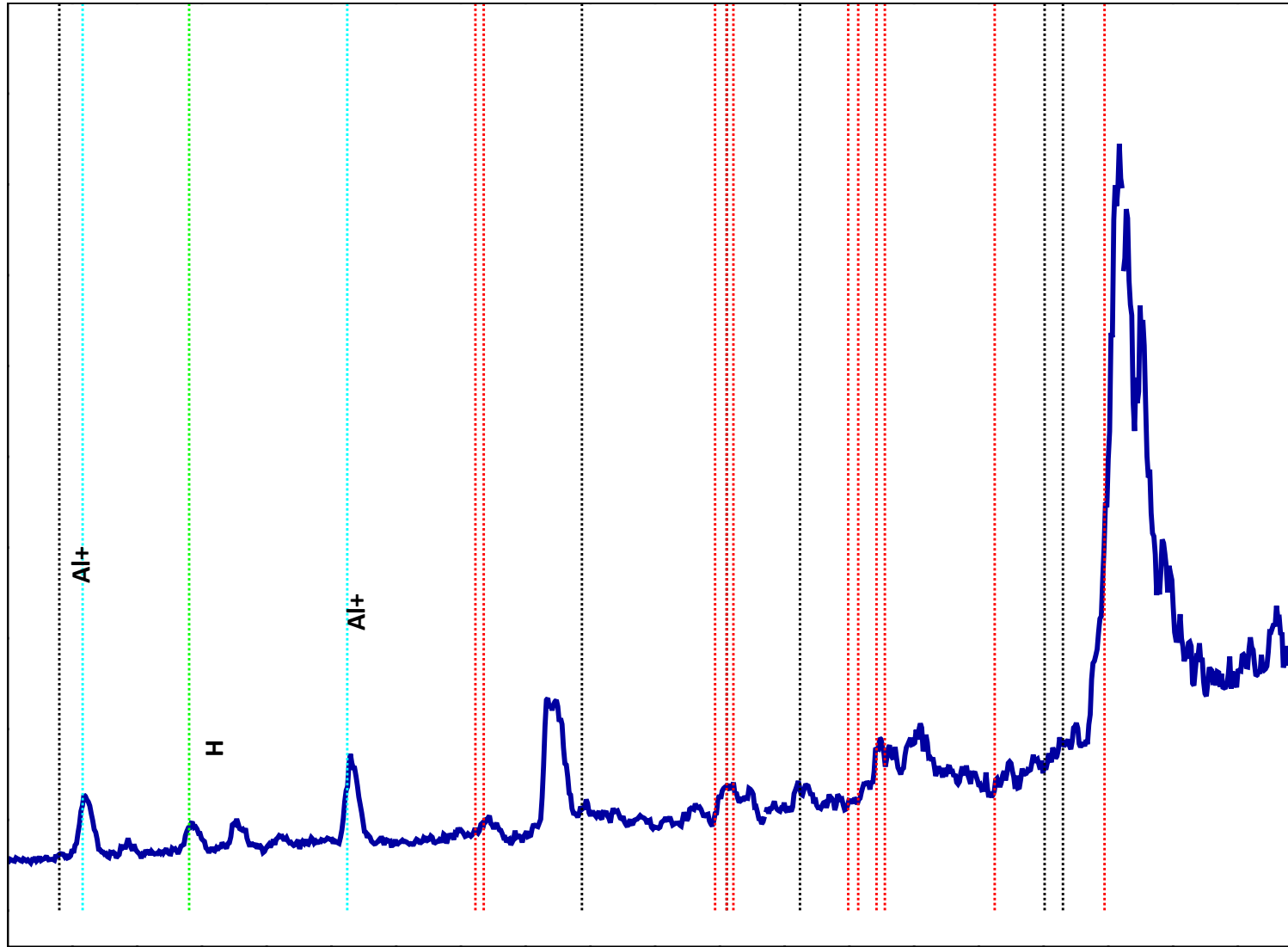
Ecart 400-600 nm

- Par comparaison avec le NIST
- Par gamme de longueur d'onde



Ecart 600-1000 nm

- Par comparaison avec le NIST
- Par gamme de longueur d'onde



Ecartement - résumé

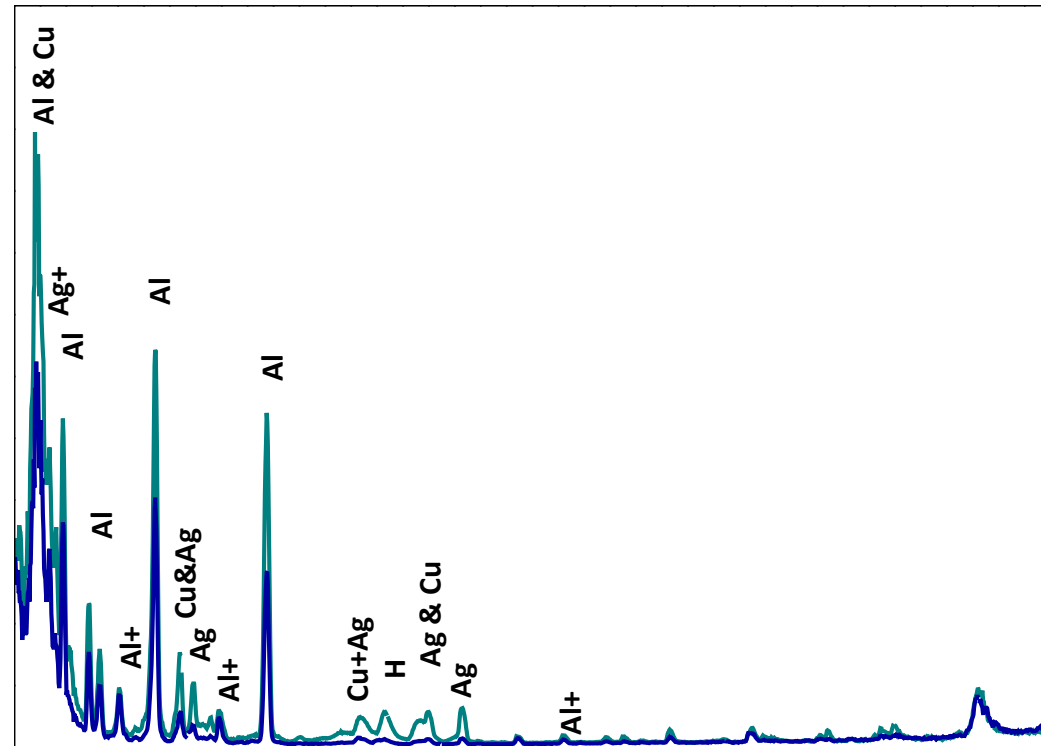
Espèces identifiées :

- Espèce métalliques : Al, Ag, Cu(?)
- Ions métalliques : Al⁺, Ag⁺ (?)
- Espèces de l'air : H(?), N(?)

- Espèces non détectées

C, O, Fe, C₂, N₂, N₂⁺

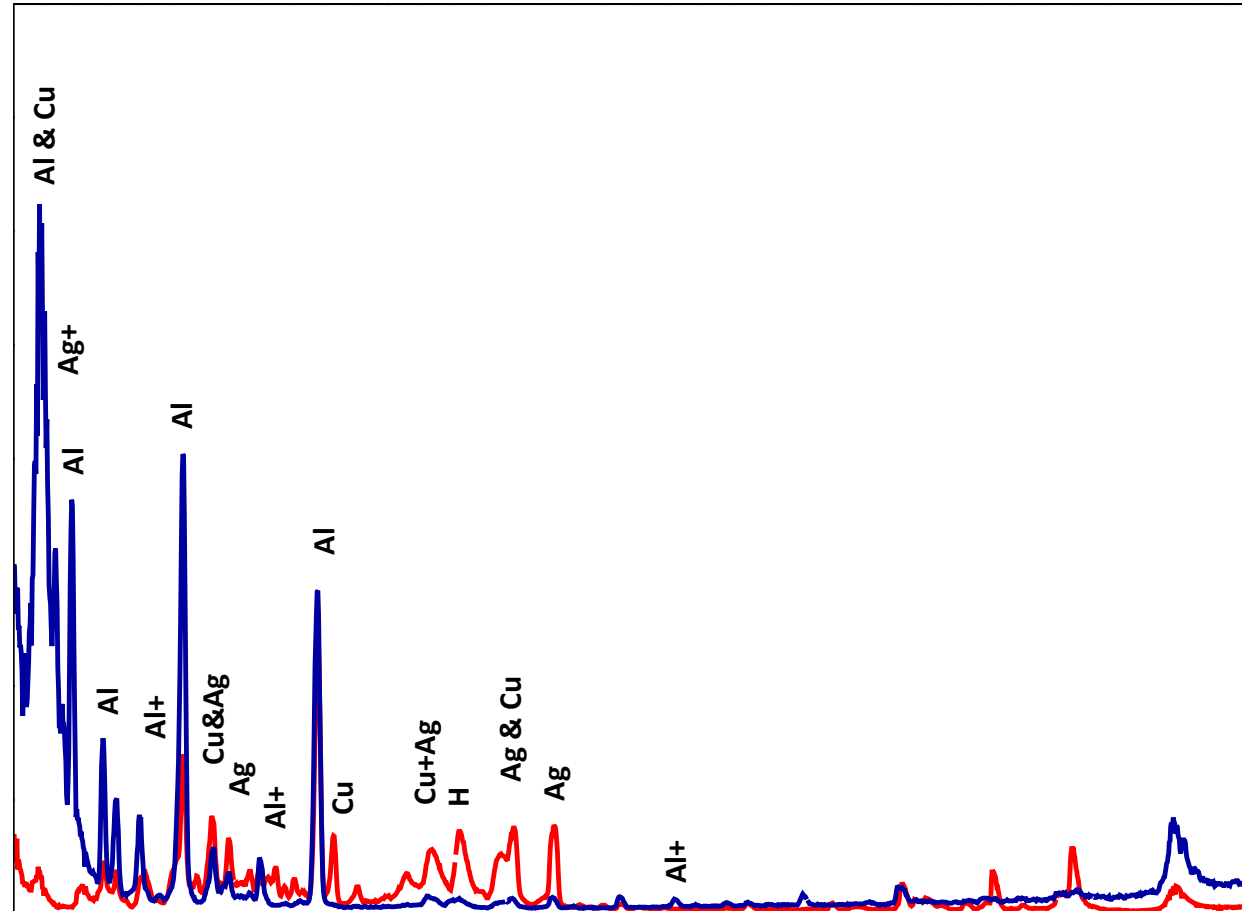
- De nombreuses raies non identifiées



Comparaison FOD-ECARTEMENT

- Même énergie ≈ 4000 J
- Visible assez similaire
- UV_c écart $> UV_c$ FOD
- IR légèrement différent

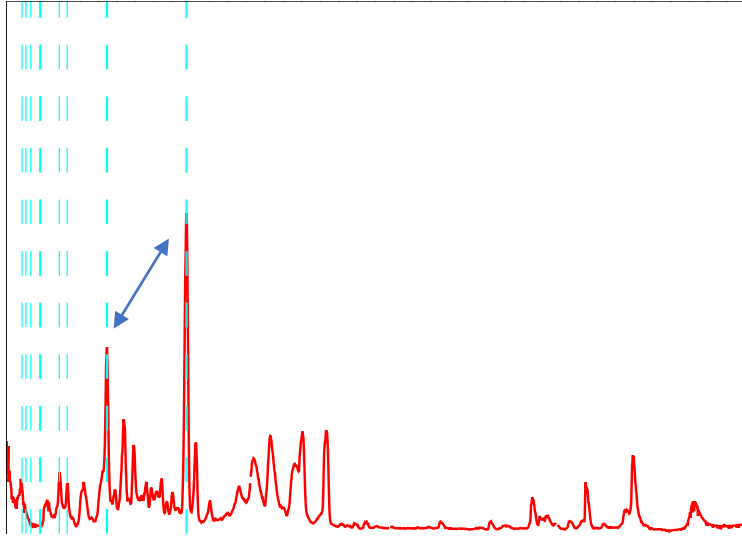
FOD	Ecart
Al	Al
Ag	Ag
Cu	Cu (?)
Ni (?)	
	Al+
	Ag+ (?)
H (?)	H (?)
	N (?)



- Arc par écartement semble plus chaud
- Energie ionisation Al (5,985 eV) et Ag (7,576 eV)

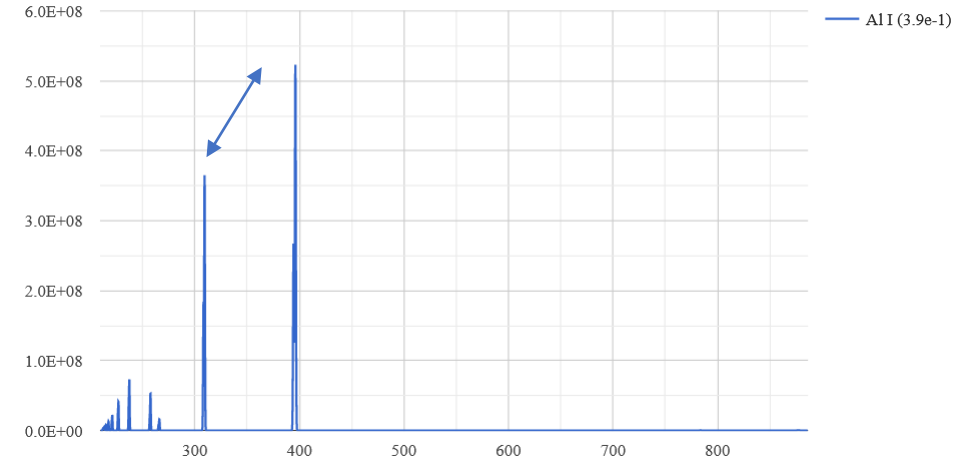
Discussion sur T Raies Al

FOD

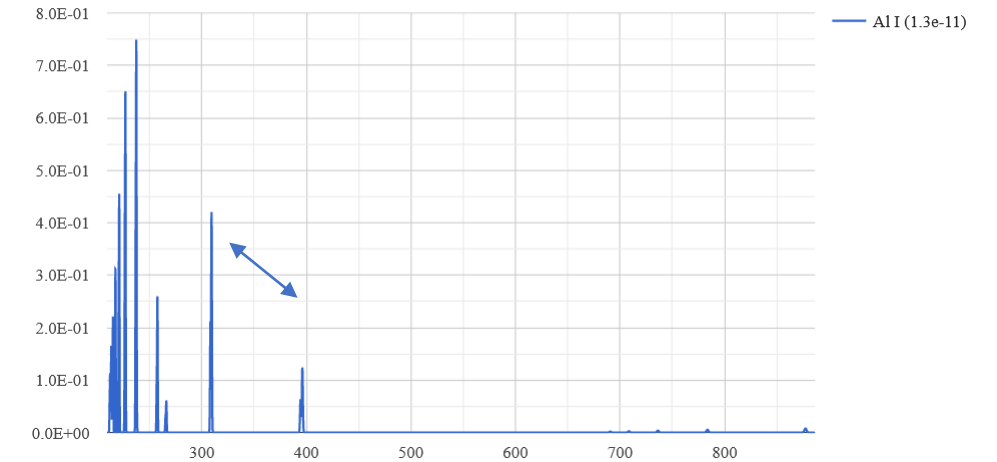


Rapport de raie
=> 0,5 eV

Saha/LTE Spectrum for mixture H:10%+O:10%+Al:40%+Cu:20%+Ag:20%
 $T_e = 0.5 \text{ eV}$, $N_e = 1.0e+17 \text{ cm}^{-3}$, Resolution = 600. Total of 1182 lines; ion abundances are given in parent

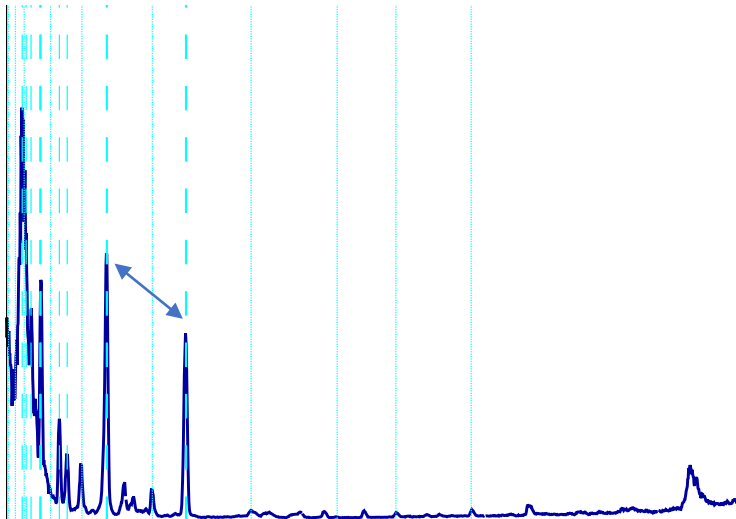


Saha/LTE Spectrum for mixture H:10%+O:10%+Al:40%+Cu:20%+Ag:20%
 $T_e = 5 \text{ eV}$, $N_e = 1.0e+17 \text{ cm}^{-3}$, Resolution = 600. Total of 1182 lines; ion abundances are given in parent



Rapport de raie
=> 4-5 eV

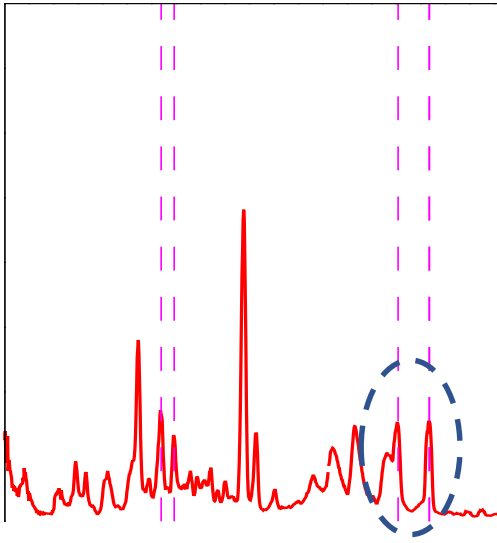
Ecart



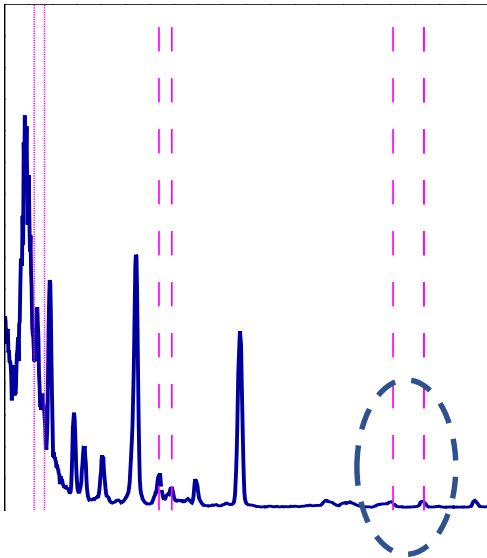
Discussion sur T

Raies Ag

FOD

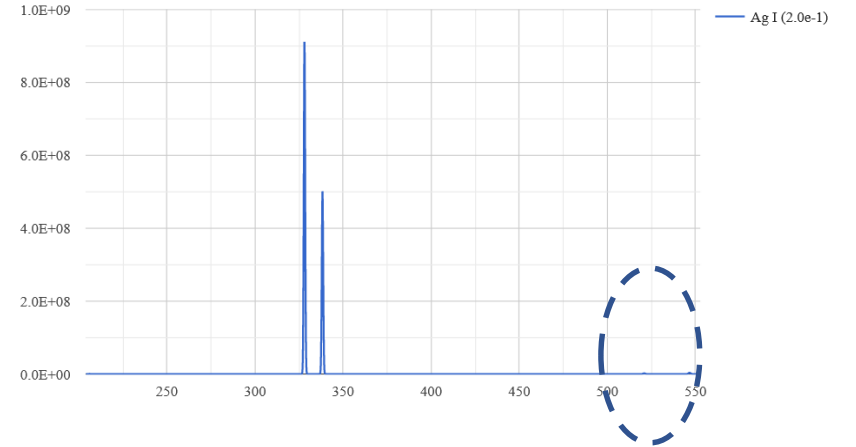


Ecart

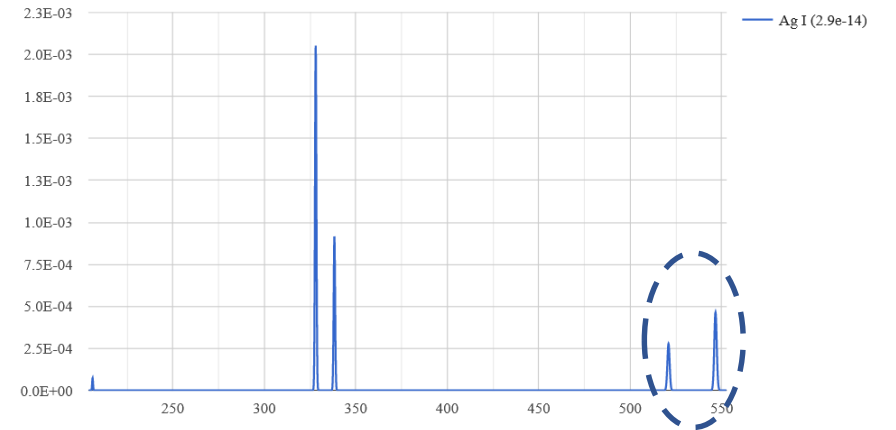


Présence des raies à 500 nm
=> 4-5 eV

Saha/LTE Spectrum for mixture H:10%+O:10%+Al:40%+Cu:20%+Ag:20%
 $T_e = 0.5 \text{ eV}$, $N_e = 1.0e+17 \text{ cm}^{-3}$, Resolution = 600. Total of 1182 lines; Ion abundances are given in par



Saha/LTE Spectrum for mixture H:10%+O:10%+Al:40%+Cu:20%+Ag:20%
 $T_e = 5 \text{ eV}$, $N_e = 1.0e+17 \text{ cm}^{-3}$, Resolution = 600. Total of 1182 lines; Ion abundances are given in paren



Conclusion OES

- Etude quantitative sur les spectres difficiles car
 - Faible reproductibilité
 - Intégration spatio-temporelle
 - Superposition des raies
 - Auto-absorption (résonnance)
- Répartition spectrale :
 - Visible assez similaire & IR légèrement différent
 - UV_c écart $>$ UV_c FOD \Rightarrow Comparaison avec Joulemètre
- Température (laquelle ?) difficile à estimer :
 $T(\text{écart}) > T(\text{fod})$?

%E (Uvc)	540-250	800-I _{max}	800-I _{min}
Ecartement	10,9	11,6	10,8
FOD	4,8	6,3	12,7

