

# Diagnostiques électriques des plasmas froids

Etat de l'art et retour d'expérience

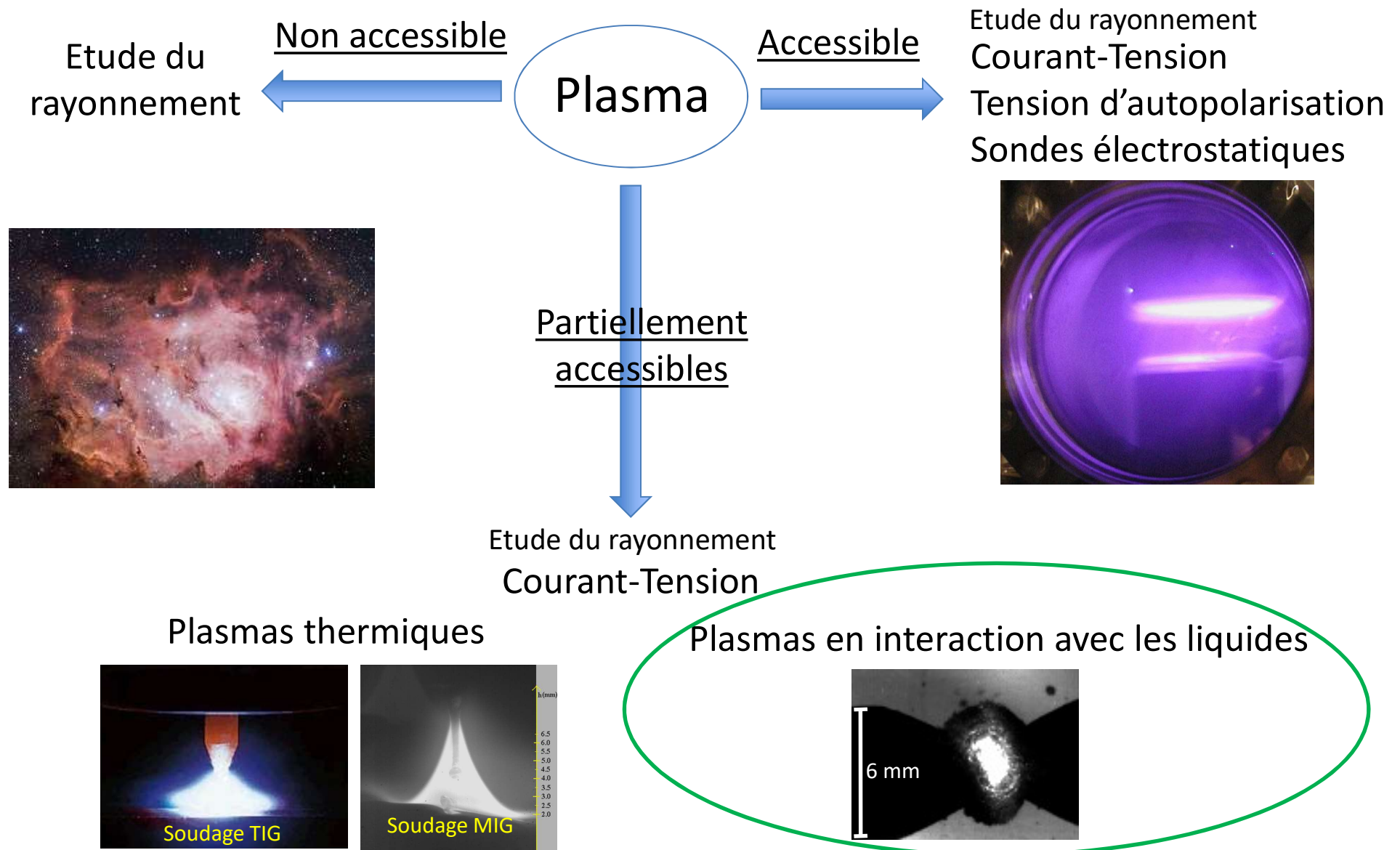
Flavien Valensi



## Plan de la présentation

- Introduction : plasmas et diagnostics
- La mesure du courant
- La mesure de tension
- Synchronisation
- L'enregistrement des données

# Différents types de plasmas et diagnostics possibles



- Difficulté d'accès pour les mesures directes
- Présence d'interfaces plasma/gaz/liquide/solide
  - Bulles de cavitation
  - Opacité du liquide
- Dimensions réduites
- Décharges impulsionnelles
  - Présence de haute tension
  - Energie faible / forte puissance instantanée

# Diagnostics électriques : grandeurs accessibles

Diagnostic		électrons	ions
Sondes électrostatiques	Sonde de Langmuir	$N_e, T_e, V_p, FDE_{e^-}$	$N_i$
	Sonde de Flux ionique		flux
	Sonde RPA		$FDE_i$

Mesure électriques			
Evolution temporelle	Tension de décharge	Courant de décharge	Puissance fournie
Cas particuliers	Tension d'amorçage Chute de tension aux électrodes	Courant de post- décharge	

## Les gammes de courant

- Arc impulsionnel : jusqu'à plusieurs kA
- Arc immergé :  $I < 100 \text{ A}$
- Décharges :  $I < 1 \text{ A}$ 
  - Plasma en contact avec les liquides
  - Décharge impulsionnelle :  $t < 100 \mu\text{s}$

## Les capteurs

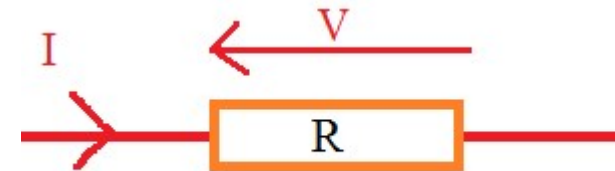
### Résistances calibrées (« shunt »)

#### Descriptif

- Insertion d'une résistance calibrée dans le circuit
- Mesure de la chute de tension aux bornes de la résistance
- Calcul du courant (loi d'Ohm)

#### Avantages

- Simple, robuste et bon marché
- Large gamme d'utilisation (AC, DC, impulsionnel)



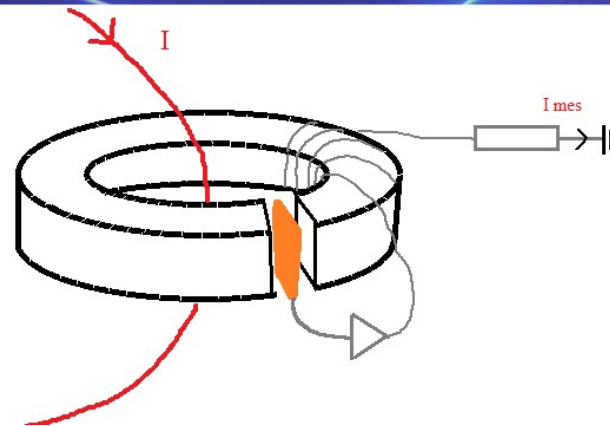
#### Limitations

- Contraintes liées à la mesure haute tension
- Inductance parasite (à haute fréquence)
- Intrusif (pertes Joule)

## Les capteurs

### Capteurs à effet Hall

#### Descriptif



- Mesure du champ magnétique induit par le courant à mesurer
  - Induction d'une tension proportionnelle au courant à mesurer
  - Boucle de rétroaction (meilleure linéarité, correction de la dérive en température) : mesure du courant de rétroaction
  - Mesure de la tension aux bornes d'une charge résistive

#### Avantages

- Large gamme d'utilisation (AC, DC, impulsionnel) jusqu'à 15 kA
- Bonne précision

#### Limitations

- Nécessite une alimentation DC extérieure
- Le conducteur doit traverser le capteur
- Dérive



## Les capteurs

### Transformateurs de courant

#### Descriptif

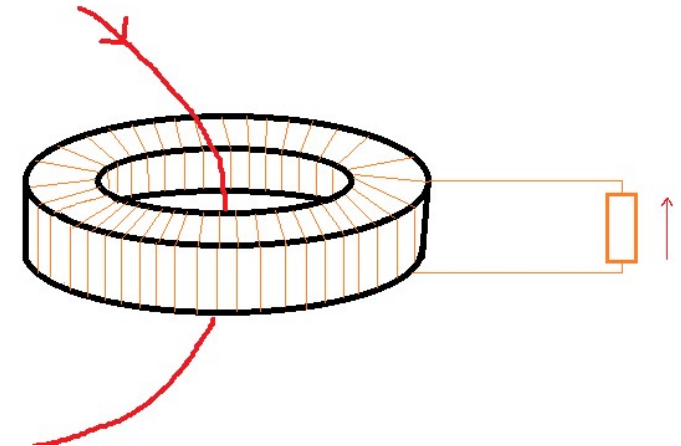
- Tore ferromagnétique :
  - « enroulement » primaire : conducteur traversé par le courant à mesurer
  - Enroulement secondaire : nombre élevé de spires
  - Mesure de la tension aux bornes d'une charge résistive
- Mesure de la chute de tension aux bornes de la résistance
- Courant mesurable :  $80 \mu\text{A} < I < 10^6 \text{ A}$  (impulsionnel)
- Fréquence maximale : 350 MHz

#### Avantages

- Non intrusif
- Pas d'alimentation extérieure
- Fréquence maximale élevée

#### Limitations

- Le conducteur doit traverser le capteur
- Faible courant : plusieurs passages du conducteur nécessaires
- Fonctionnent uniquement en AC



## Les capteurs

### Boucles à bobine de Rogowsky

#### Descriptif

- Noyau amagnétique :
  - « enroulement » primaire : conducteur traversé par le courant à mesurer
  - Enroulement secondaire : nombre élevé de spires
  - Mesure de la tension aux bornes d'une charge résistive
- Tension induite proportionnelle à la dérivée de la variation de courant  
→ Circuit intégrateur

#### Avantages

- Possibilité d'ouvrir la boucle pour la mise en place
- Pas d'alimentation externe
- Mesure de courant élevés (> 5 kA)

#### Limitations

- Fonctionnent uniquement en AC
- Possibilité d'imprécision pour des signaux non symétriques

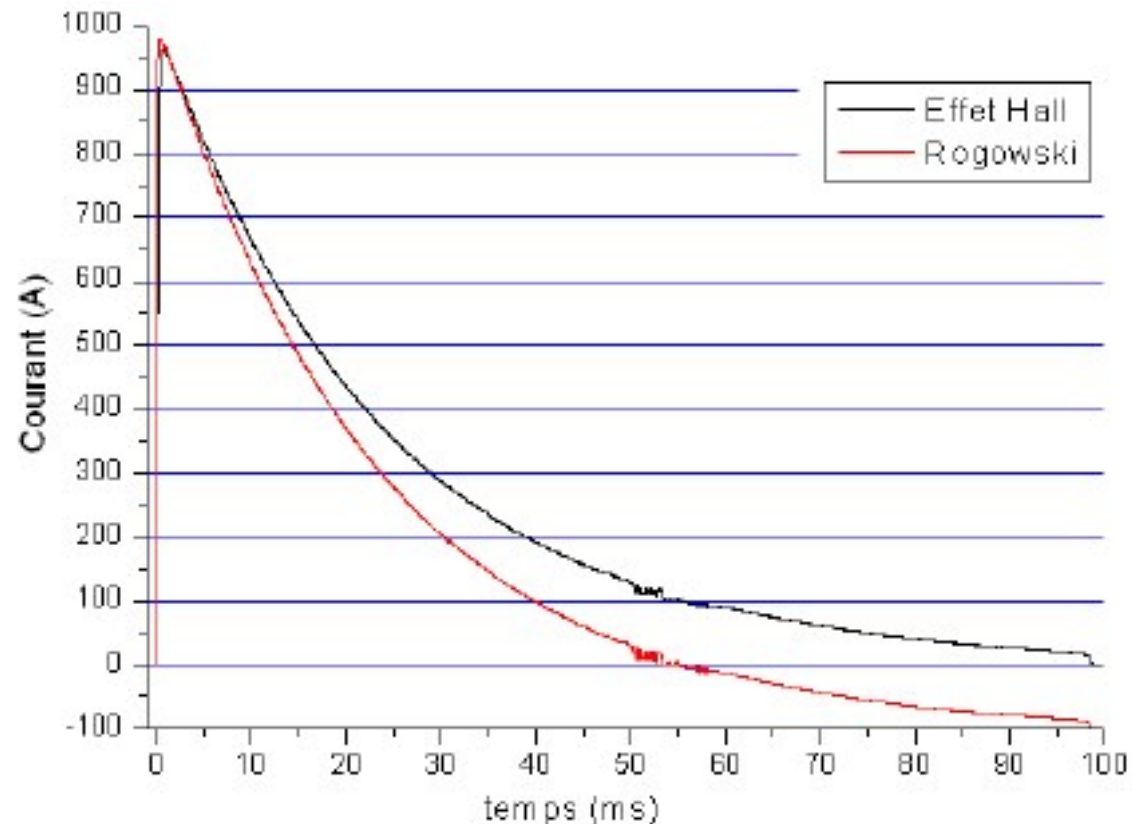


## Les capteurs

Comparaison d'un capteur à effet Hall et d'une bobine de Rogowsky

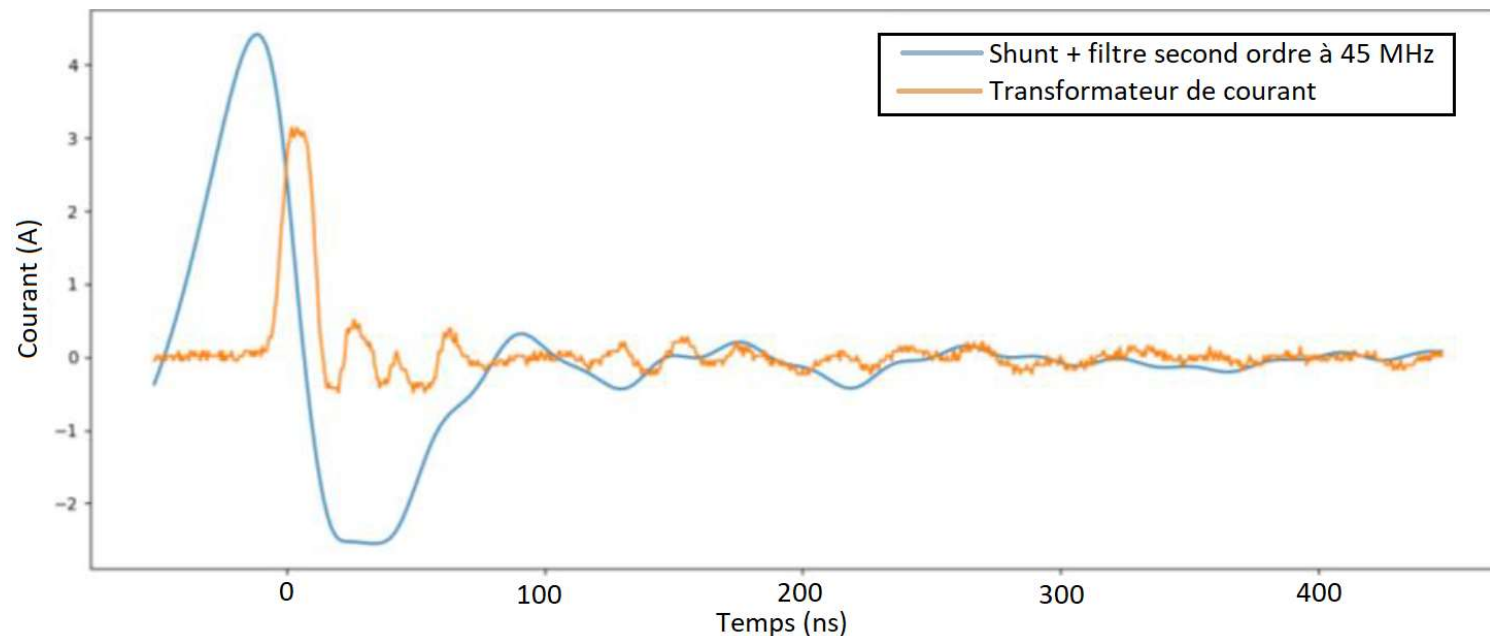
- Décharge capacitive : durée 100 ms
- Sonde CWT30R à bobine de Rogowski / Capteur à effet Hall LF 205-S/SP3

La bobine de Rogowsky présente une meilleure réponse à l'établissement du courant mais une sous-estimation du courant sur le front descendant



## Les capteurs

### Comparaison d'un shunt et d'un transformateur de courant



- Circuit oscillant (transformateur haute tension) : impulsions < 100 ns
- Transformateur de courant Pearson 4100 (35 MHz) / sonde de tension Testec TT HVP 2739 (shunt)

Shunt : bande passante plus large mais sensibilité au bruit : nécessité d'appliquer un filtre numérique

### Mise en œuvre

- Shunt : insertion d'une résistance dans le circuit
- Sondes (Hall, Rogowsky, transformateur de courant) : passage du câble dans le capteur
- Contraintes pouvant être liées à l'encombrement de la sonde
- Adapter la gamme mesurable à la valeur du courant à mesurer

## Les gammes de tension

- Procédés basse tension :  $U < 1 \text{ kV}$ 
  - Typiquement  $100 \text{ V} < U < 400 \text{ V}$
  - Electrodes initialement au contact, amorçage par pont fondu
- Procédés haute tension :  $1 \text{ kV} < U < 50 \text{ kV}$ 
  - Amorçage par claquage du milieu diélectrique

## Les capteurs

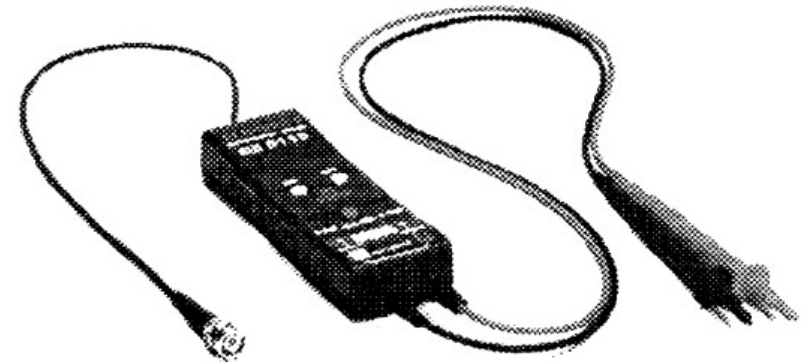
### Sondes basse tension (< 1500 V)

#### Caractéristiques

- Mesure différentielle
- Facteur d'atténuation réglable : 1/100 ou 1/1000
- Bande passante typique : 30 à 200 MHz

#### Avantages

- Bonne précision pour mesurer la tension après l'amorçage ( $U < 100$  V)



#### Limitations

- Non adapté si alimentation HT

## Les capteurs

### Sondes haute tension (< 5 kV)

#### Descriptif

- Mesure différentielle
- Facteur d'atténuation typique : 1/100
- Bande passante : jusqu'à 500 MHz

#### Avantages

- Bonne précision pour les tension de décharge
- Mesure de fréquences élevées
- Taille réduite

#### Limitations

- Non adapté si alimentation > 5 kV





## Les capteurs

### Sondes haute tension > 5 kV

#### Descriptif

- Facteur d'atténuation 1/1000
- Bande passante jusqu'à 220 MHz
- Tension jusqu'à 30 – 40 kV (impulsionnel)
- Connecteur isolé
- Compensation d'impédance (connexion à un oscilloscope)

#### Avantages

- Mesure différentielle
- Large gamme de tensions mesurables

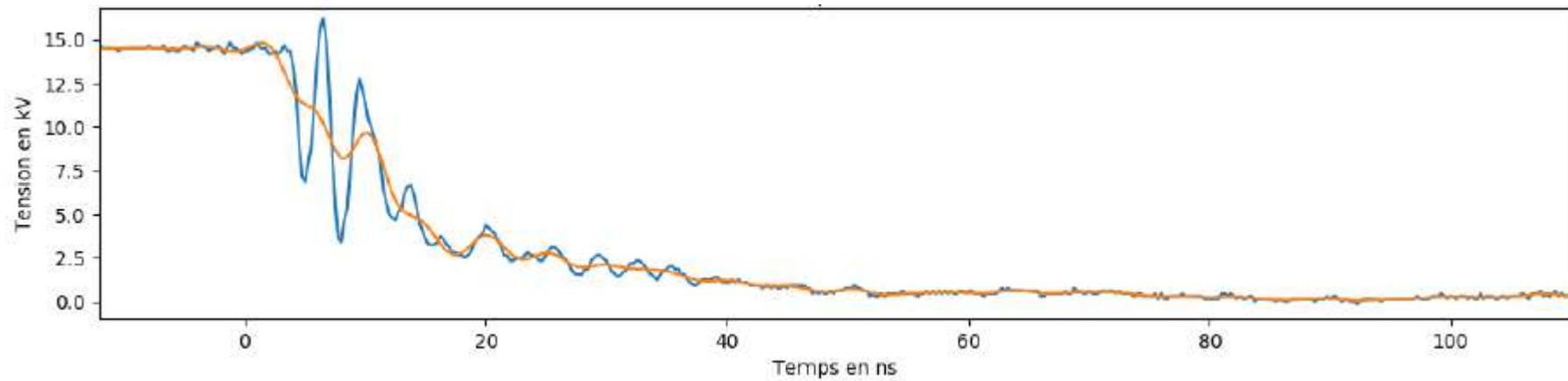
#### Limitations

- Encombrement
- Sensibilité au bruit à haute fréquence



## Les capteurs

Sensibilité au bruit : nécessité d'un lissage



Prendre en compte la bande passante de la sonde

## Mise en œuvre

- Connexion au plus proche de la décharge
- Les chutes de tension dans les électrodes peuvent influencer sur les valeurs mesurées
- Contraintes pouvant être liées à l'encombrement de la sonde
- Mesures différentielle : potentiel « 0 » pouvant être différent de la masse

## Séquences de synchronisation

- Déclenchement sur un signal externe
  - Mise sous tension du dispositif
  - Mesure électriques
  - Autres mesures (imagerie...)
- Déclenchement sur la montée en courant
- Déclenchement sur la chute de tension

## Compatibilité électromagnétique

- Décharges impulsionnelles, haute tension :
  - Niveau de bruit important
  - Risque de déclenchement intempestif
- Le signal de courant ou de tension n'est pas toujours utilisable pour la synchronisation

## Gestion des délais

- Arc immergé : Délai variable entre la mise sous tension et le claquage
- Prise en compte du câblage :  $1 \text{ m} \leftrightarrow 3 \text{ ns}$

## Cartes d'acquisition

### Présentation générale

- Carte d'acquisition
  - Entrées simples ou différentielles
  - Déclenchement entrée/sortie
- Boîtier d'interface pour enregistrer les données sur un ordinateur
- Gestion des données au moyen d'un environnement virtuel (Labview...)

### Avantages

- Acquisition directe sur ordinateur
- Nombre de voies important
- Coût modéré (< 5 k€)

### Limitations

- Bande passante partagée sur toutes les voies
- Délais liés au système d'exploitation



## Cartes d'acquisition

### Exemple

- Carte d'acquisition National Instrument PXI 621
- boîtier d'interface SCB 68
  
- Cartes entrées/sortie : 8 voies simples ou 4 entrées différentielles
- Bande passante 200 kHz → typiquement 20 à 40 kHz / voies



## Oscilloscope

### Présentation générale

- Interface avancée (écran tactile, menus)
- Visualisation des courbes
- Réglage du calibre vertical
- Réglage de la base de temps
- Fonctions de déclenchement (entrée/sortie)
- Synchronisation sur horloge interne ou externe



### Avantages

- Bande passante élevée (2GHz et plus)
- Traitement du signal intégré

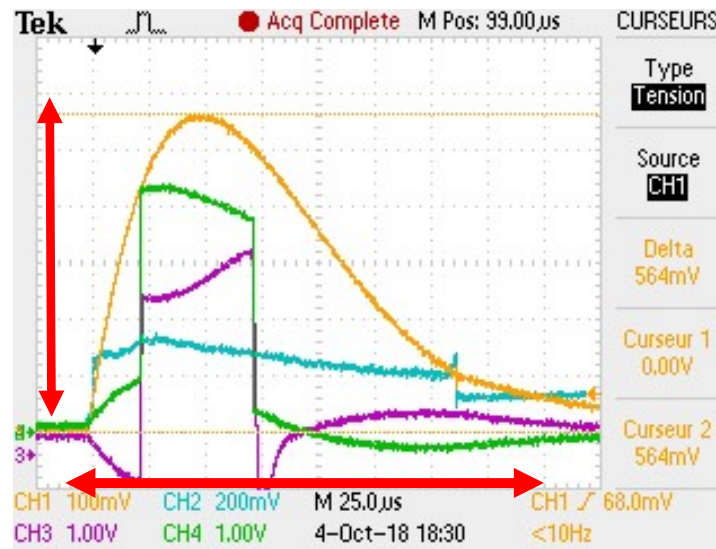
### Limitation

- Nombre de voies
- Délai synchronisation (1  $\mu$ s)
- Coût

## Oscilloscope

### Principaux réglages

- Calibre vertical



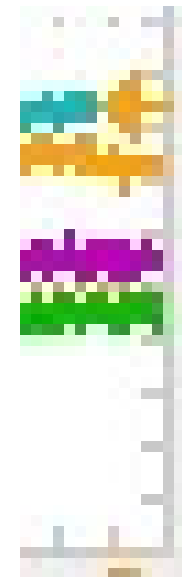
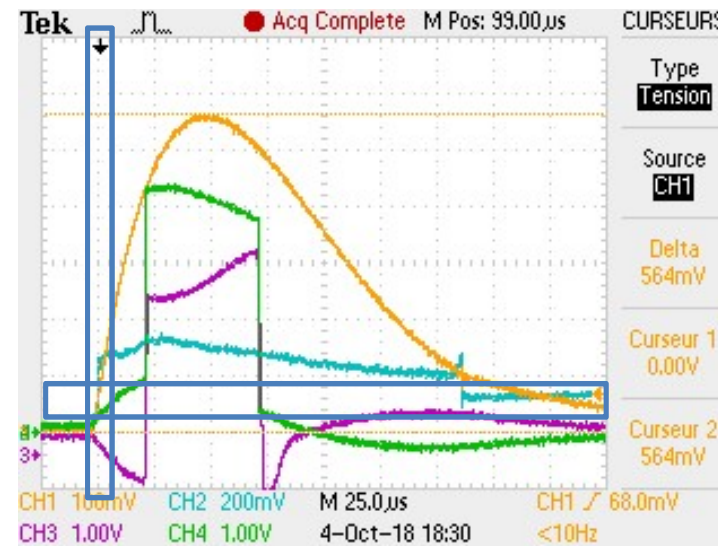
- Base de temps



## Oscilloscopes

### Fonction de déclenchement (« Trigger »)

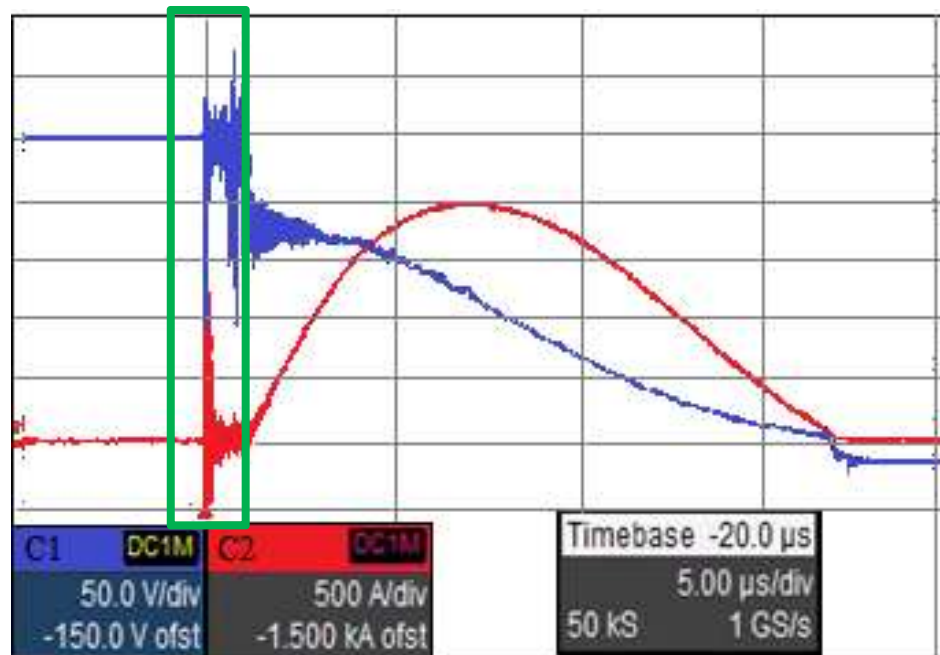
- Réglage du niveau de déclenchement
  - Valeur adaptée à l'amplitude du signal
  - Suffisant pour ne pas être perturbé par le bruit
- Mode simple séquence : activer avant chaque essai
- Mode continu : déclenchement sur un signal répétitif



## Oscilloscopes

### Fonction de déclenchement (« Trigger »)

- Haute tension : bruit pouvant perturber le déclenchement



- Exemple : impulsion à 3 kV pour l'amorçage

# Oscilloscopes

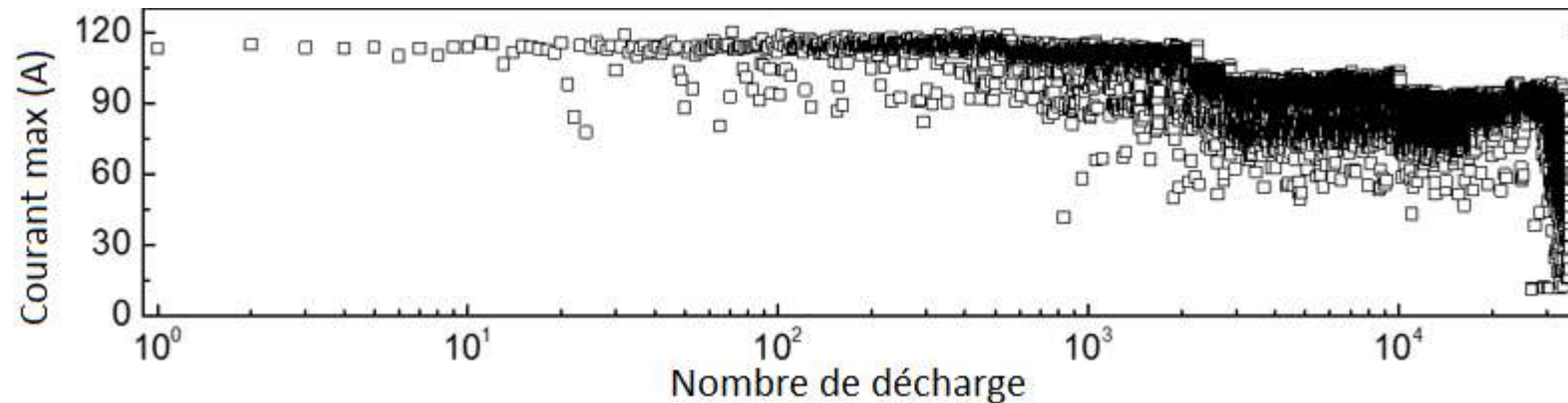
## Enregistrement des données

- Mémoire interne
- Carte mémoire
- Clé USB
- Connexion sur ordinateur (port USB ou Ethernet)

## Oscilloscopes

### Acquisition en continu

- Transfert en continu sur PC
- Algorithme de traitement automatique des données



**Merci de votre attention**