

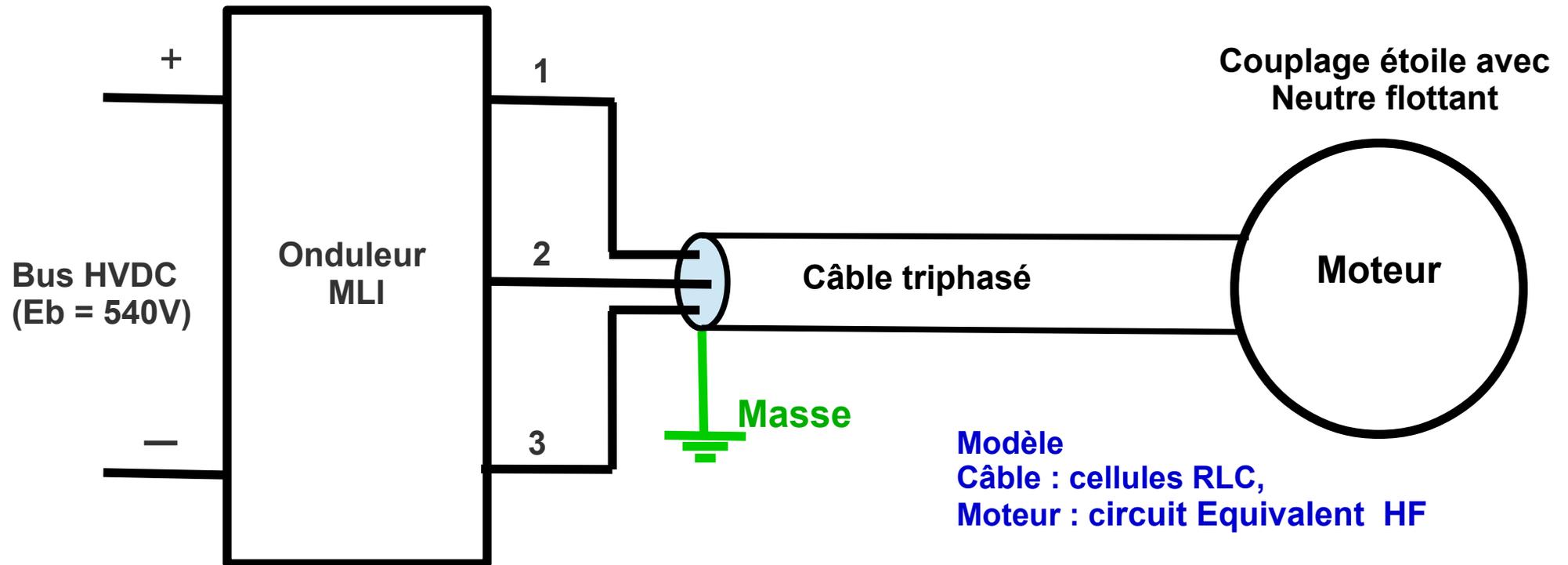


Technologies des bobinages des moteurs électriques embarqués et analyse de leur fiabilité

Daniel Roger, Univ. Artois, Laboratoire des Systèmes Électriques et Environnement (LSEE)

daniel.roger@univ-artois.fr

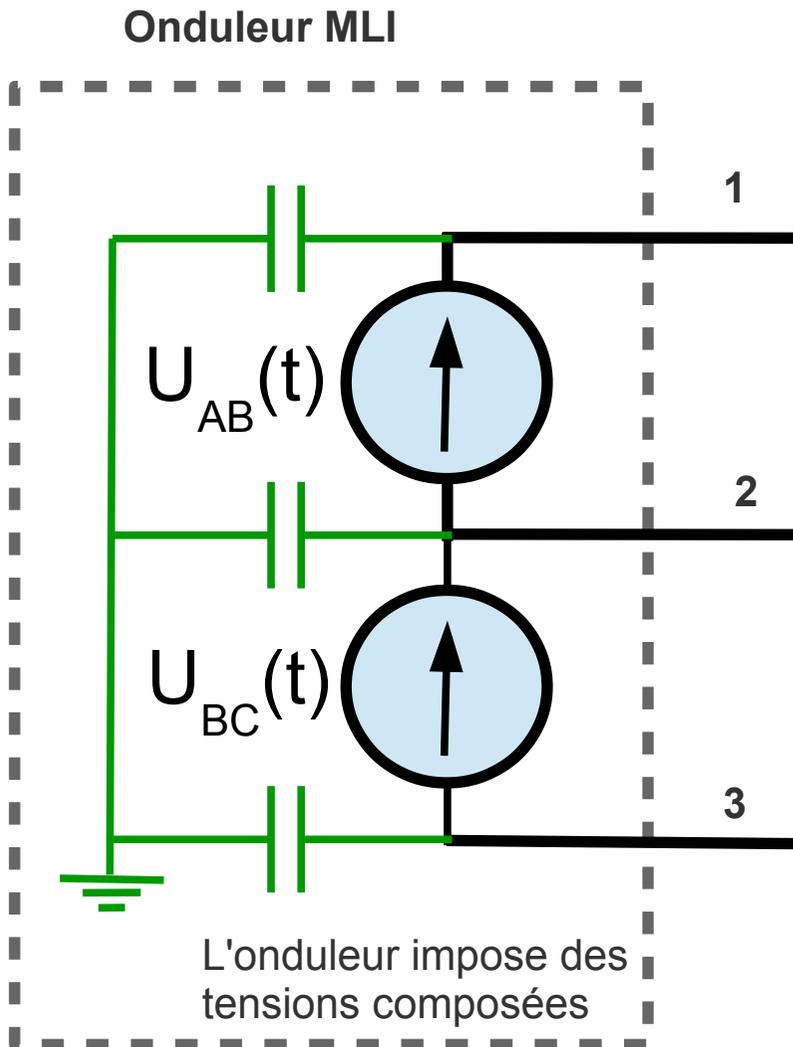
Alimentation classique



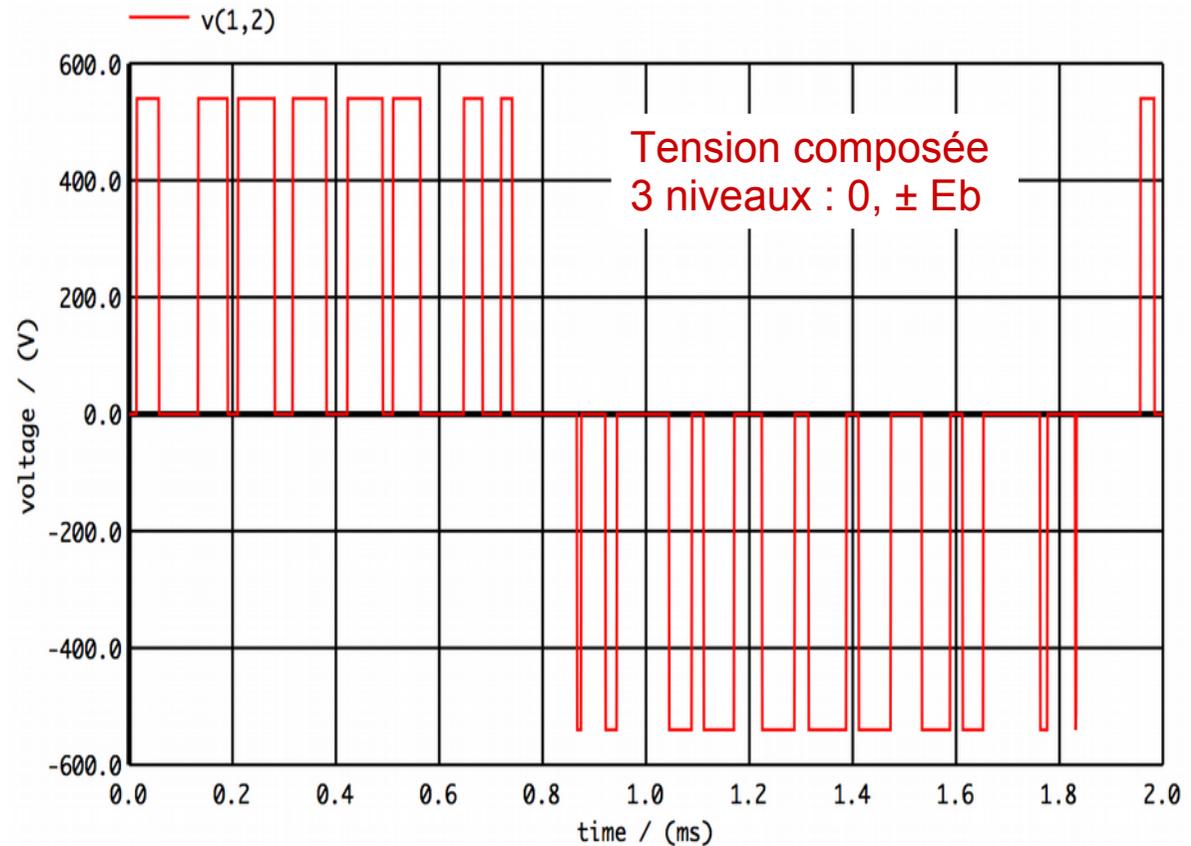
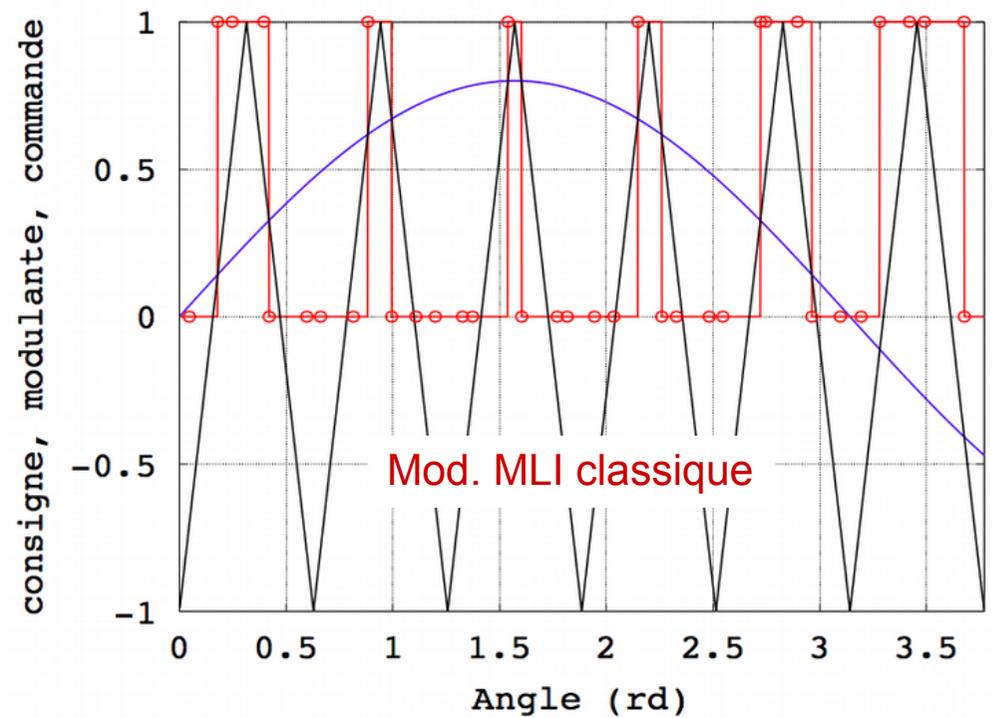
Le bobinage du moteur doit être considéré dans son environnement :

- Alimentation MLI comportant des composants rapides
- Connexion par un câble triphasé (blindé ou non)
- Pression réduite en altitude
- Température
- Humidité

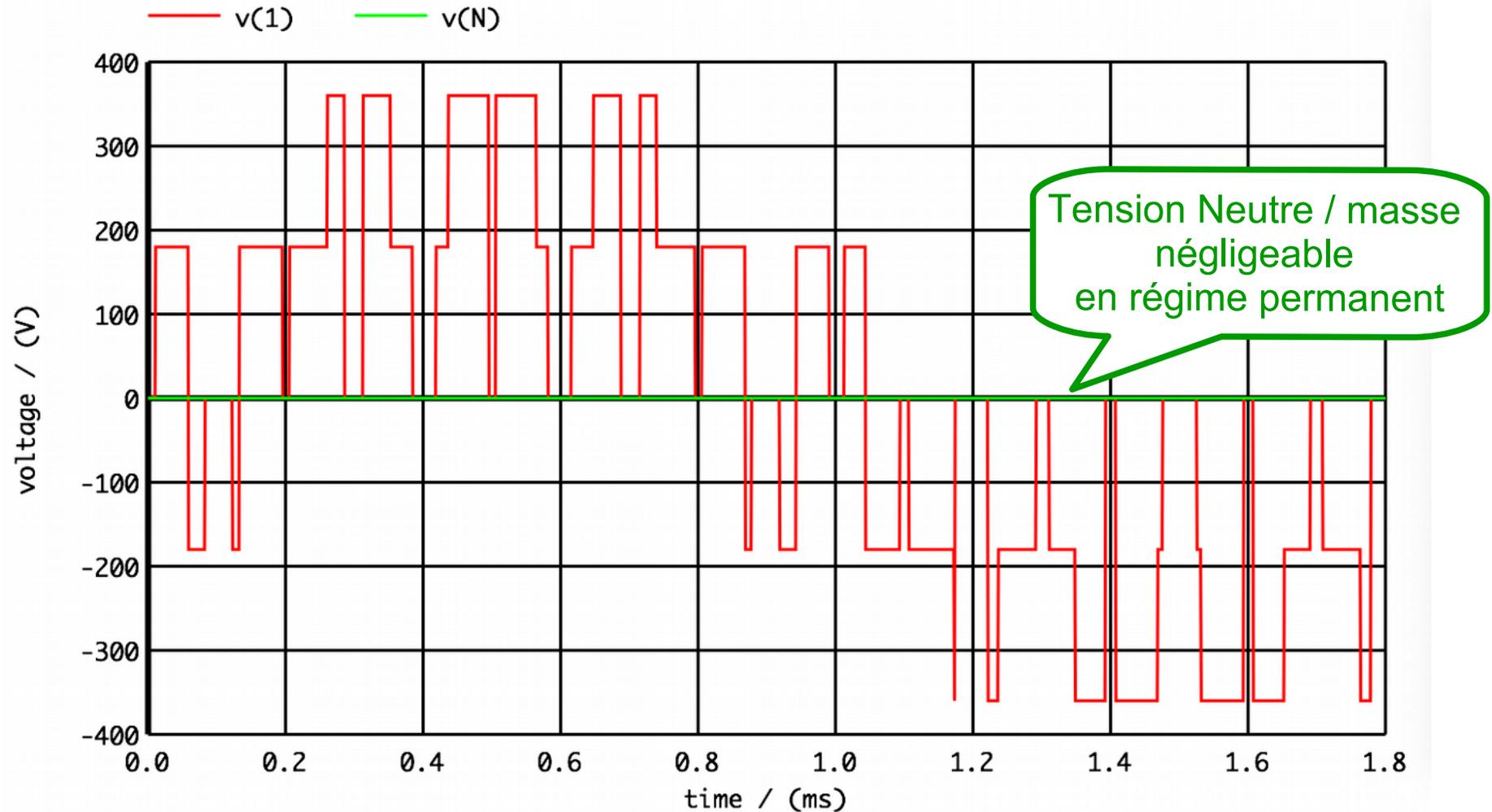
Tensions imposées par l'onduleur



Les capacités de mode commun sont supposées très faibles, elles sont négligées pour cet exposé

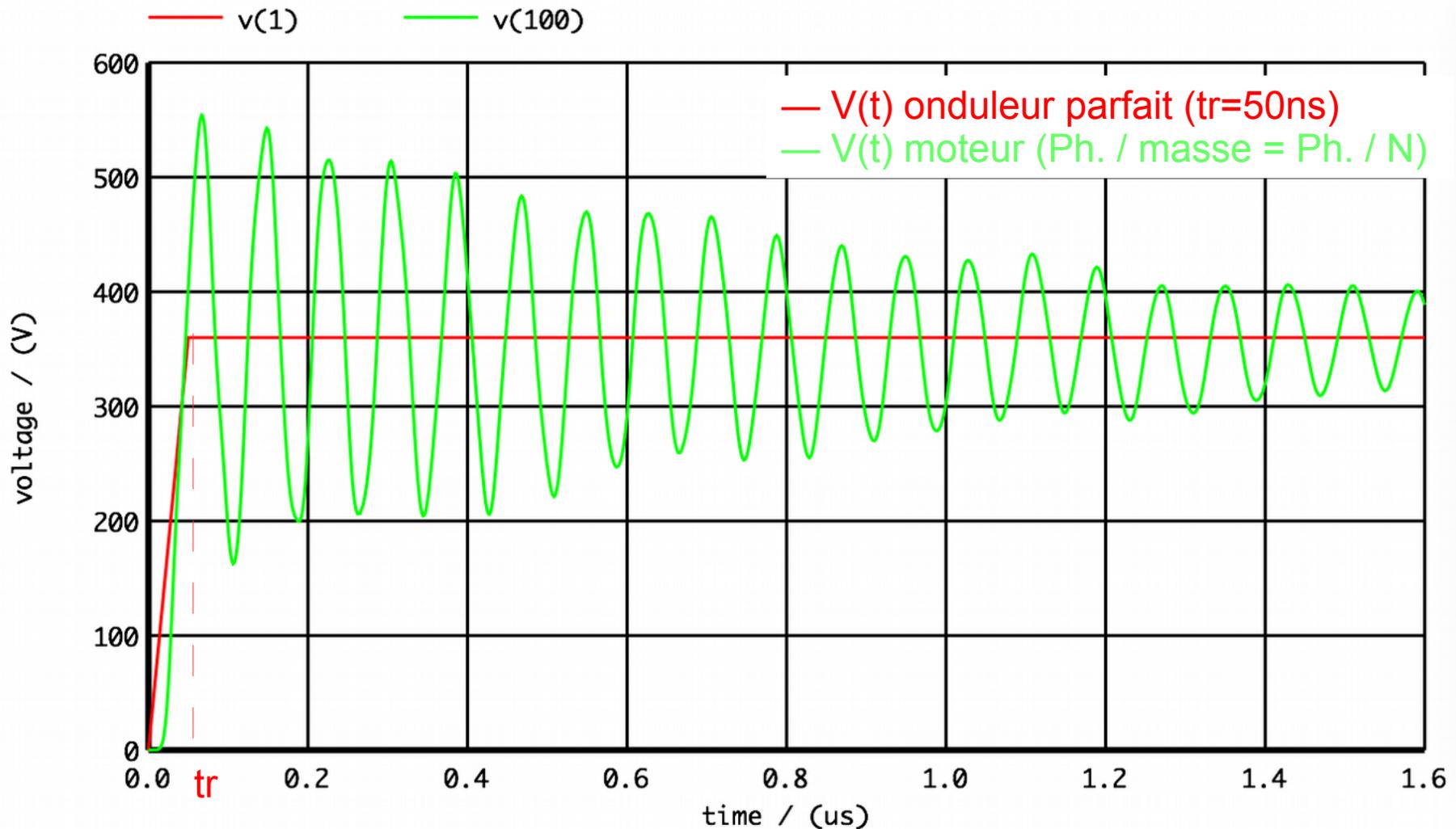


Tensions simples résultantes (en sortie de l'onduleur)



- Forme d'onde complexe qui dépend de l'amplitude de la consigne
- 5 niveaux de tension 0, $\pm 1/3$ et $\pm 2/3$ du bus continu
- Tension Neutre / masse nulle pour un moteur parfaitement symétrique
- Fronts raides pour passer d'un niveau à l'autre
- Quelques impulsions bipolaires lorsque la valeur moyenne passe par zéro (leur nombre dépend de la consigne)

Influence du câble



Résultats de simulation du schéma équivalent :
- Câble standard de 3m,
- Circuit équivalent défini à partir des mesures d'impédances faites sur un moteur classique

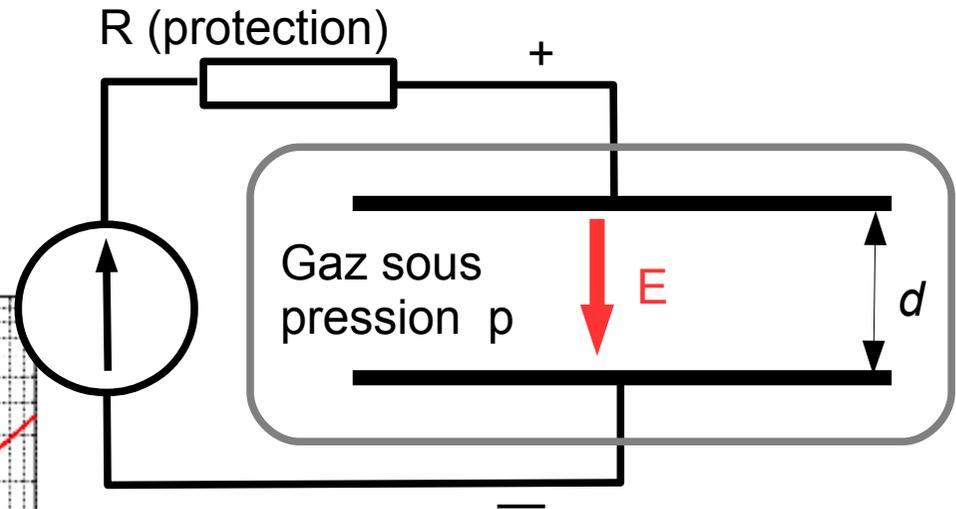
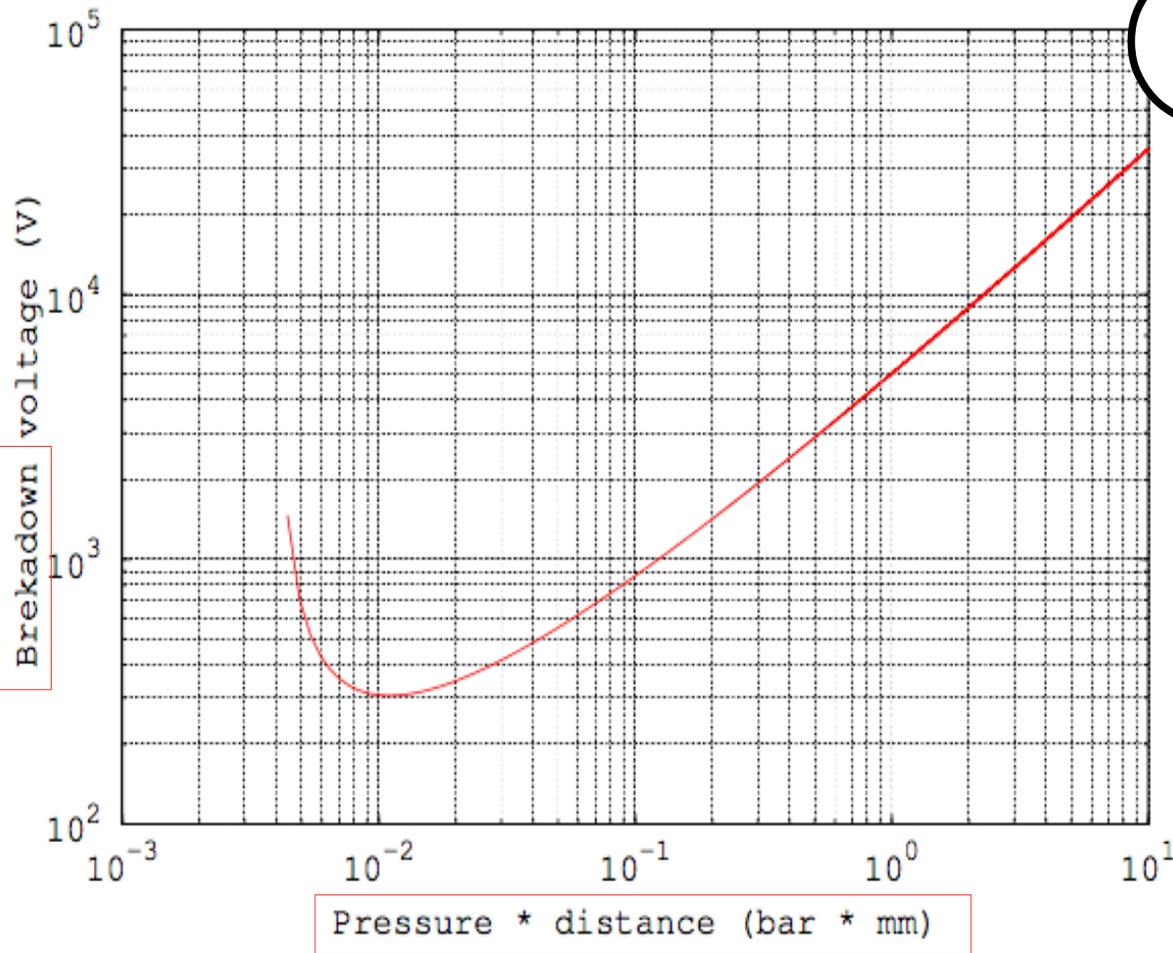
Les surtensions dépendent beaucoup du câble et du dv/dt .
Limite : 2 fois la tension pour dv/dt infini

Question : Existe t'il des décharges partielles (DP) pendant chaque dépassement ??

Il est nécessaire de bien comprendre le mécanisme des DP et de réviser les vieux cours sur Paschen (1865-1947)

La loi de Paschen date de 1889 mais elle fait encore référence

Paschen in dry air at ambient temp.

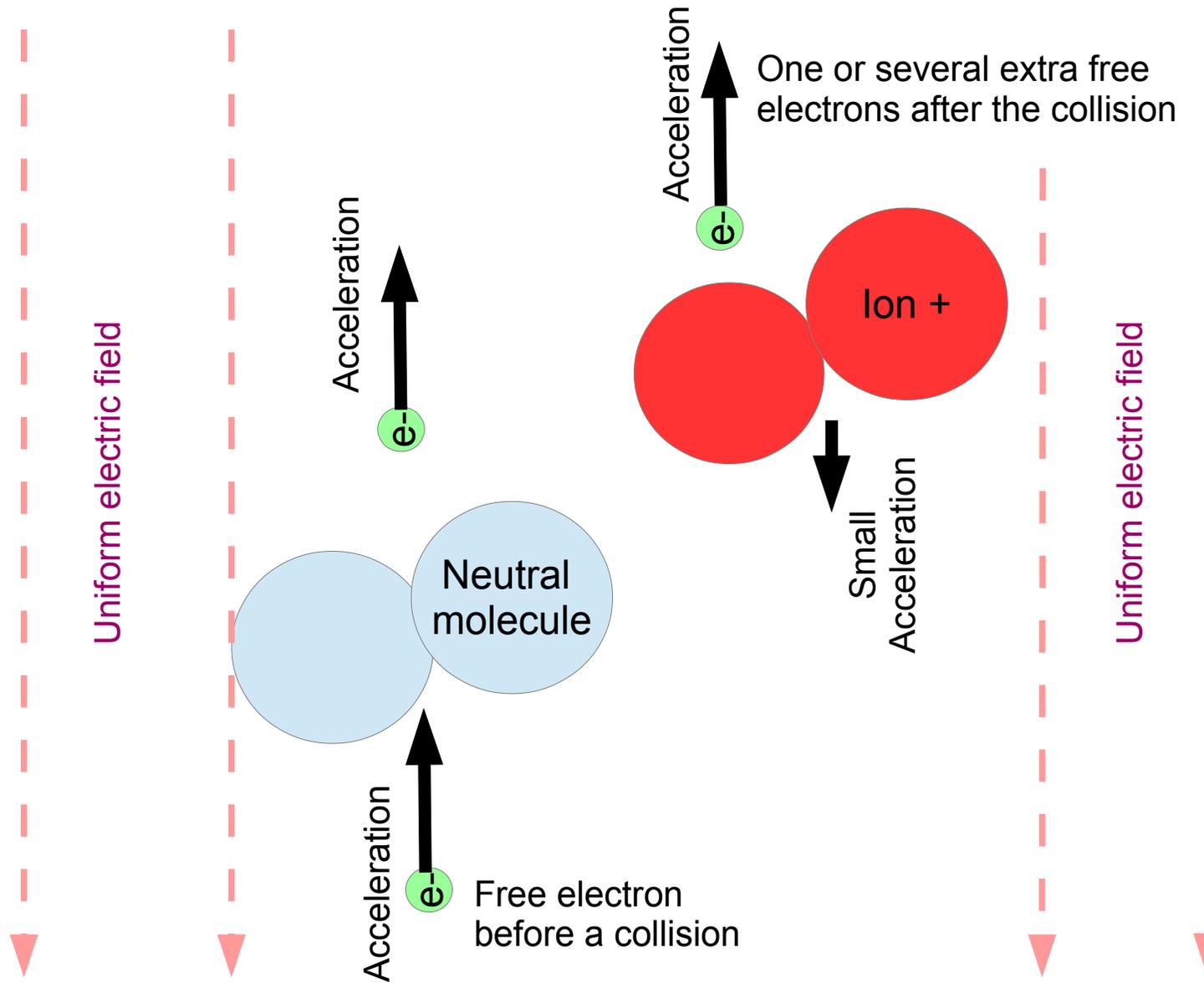


Entre 2 électrodes métalliques, le phénomène est permanent, il peut changer de nature pour arriver à un arc.

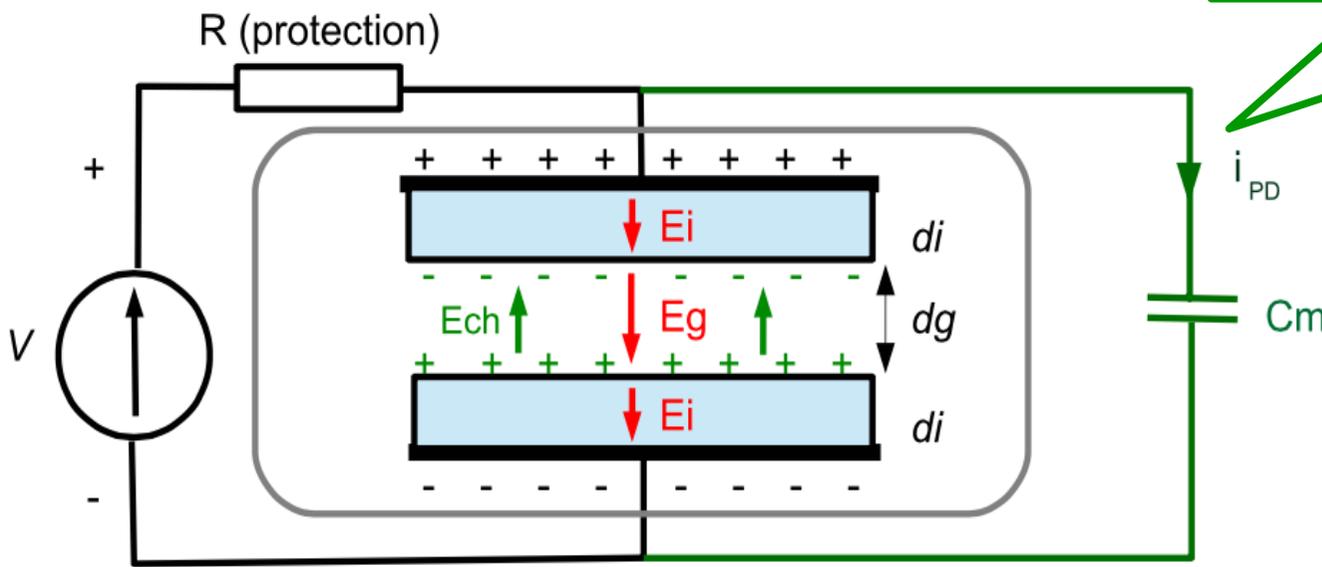
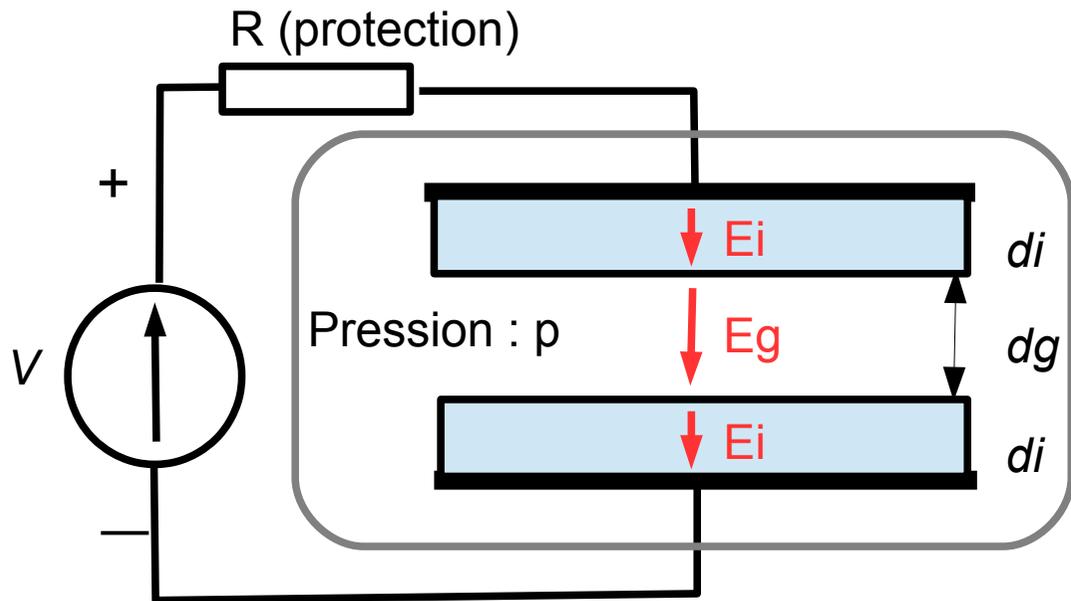
Il faut diminuer le tenson pour l'arrêter

Unités originales : Torr * cm

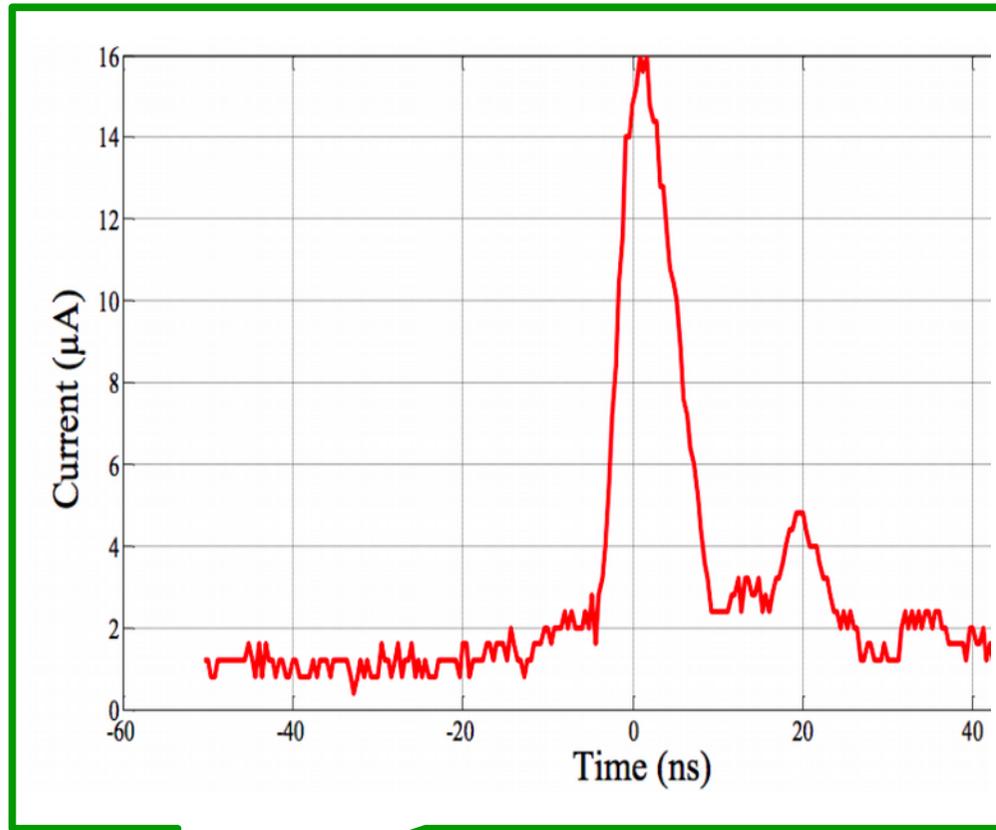
Mécanisme d'avalanche électronique utilisé par Paschen



Mécanisme de charge des surfaces isolantes



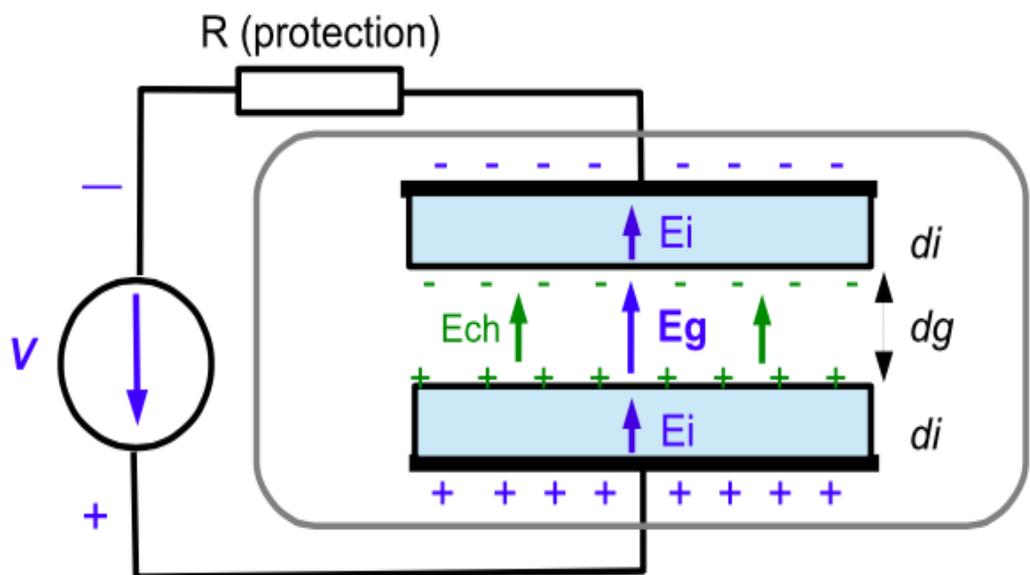
PD measurement circuit



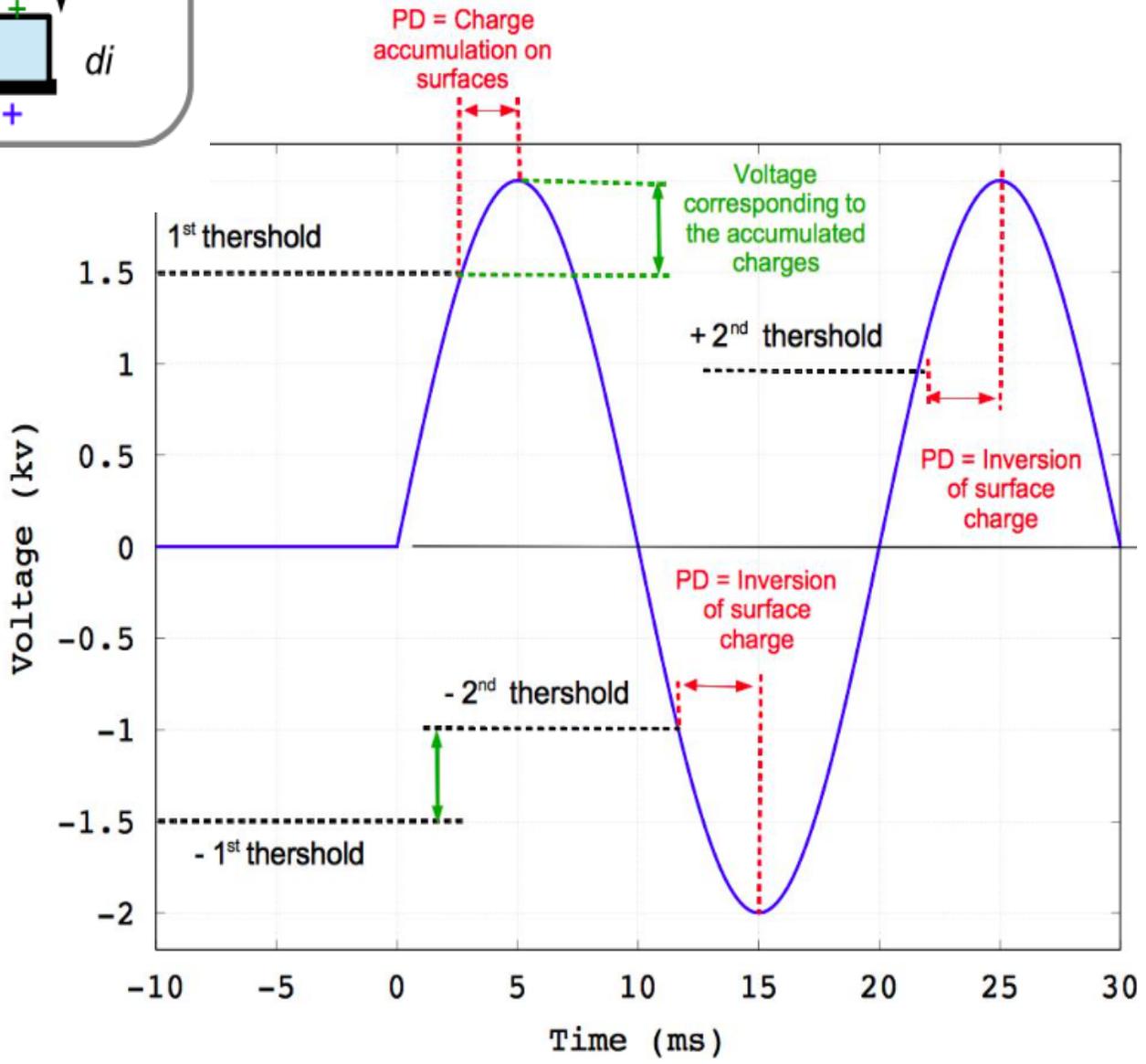
- Localement, les charges accumulées sur les surfaces isolantes créent un champ inverse qui arrête la DP.
- Il faut plusieurs DP locales pour charger complètement chaque surface.
- Pendant la DP les surfaces sont bombardées par des électrons et des ions

Pour chaque DP le phénomène est très rapide (~ 10 ns).

Inversion de la polarité



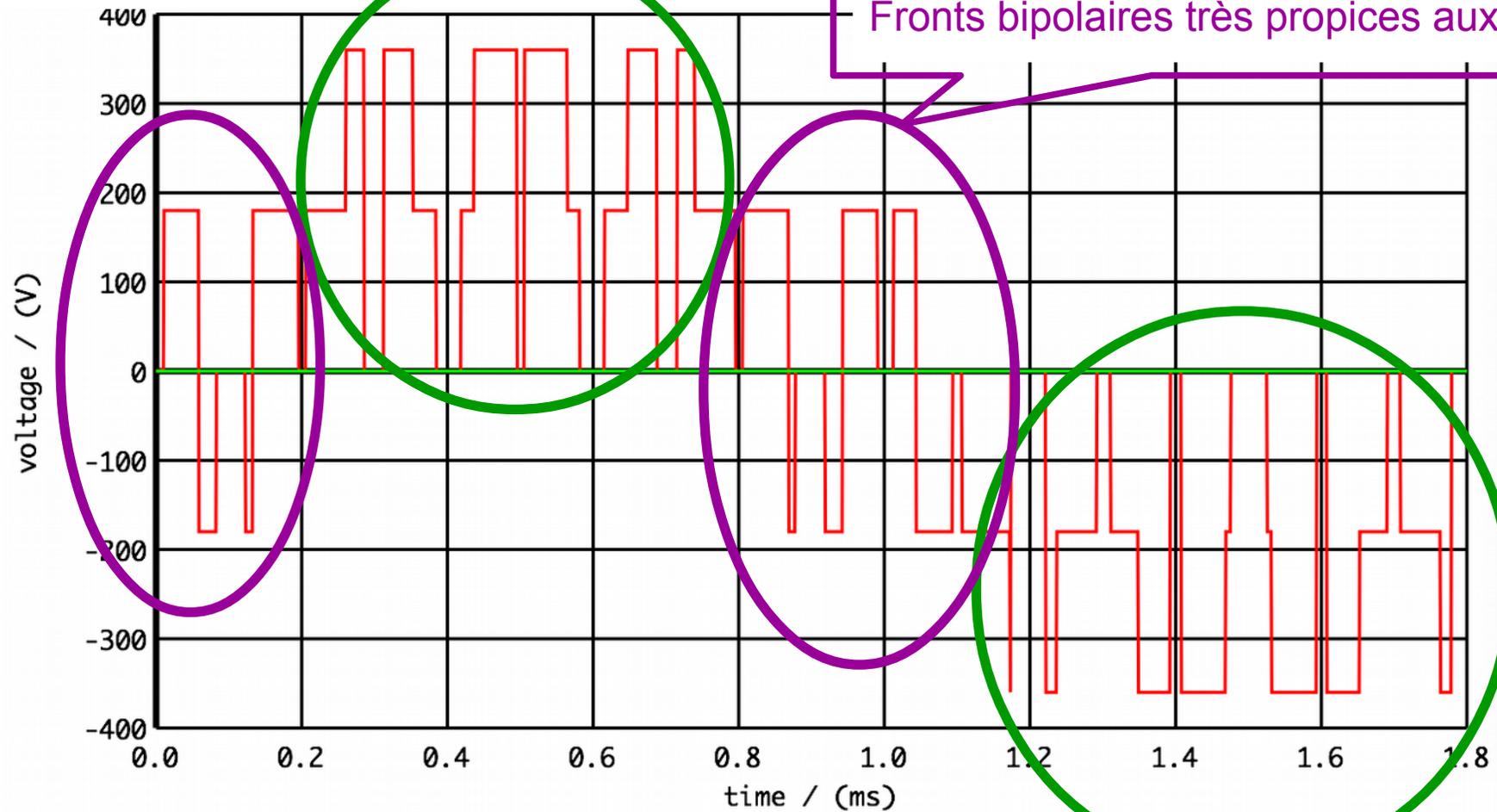
- Après une inversion de la polarité, les charges accumulées sur les surfaces isolantes restent en place (charges d'espace).
- Ces charges renforcent le champ créé par la source. Le seuil d'apparition des DP (SADP) (PDIV en Anglais) est plus bas.
- Les coefficients de Paschen de la littérature actuelle prennent en compte ce phénomène.
- Les DP inversent les charges d'espaces à chaque inversion de polarité.



Analyse en MLI

Très peu de DP :
les surfaces isolantes se chargent, quelques DP
compensent les charges perdues par conduction.

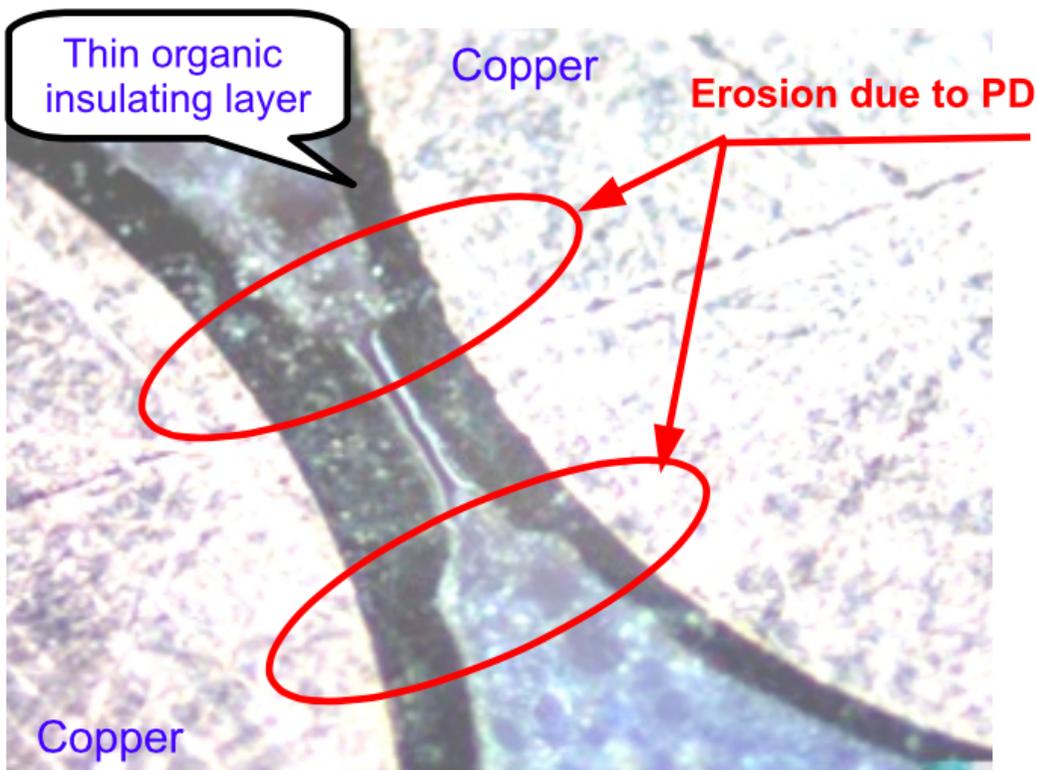
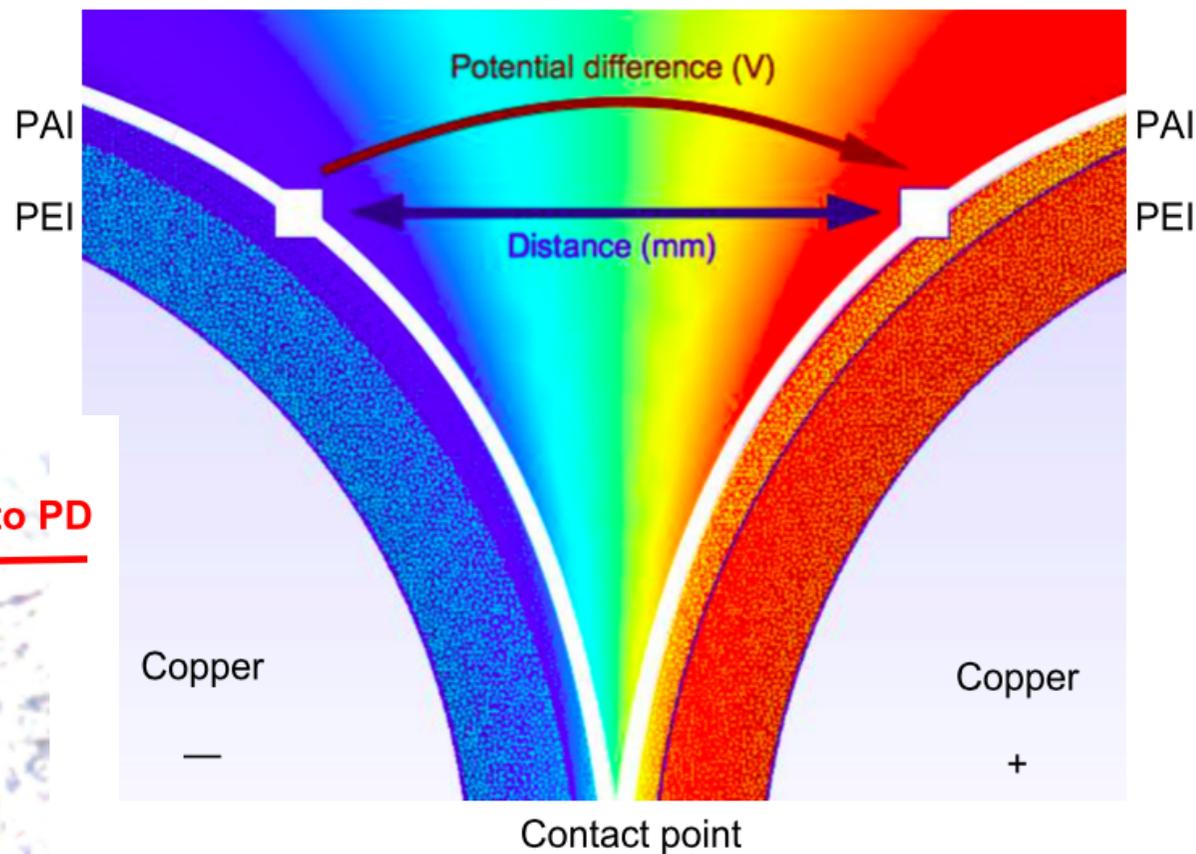
Zone d'inversion de la polarité :
Fronts bipolaires très propices aux DP



Cas de l'isolation inters-pires d'un bobinage



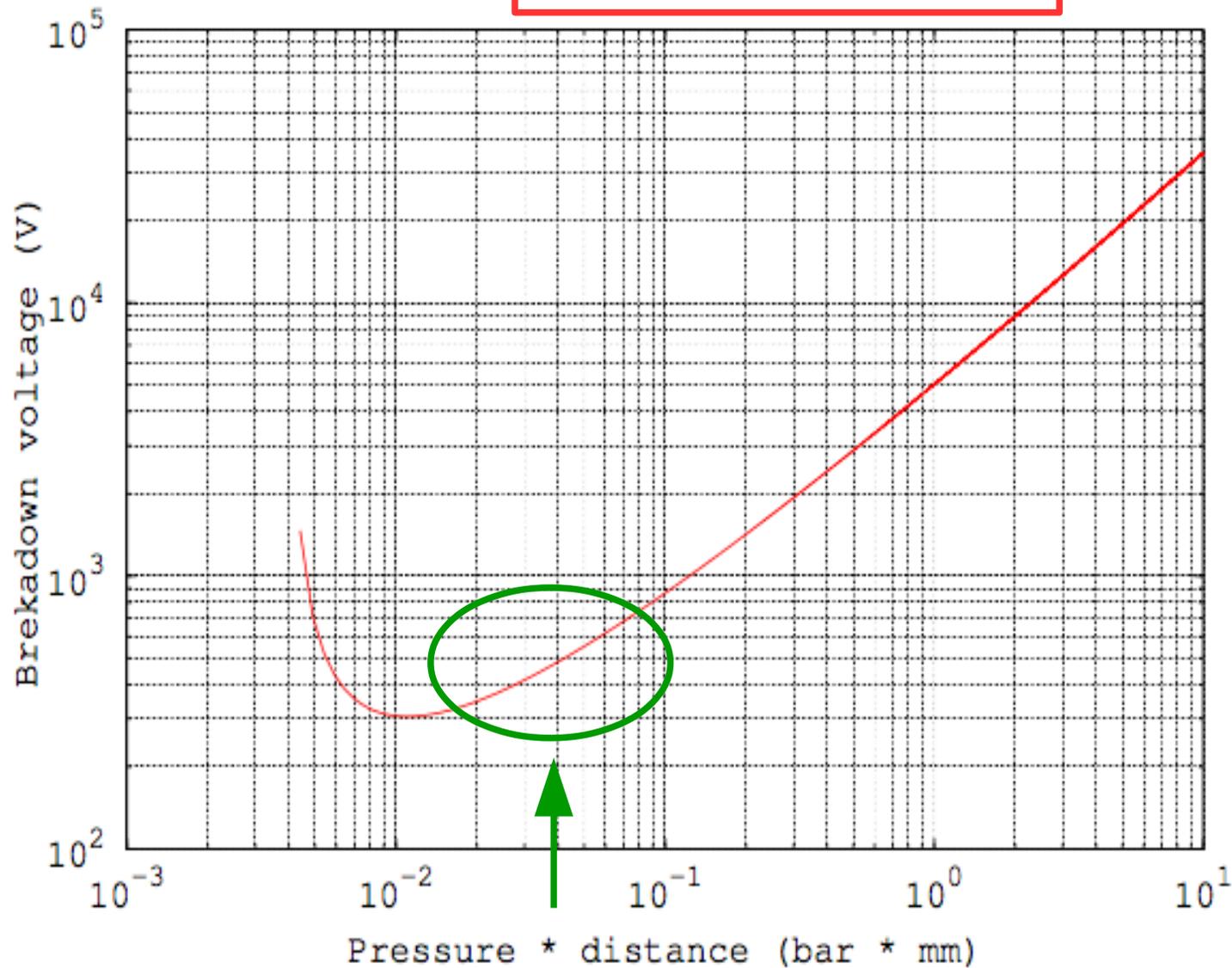
Point faible : air résiduel entre les spires
distances : 10 à 100 μm



Au point de contact, la ddp entre les surfaces isolantes est très faible : pas de DP.

Les DP se produisent lorsque la distance entre les surfaces vaut quelques dizaines de μm .

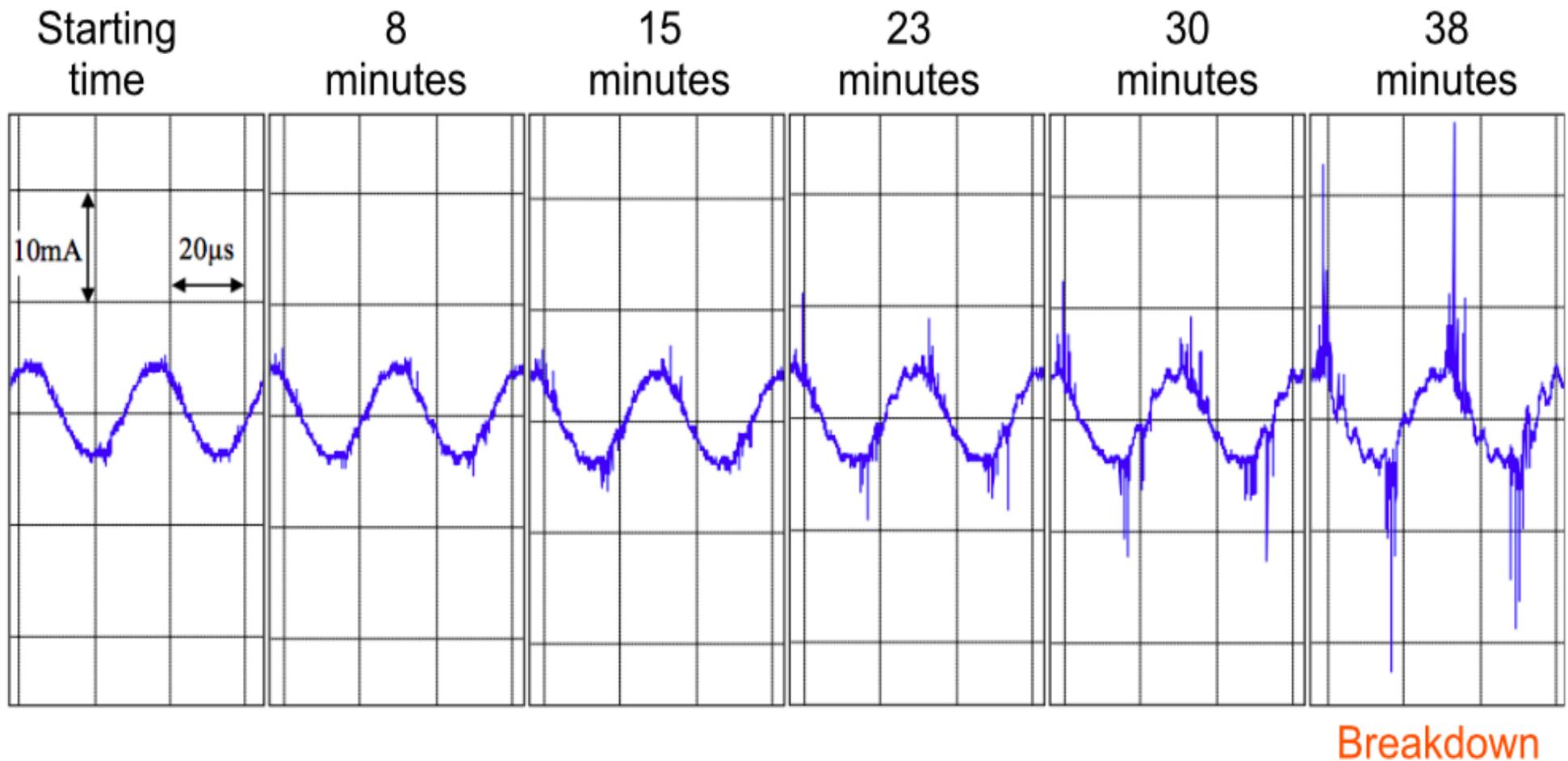
Paschen in dry air at ambient temp.



La courbe de Paschen est modifiée lorsque la température et l'humidité varient

- Zones où les DP peuvent se produire : la ddp subie par la couche d'air est de l'ordre de 400 à 500V.
- Aux mêmes distances pour une pression plus petite, le point se décale vers la gauche et les DP apparaissent pour des tensions plus faibles .

Nombreuses DP = érosion des polymères, amplification du phénomène et rupture



Essai fait à 30kHz sur une éprouvette torsadée pour une tension très supérieure au SADP

Bombardement ionique du polymère = rupture des macromolécules = oxydation ...

Résumé

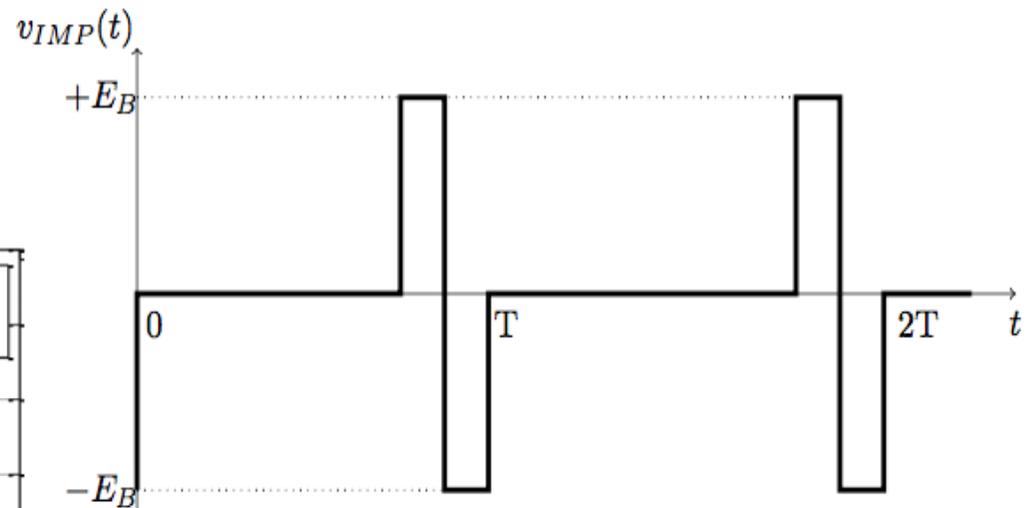
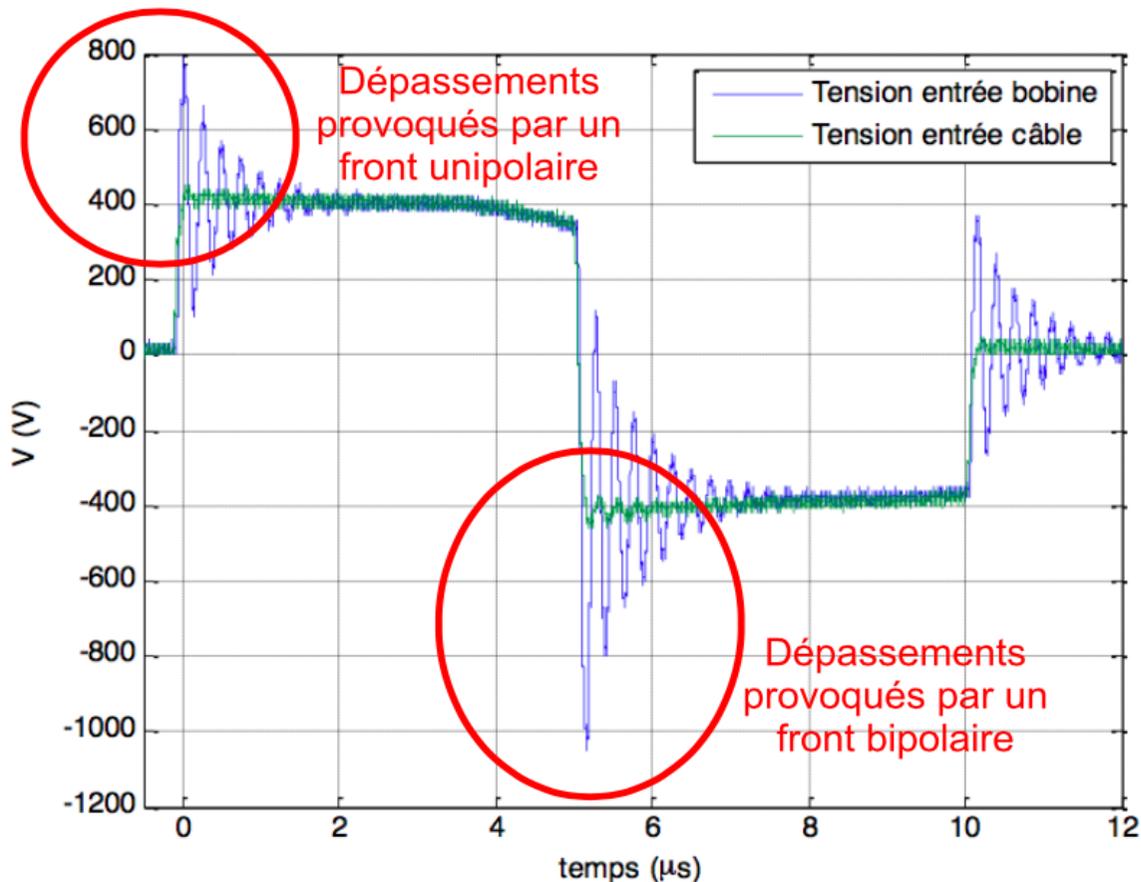
- Point faible des moteurs : isolation inter spires (distances faibles, quelques dizaines de μm).
- Il est encore illusoire de faire une imprégnation parfaite qui comble toutes les zones d'air entre tous les fils émaillés d'un moteur : une seule bulle d'air de quelques $10\mu\text{m}$ crée un point faible qui détruit rapidement le bobinage si des DP apparaissent.
- Aux pressions réduites, le seuil d'apparition des DP diminue.
- Les DP sont des phénomènes très courts (qqs 10ns), plus courts que les temps de montée des impulsions MLI créées par les composants actuels.
- Les temps de montée plus courts des composants électroniques SiC ont une conséquence indirecte : l'augmentation des pointes de tension du régime transitoire qui suit chaque front.
- Les impulsions unipolaires répétitives créent peu de DP car les surfaces isolantes restent chargées. Les DP sévères se produisent lors des inversions de la polarité.
- Les DP érodent lentement la couche isolante des fils émaillés. Sous tension constante, le phénomène s'accélère vers un court-circuit franc.
- Avec des fils émaillés classiques, les durées de vie avec DP sont très réduites par rapport au temps de fonctionnement attendu de 20000h .

Première voie d'amélioration possible: vivre avec les DP

Il existe des fils émaillés « corona résistants » qui supportent mieux les DP :

- Fil émaillé + vernis d'imprégnation nanochargé de particules inorganiques dures (SiO₂ ...).
- Fil guipé avec un film comportant du mica (polymère + mica)

Problème : manque de recul sur les durées de vies effectives en présence de DP.



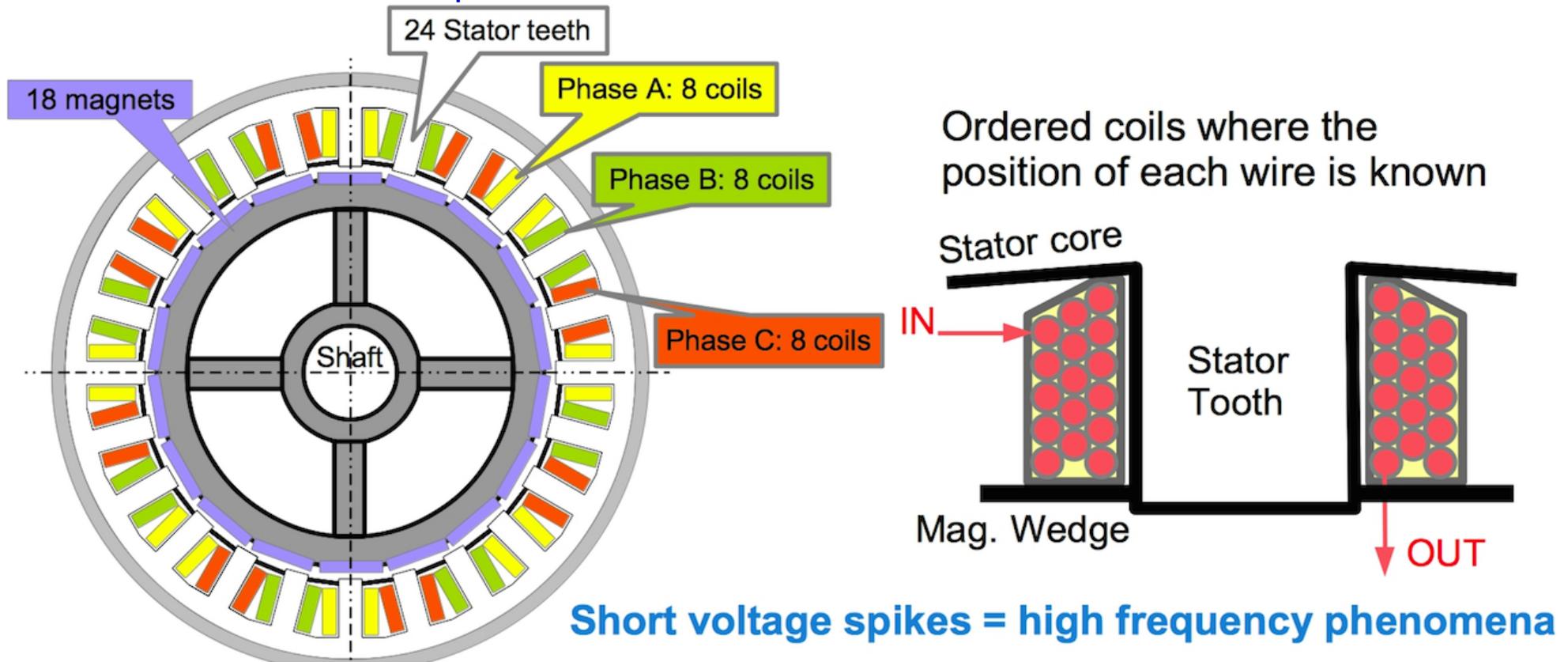
Des essais de vieillissement longs sont en cours à Béthune (un peu au dessus du SADP un essai avec du fil classique dure plusieurs mois)

- Contrainte impulsionnelle bipolaire d'amplitude variable.
- Fréquence élevée (50 kHz).
- Objets divers (éprouvettes, bobines, moteurs) connectés avec un câble.
- Mesure du nombre d'impulsions avant rupture.

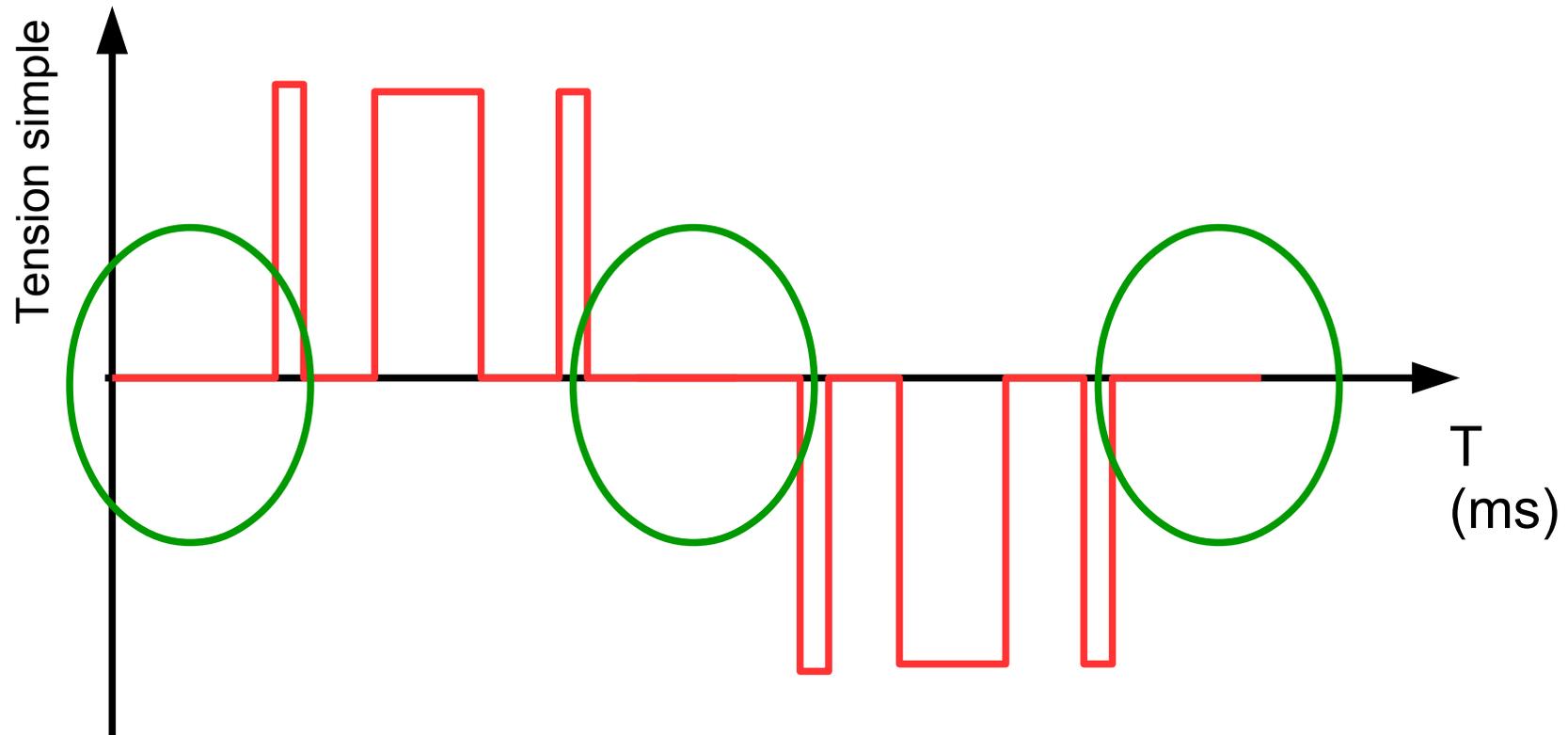
Seconde voie d'amélioration possible: concevoir des machines « free of PD »

- Eviter les bobinages répartis en vrac.
- Préférer les machines construites avec des bobinages concentrés (1 bobine ordonnée par dent).
- Estimer les contraintes sur chaque spire en utilisant un schéma équivalent HF et un logiciel de simulation.
- Optimiser les bobines pour que les pointes de tension restent sous le SADP, à la pression de travail.

Défi : changer les habitudes de conception des machines et gérer les couples harmoniques



Troisième voie d'amélioration possible: agir sur le découpage MLI



Prévoir des temps sans impulsion au voisinage de l'inversion de la polarité des valeurs moyennes des tensions simples pour éviter les fronts bipolaires.

=> DP moins nombreuses



Merci de votre attention

des questions ?