REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE D_R. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE.

Département de génie électrique.



Projet de Fin d'Etude

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en électrotechnique
Spécialité :

Réseaux Electriques

THEME :

Modélisation et simulation des différents générateurs en très haute tension

Proposé et dirigé par :

Pr. GACEMI.Abderrezak.

Mme. BOUKIRAT.Samia.

Préparé et présenté par :

Mlle. LAROUSSI DILMI RIHAB

Année Universitaire :

2023/2024

Remerciement

Je remercie tout d'abord Dieu de m'avoir donné la santé et

Le Courage pour inspirer la connaissance.

J'ai adressé en premier termeme sincères remerciements à la famille de L'Université de Médée –YAHYA FARES- surtout pour ces encouragements et ses conseils.

Je remercie en deuxième terme Dr.GACEMI ABDERREZAK

Merci à MADAME BOUKIRAT pour encadré mon Mémoire

Je remercie également Les membre du jury pour accepter de corriger

Mon travail .

je montre enfin mon gratitude à

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin

Pour atteindre ce continuum. Merci .

RIHAB

Dédicace

Ce travail vise à :

*Tout d'abord à mes parents qui ont fait beaucoup de sacrifices

Pour me permettre d'atteindre mes objectifs.

*À mon frère

A mon promoteur M.R GACEMI ABDERREZAK

À mon promotrice BOUKIRAT SAMIA

A tous mes chers amis,

À tous mes collègues spécialement :

AYA, IBTIHAL

À tous mes professeurs d'université - Yahya FaresMedea

Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin

RIHAB

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I :Généralités et concepts de base de la THT

I.1-Introduction :.....2

I.2- Généralités sur la haute tension :.....2

I.2.1- Définition : 2

a. Seuils de tensions.....3

b. domaines d'application de la haute tension :.....3

I.2.2-Types de tension conventionnelle.....4

I.3- La technologie HVDC :.....4

I.3.1-Définition :.....4

I.3.2-Familles technologiques de connexions à courant continu :.....4

I.3.3-L'utilisation :.....4

I.3.4- Les composants d'un système de transmission en CCHT.....5

I.3.5-Configuration d'une transmission dc [principe des types des liaisons transport en courant continu haut tension (HVDC).....6

I.3.6-Avantages d'un système en CCHT : 6

I.3.7-Inconvénients d'un système en CCHT 6

I.4- La technologie HVAC :.....6

I.4.1-Définition :.....6

I.4.2-Familles technologiques de connexions à courant alternatif :.....7

I.4.3- Avantages et Inconvénients :.....7

a-Avantages 7

b-Inconvénients.....7

I.4.4-La différence entre la technologie de CCHT et de CAHT 8

I.5- Surtensions :.....9

I.5.1- Définition :.....9

a) Transversales :.....9

b) Longitudinales :.....9

I.5.2- Origines des surtensions :.....9

A. Une origine interne.....9

B. Une origine externe.....9

Table des matières

I.5.2.1- Les surtensions temporaires :.....10

I.5.2.2 - Les surtensions de manœuvre.....10

I.5.2.3 - Les surtensions de foudre (atmosphérique).....12

I.6-Nature et phénomène de la foudre :.....13

I.6.1-Définition :.....13

I.6.2-L'origine des surtensions de la foudre :.....15

a-La foudre sur les lignes aériennes.....15

b- La foudre sur la terre :.....15

c- La foudre par rayonnement :.....15

I.6.3- Types de coup de foudre :.....15

a-Le coup de foudre direct :.....15

b-Le coup de foudre indirect :.....16

I.6.4-Classification et courant de la foudre :.....17

- ❖ **Onde de choc conventionnelle.....18**
- **Coup de Foudre négatif.....18**
- **Coup de Foudre positif :.....19**

I.7-Conclusion :.....19

Chapitre II : Générateurs de la haute tension

II.1- Introduction :.....20

II.2- Dimensionnement des sources d'essais.....20

II-3 -Générateurs de la haute tension :.....20

II.3.1 - Générateurs d'essais HT à fréquence Industrielle (alternatifs).....20

II.3.1.a - Transformateur d'essais élévateur :.....20

II .3.1.b -Transformateur d'essai en cascade.....22

II-3.1.c- Circuit résonant 23

II-3.2 Générateurs d'essais HT continus :.....25

II.3.2.a- Redressement simple et double alternance :.....25

II.3.2.b- Montage doubleur de tension de Schenkel.....27

II .3.2.c- Montage multiplicateur de tension de Greinacher :.....29

Table des matières

II.3.2.d- Multiplicateur de tension continue.....30

II-3.3 Générateurs d'essais HT de choc.....30

II-3.3.1 Générateur de Tesla.....30

- **Tension de choc ou impulsionelle.....32**

II-3.3.2 Générateur de choc à un étage 33

II-3.3.3 Générateur de choc de Marx à plusieurs étages.....34

- ✓ **1ère phase : le sectionneur I est fermé.....35**
- ✓ **2ème phase : le sectionneur I ouvert.....36**

II-4 –Conclusion.....38

Chapitre III : *Simulation des générateurs de haute tension*

III.1-Introduction :.....39

III.2 -Objectifs :.....39

III.3 -Générateur de tension continue :.....39

III.3.1- Définition :.....39

III.3.2- Constitution :.....40

III.3.3 -Avantages :.....40

III.3.4 –Simulation :.....40

III.3.4.1 -Description de schéma de conception :.....40

III.3.4.2- Générateur de tension continue à un étage :.....41

III.3.4.3 -Générateur de tension continue à deux étages :.....44

III.3.4.4- Générateur de tension continue à trois étages :.....45

III.3.4.5 - Générateur de tension continue à quatre étages :.....47

III.3.4.6- Générateur de tension continue à cinq étages :.....49

III.3.4.7 - Interprétation des résultats :.....52

III.4- Générateur de tension d'impulsion :.....53

III.4.1- Définition :.....53

III.4.2- Constitution :.....53

III.4.3- Simulation :.....54

Table des matières

III.4.3.1- Générateur de tension de choc à un étage :.....54

III.4.3.2-Générateur de tension de choc à deux étages :.....55

III.4.3.3-Générateur de tension de choc à trois étages :.....57

III.4.3.4- Générateur de tension de choc à quatre étages :.....58

III.4.3.5 -Générateur de tension de choc à cinq étages :.....60

III.4.3.6 -Interprétation des résultats :.....61

III.5-Conclusion :.....62

Conclusion générale 64

Chapitre I

Généralités et concepts de base de la THT

Liste des figures :

Figure I-1 : Arc électrique.....2

Figure I-2 : Les composants d'un système de transmission de haute tension DC…….....5

Figure I-3 : Corridor de la line de transmission à courant continu.....8

Figure I-4 : Corridor de la line de transmission à courant alternatif……...….8

Figure I-5 : Exemple de surtensions ……....……..9

Figure I-6 : Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement…….....10

Figure I-7 : Enclenchement d'une ligne à vide ……...…...11

Figure I-8 : Réamorçage après déclenchement d'une ligne à vide ……...….11

Figure I-9 : Oscillation de déclenchement amortie ……...…..12

Figure I-10 : Escalade de tension lors de la séparation d'un banc de condensateurs du réseau par un appareil à manœuvre ……...……..12

Figure I-11 : coup de foudre …….….....13

Figure I-12 : Nuage orageux ……...……..14

Figure I-13 : Les violents courants d'air ascendants…….…….14

Figure I-14 : Coup de foudre direct sur une ligne ……..……16

Figure I-15 : Coup de foudre indirect…….…….17

Figure I-16 : coups de foudre……..……...17

Figure I-17 : courbe du coup de foudre……..……..18

Figure I-18 : Courbe d'onde de choc conventionnelle…….....19

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Les principaux domaines d'application de la haute tension…….....……3

Chapitre II

Générateurs de la haute tension

Liste des figures :

Figure II.1 : Transformateur HT d'essais ……..……21

Figure II.2 : Transformateur d'essai en cascade ……...…….22

Figure II.3 : circuit résonant ……....……24

Figure II.4 : Générateurs à circuit résonant séri……...…….24

Figure II.5 : Générateurs à circuit résonant parallèle……....……25

Figure II.6 : Redressement simple alternance……....…….26

Figure II.7 : Tension après redressement……....……26

Figure II.8 : Redressement double alternance……....……27

Figure II.9 : Tension après redressement……....…....27

Figure II.10 : Montage doubleur de tension de Schenkel……....….....28

Figure II.11 : Tension après redressement de sortie du transformateur HT…....….....28

Figure II.12 : Montage multiplicateur de tension de Greinacher…….....29

Figure II.13 : Multiplicateur de tension continue ……....….30

Figure II.14 : Générateur de Tesla……....…..31

Figure II.15 : Tensions d'entrée U1 et de sortie U2……....……...31

Figure II.16 : Tension de choc……....…….33

Figure II.17 : Générateur de choc à un étage……....……33

Figure II.18 : Générateur de choc de Marx à plusieurs étages…….....……..35

Figure II.19 : Générateur de choc de Marx à plusieurs étages après la fermeture du sectionneur I…….....……36

Figure II.20 : Générateur de choc de Marx à plusieurs étages après l'ouverture du sectionneur I (front de l'onde de choc)…….....……37

Figure II.21 : Générateur de choc de Marx à plusieurs étages après l'ouverture du sectionneur I (queue de l'onde de choc)…….....……38

Liste des tableaux :

Tableau II.1 : Les capacités d'essai de quelques objets d'essai en Pf…….....……22

Chapitre III

Simulation des générateurs de haute tension

Liste des figures :

Figure III-1 :Schéma de la conception d'HVDC…….....…..41

Figure III-2 : Générateur à un étage…….....…..42

Figure III-3 :Tension primaire du transformateur…….....…….42

Figure III-4 : Tension secondaire du transformateur…….....…….43

Figure III-5 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du premier étage…....….43

Figure III-6 : Générateur à deux étages…….....…...44

Figure III-7 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du deuxième étage…....45

Figure III-8 : Générateur à trois étages…….....…46

Figure III-9 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du troisième étage…....…47

Figure III-10 : Générateur à quatre étages…….....48

Figure III-11 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du quatrième étage…....49

Figure III-12 : Générateur à cinq étages…….....50

Figure III-13 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du cinquième étage.....…51

Figure III-14 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie aux bornes de chaque étage…….....……....52

Figure III-15 : Forme d'onde du choc de foudre…….....53

Figure III-16 : Générateur à un étage…….....…54

Figure III-17 : Courbe de la tension de sortie V1 (volt) de 1' étage 1…….....…..55

Figure III -18 : Générateur à deux étages…….……. 56

Figure III.19: Courbe de la tension de sortie V2 (volt) de 1' étage 2…….....…56

Figure III.20 : Générateur à trois étages…….....….57

Figure III.21: Courbe de la tension de sortie V3 (volt) de 1' étage 3…….....…58

Figure III.22 : Générateur à quatre étages…….....…….59

Figure III.23: Courbe de la tension de sortie V4 (volt) de 1' étage 4…….....……59

Figure III.24 : Générateur à cinq étages…….....…….60

Figure III.25: Courbe de la tension de sortie V5 (volt) de 1' étage 5…….....……61

Figure III.26: Courbes de tension impulsionelle aux bornes de chaque étage…....….....62

Glossaire des termes techniques

HT : Haute tension

i : le courant injecté.

Zc: L'impédance homopolaire caractéristique de la ligne

R : Résistance de la prise de terre.

DC : direct courant

AC : alternative courant

L : Inductance du pylône et/ou du conducteur de mise à la terre

HVDC : High Voltage Direct Current.

HVAC :High voltage alternatif current

D : diode

Ra : résistance d'amortissement de charge de C1,

C1 : capacité de charge,

V : tension continue aux bornes de C1,

E : éclateur,

R1 : résistance de front en série,

R2 : résistance de queue en parallèle,

C2 : capacité de l'objet d'essai,

V(t) : tension de choc.

R.T : régulateur de tension,

T.E : transformateur d'essai

O.E : objet d'essai

Glossaire des termes techniques

T1: durée de front,

T2: durée de queue ou durée de la demi-amplitude.

Icc : Le courant de court-circuit.

Ra : résistance d'amortissement.

Sn : La puissance nominale du transformateur.

T.P : Transformateur de puissance.

Uc : tension de claquage.

UN : tension nominale de la source.

ملخص :

يقدم هذا العمل محاكاة لمولدات التيار المستمر ذات الجهد العالي من ناحية، ومن ناحية أخرى، محاكاة مولدات جهد الصدمة.ولإجراء محاكاة نموذجية مصغرة، تم إنشاء (دارة كوكروفت-والتون و دارة جهد النبض متعددة المراحل).

تتكون دارة كوكروفت-والتون من خمس دارات مدعومة بمصدر متناوب 310 فولت_50 هرتز، وهي توفر جهدًا مباشرًا

تتكون دارة النبضة الصدمية من خمس دارات مدعومة بمصدر تيار مستمر بقدرة 30 كيلو فولت _ 50 هرتز، وتوفر جهد نبضي عالي جدًا بوحدة كيلو فولت.تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج Simulink-Matlab وPSIM.

الكلمات المفتاحية:

المحاكاة، المولدات، التيار المباشر، الجهد، النموذج المصغر، دائرة كوكروفت-والتون، النبض، التيار المتردد، البرمجيات، Simulink-Matlabو.PSIM

Résumé :

Ce travail présente la simulation de générateur de haute tension continue d'une part, et d'autre part, à la simulation des générateurs de la tension de choc. Pour se faire des simulations de prototype miniature (un circuit de Cockcroft-Walton et multi-étage de choc) ont été établies.

Le circuit de Cockcroft-Walton est composé de cinq étages alimentés par une source alternative 310 V_50 Hz, il délivre une tension continue.

Le multi-étage de choc est composé de cinq étages alimentés par une source continue 30 kV _50 Hz, il délivre une tension d'impulsion très élevée en KV.La simulation a été réalisée à l'aide du logiciel Simulink-Matlab et PSIM.

Mots clés :

Simulation, générateurs, courant continu, tension, prototype miniature, circuit Cockroft-Walton, impulsionelle, alternatif, logiciel, Simulink-Matlab et PSIM.

Summary :

This work presents the simulation of high voltage DC generator on the one hand, and on the other hand, the simulation of surge voltage generators. To make miniature prototype simulations (a Cockcroft-Walton circuit and multi-stage shock) were established.

The Cockcroft-Walton circuit is made up of five stages powered by a 310 V_50 Hz alternating source, it delivers a direct voltage.

The multi-stage shock is made up of five stages powered by a 30 kV _50 Hz DC source, it delivers a very high impulse voltage in KV.The simulation was carried out using Simulink-Matlab and PSIM software.

Keywords :

Simulation, generators, direct current, voltage, miniature prototype, Cockroft-Walton circuit, pulse, alternating, software, Simulink-Matlab and PSIM.

Introduction générale

Introduction générale

Aujourd'hui, les besoins en énergie électrique ne cessent de croître et face à cette évolution, la communication entre les réseaux électriques via des systèmes à courant continu (HVDC) etcourant alternatif (HVAC) se développe de plus en plus. Cependant, afin de répondre aux besoins et aux contraintes résultant de la dérégulation des réseaux, il est nécessaire que ces systèmes d'interconnexion présentent des performances dynamiques et une robustesse élevée[1].

La foudre est un phénomène naturel de décharge électrostatique perturbatrice qui peut se produire lorsqu'une grande quantité d'électricité statique s'accumule dans les zones de nuages orageux, à l'intérieur de ces nuages, entre eux ou entre ces nuages et le sol. La foudre provoque chaque année la mort de plusieurs dizaines de personnes et d'animaux. Il est également responsable d'un grand nombre de dommages différents sur les équipements électriques et électroniques.[2]

Les générateurs de haute tension sont des dispositifs qui convertissent une tension électrique basse en une tension beaucoup plus élevée. Ils sont essentiels dans de nombreuses applicationsoù une haute tension est nécessaire, comme celles mentionnées précédemment. Ces générateurs utilisent généralement des transformateurs, des redresseurs et des circuits de régulation pour produire une tension continue ou alternative élevée et stable. Ils peuvent être de différents types, tels que les générateurs à impulsions, les générateurs de courant continu et les générateurs de courant alternatif. Ces dispositifs jouent un rôle crucial dans de nombreux secteurs et contribuent à de nombreuses avancées technologiques et scientifiques.

Pour atteindre l'objectif de ce travail, j'ai subdivisé ce mémoire en 3 chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

- Dans le premier chapitre, je définirai les généralités et les concepts de base du THT
- Dans le deuxième chapitre j'exposerai les générateurs de la haute tension :
  - ✓ Générateurs de haute tension continue.
  - ✓ Générateurs de haute tension alternative.
  - ✓ Générateurs de tension de choc.
- Le troisième chapitre est consacré à la simulation des deux types des générateurs de haute tension (Générateur de tensions continues, Générateur de tension de choc).

En fin je terminerai par une conclusion discutant les résultats obtenus et les perspectives d'avenir.

Chapitre I

Généralités et concepts de base de la THT

I.1-Introduction :

Dans ce chapitre j'ai donné tout d'abord une étude théorique portant sur les généralités de la haute tension (définition, Types de tension conventionnelle). Par la suite j'ai présenté les différentes technologies d'électronique de puissance utilisées pour le transport de l'électricité en courant continu et en courant alternatif à haute tension (HVDC , HVAC).Finalement j'ai consacré à la phénoménologie de la foudre (définition, l'origine des surtensions de la foudre , types de coup de foudre et classification et courant de la foudre …etc.) ainsi que son interaction sur les réseaux électriques.

I.2- Généralités sur la haute tension :

I.2.1- Définition :

Une haute tension est toute tension qui engendre, dans les composants d'un système, des champs électriques suffisamment intenses pour modifier, de manière significative, les propriétés de la matière, en particulier des matériaux isolants. Alors, l'étude de la haute tension aboutit à la conception et à la réalisation de produits, appareils et systèmes aptes à générer et à supporter des champs électriques élevés.[3]

Les systèmes à haute tension sont souvent le siège de phénomènes non linéaires et complexes, où se produisant à partir d'un seuil. Exemple : l'arc électrique, effet couronne, claquage des matériaux isolants (solides, liquide), etc....[3]



Figure I.1: Arc électrique [3].

a. Seuils de tensions:[3]

- Basses tensions : au-dessous de 1 kV.

- Moyennes tensions : 1 ~ 33 kV.

- Hautes tensions : 33 ~ 230 kV

- Très hautes tensions : 230 ~ 800 kV.

- Ultra hautes tensions : au-dessus de 800 kV.

b. domaines d'application de la haute tension:

Le tableau**(I.1)** résume les principaux domaines d'application de la haute tension [3-4]

Tableau I.1 : Les principaux domaines d'application de la haute tension [3].

Domaines	Applications
Réseaux électrique	- tension alternative. - tension continue. - lignes aériennes. - transformateurs de mesure de tension. - transformateurs de mesure de courant. - transformateurs de puissance. - alternateurs.
Electrostatique	- générateurs électrostatiques. - moteurs électrostatiques.
Médecine	- effets biologiques des champs électriques - diagnostique par rayons X. - thérapie par rayons X
Foudre	- captage de la foudre. - protection contre la foudre (paratonnerre, Parafoudre, câble de garde).

I.2.2-Types de tension conventionnelle :[4]

La haute tension est divisée en 3 types, tels que :

- Haute tension en courant alternatif (ACHT).

- Haute tension en courant continu (CCHT).

- Haute tension impulsionelle (Tension de choc).

I.3- La technologie HVDC :

I.3.1-Définition:

Le courant continu haute tension CCHT, , est une technologie d'électronique de puissance utilisée pour le transport de l'électricité en courant continu à haute tension.[5]

I.3.2-Familles technologiques de connexions à courant continu :

Il existe deux grandes familles technologiques de connexions à courant continu :[6]

- L'une fonctionne en source de courant, utilisant des thyristors, appelée « Line-commutated converters » (LCC) soit« convertisseurs commutés par la ligne» ;
- L'autre fonctionne en source de tension, utilisant des IGBT développées dans les années 1990 et appelées « Voltage-source converters » (VSC) soit« convertisseurs de source de tension ».

La première sert au transport de grande ou très grande puissance, jusqu'à 7 600 MW, avec des tensions allant jusqu'à ±800 kV, sur de grandes distances, jusqu'à 2 500 km. La seconde, plus réglable, plus compacte, ne nécessitant pas un réseau « fort », est particulièrement adaptée au transport d'électricité provenant des éoliennes offshore ou au transport d'électricité par câble en polyéthylène réticulé , donc sans huile minérale. Elle a cependant une puissance maximale limitée à 1 GW.[6]

I.3.3-L'utilisation :[6]

La haute tension continue est utilisée dans de nombreuses applications, telles que :

- Réseaux HVDC (High Voltage Direct Current).
- Recherche fondamentale : il est plus facile de travailler et d'analyser les phénomènes avec une tension constante qu'avec une tension constamment variable.
- De nombreuses applications nécessitent une tension continue (rayons X de la radiologie, séparation électrostatique, filtre électrostatique…).
- Dans les applications ou les essais de test d'équipement à charge capacitive sont très nombreux ; pour des raisons économiques on évite la tension alternative.

I.3.4- Les composants d'un système de transmission en CCHT [6] :

Les trois éléments principaux d'un système de transmission en CCHT sont les suivants :

-1-La station de conversion au niveau des extrémités de transmission et de réception.

-2- Le support de transmission.

-3-Les électrodes.

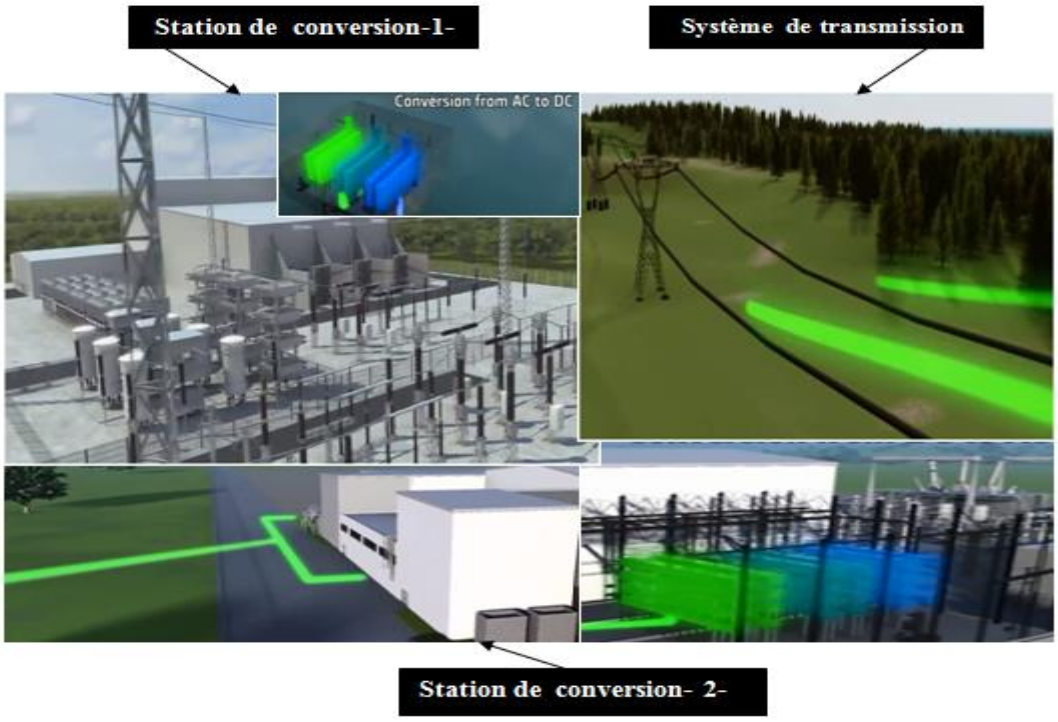


Figure I.2 : Les composants d'un système de transmission de haute tension DC [6].

I.3.5-Configuration d'une transmission dc [principe des types des liaisons transporté en haute tension courant continu (HVDC) :

Les systèmes HVDC peuvent être classifiés en cinq catégories :[7]

1. Liaisonnons polaire
2. Liaison bipolaire
3. Les liaisons "back-to-back"
4. Les liaisons entre deux terminaux
5. Les liaisons multi terminaux.

I.3.6-Avantages d'un système en CCHT : [8]

•Pas de limite de distance transmise, car il n'ya pas de consommation de réactive.

• Faibles pertes.

•Faible encombrement.

•Contrôle très rapide du flux de puissance, ce qui implique des améliorations de stabilité.

•Direction du flux de puissance peut être changée très rapidement.

I.3.7-Inconvénients d'un système en CCHT [8]

•Les inconvénients de CCHT sont en conversion, commutation et de contrôle.

•Onduleurs coûteux avec capacité de surcharge limitée.

I.4- La technologie HVAC :

I.4.1-Définition:

Le courant alternatif haute tension CAHT , est une technologie d'électronique de puissance utilisée pour le transport de l'électricité en courant alternatif à haute tension.

La technologie de transmission de haute tension à courant alternatif (HVAC) est le système le plus utilisé depuis le début de XX siècle, elle est utilisée pour transporter

l'énergie électrique entre les centrales de production de l'énergie électrique et les consommateurs.[9]

I.4.2-Familles technologiques de connexions à courant alternatif :

Le système de transmission HVAC utilise les câbles aériens, souterrains ou sous-marins, Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux.[6]

I.4.3- Avantages et Inconvénients :[5]

Le système de transmission HVAC présente des avantages et des inconvénients comme les autres systèmes dans l'industrie, Ces avantages et inconvénients sont mentionnés dans les sections suivantes :

a-Avantages [5]

1. La perte d'énergie électrique est faible sur de courtes distances.

2. Le système de transmission HVAC ne nécessite pas de groupes électrogènes auxiliaires.

b-Inconvénients [5]

1. La perte d'énergie électrique dans de grandes distances.

2. Il utilise plusieurs câbles pour transporter des grandes puissances d'énergie électrique

3. Les câbles aériens, souterrains ou sous-marins génèrent des quantités importantes de puissance réactive.

4. L'impossibilité d'utilisation dans l'énergie éolienne offshore, ce qui est possible dans les mers, les océans et les grandes rivières.

5. Il est caractérisé par l'encombrement, en particulier dans les grands parcs éoliens.

6. Difficile à entretenir, surtout dans des conditions météorologiques. Cependant, cela pose un risque pour les ouvriers d'entretien.

7. Pour ses inconvénients, on a abouti à un nouveau système de transport développé par les chercheurs appelé HVDC.

I.4.4-La différence entre la technologie de CCHT et de CAHT [10-11]

Il ya un certain nombre de différences entre AC et DC :

1-Les pertes en ligne sont nettement inférieurs pour la transmission en DC.

2-Le coût d'une ligne d'alimentation est moins cher pour la transmission en DC.

3-Lorsque DC est utilisé, le flux de puissance dans la ligne peut être contrôlé.



Figure I.3 : Corridor de la line de transmission à courant continu. [10-11]

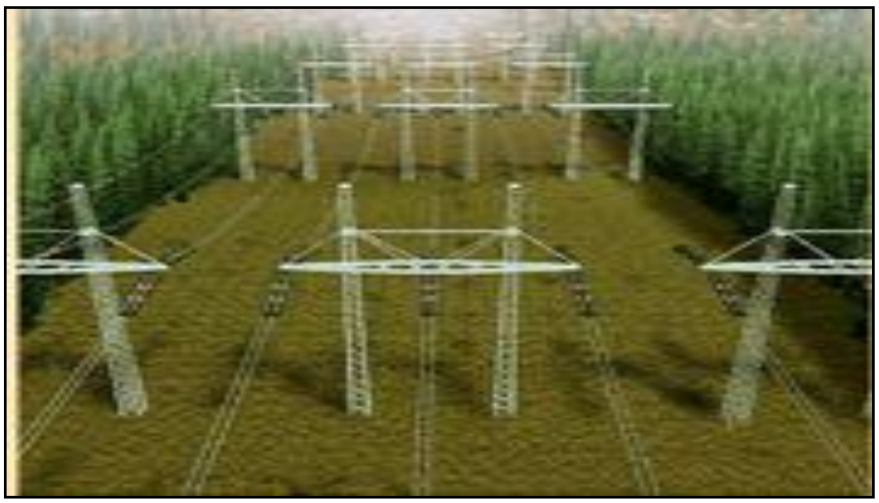


Figure I.4: Corridor de la line de transmission à courant alternatif. [10-11]

I.5- Surtensions :

I.5.1- Définition :

La surtension est toute différence de potentiel anormale apparaissant dans les circuits électriques et qui est susceptible d'endommager les éléments de ces circuits (lignes, machines, etc..)[12].

Ce sont des perturbations qui se superposent à la tension nominale du circuit. Elles peuvent apparaitre :[13]

- Entre phases ou entre circuits différents, appelé mode différentiel.
- Entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre, appelé mode commun.

On distingue deux sortes de surtensions [14] :

a) **Transversales:** apparaissant entre un conducteur et la terre ou entre deux conducteurs.

b) **Longitudinales:** ou entre spires, correspondant à un accroissement exagéré de la différence de potentiel entre deux points voisins d'un même conducteur

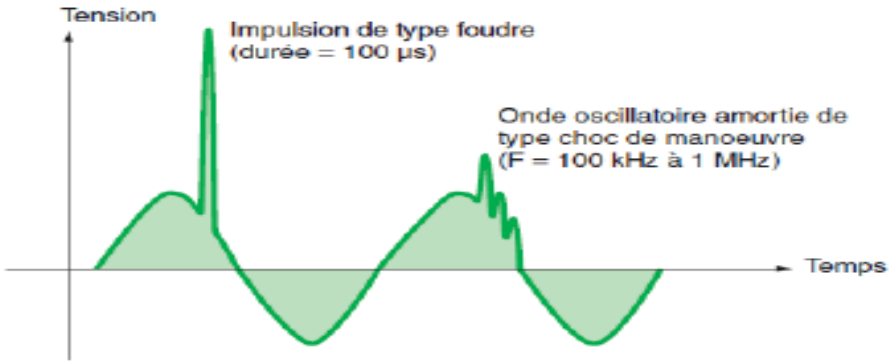


Figure I.5 : Exemple de surtensions [15]

I.5.2- Origines des surtensions :

Les surtensions peuvent avoir deux origines [15] :

A. **Une origine interne** : liée à l'exploitation même des réseaux : ce sont les surtensions temporaires et les surtensions de manœuvre.

B. **Une origine externe** : ce sont les surtensions dues aux coups de foudre.

I.5.2.1- Les surtensions temporaires :

Les surtensions temporaires sont les surtensions à fréquence industrielle qui résultent des changements brusques de configuration du réseau, qu'ils soient provoqués ou fortuits (par exemple déclenchement de charge active ou réactive, apparition d'un défaut à la terre, etc.), et dont la durée dépend de la rapidité de réponse des systèmes de protection et des régulateurs de vitesse des alternateurs. Celle-ci varie de quelques dixièmes à quelque secondes [16]

Quant aux niveaux qu'elles peuvent atteindre, ils dépendent de la configuration même du réseau sitôt après leur apparition et du point considéré dans le réseau. En un point donné, ces niveaux sont d'autant moins élevés que le réseau est puissant et maillé et que les mises à la terre sont nombreuses. On est toutefois limité dans cette voie par le double ceci de ne pas laisser croître trop les courants de défaut monophasé afin d'assurer les tenues thermiques et mécaniques des matériels et de réduire la gêne aux tiers, principalement due à la circulation du courant de défaut [16].

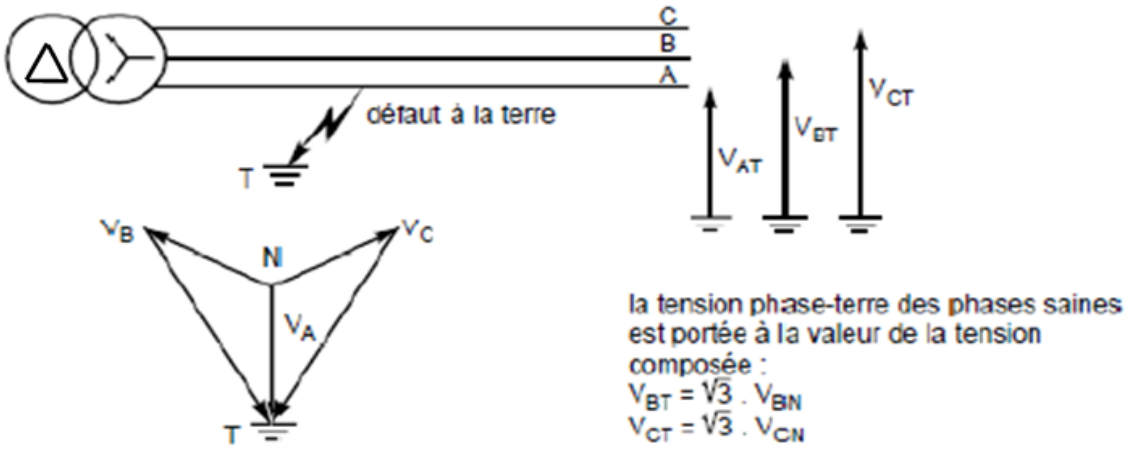


Figure I.6 : Surtension temporaire sur un réseau à neutre isolé de la terre, en présence d'un défaut d'isolement [16].

I.5.2.2 - Les surtensions de manœuvre :

Tout changement brusque de configuration d'un réseau (fonctionnement de disjoncteur, apparition d'un défaut, etc.) engendre également une surtension transitoire rapide, dite surtension de manœuvre qui se propage sur ce réseau et la durée de front peut s'échelonner de quelque dizaines de microsecondes à quelques dizaines de millisecondes [15].

Les surtensions de manœuvre ont des amplitudes par rapport à la terre et des formes différentes selon le point du réseau considéré ; de plus elles sont très sensibles à la configuration du réseau et ont un caractère aléatoire, c'est-a dire qu'une manœuvre déterminée en un point donné peut créer, selon le cas, des surtensions différentes .Ces surtensions sont les plus fortes lors de l'ouverture des disjoncteurs sur charge réactive(coupure de ligne à vide, de transformateur à vide, de défaut), et lors de la fermeture ou de la refermeture d'une ligne [15].

Dans le cas de l'ouverture d'une ligne à vide en 225 et 400 kV – ou d'une charge capacitive en général– l'emploi de disjoncteurs sans réamorçage, comme le sont les disjoncteurs modernes à air comprimé et à SF6satisfaisant aux normes NF C 64-115 et 64-116est de nature à éviter les surtensions de coupure élevées qui apparaissait avec les anciens disjoncteurs à huile [15].

➔ **Quelques formes possibles de la surtension de manœuvre :**

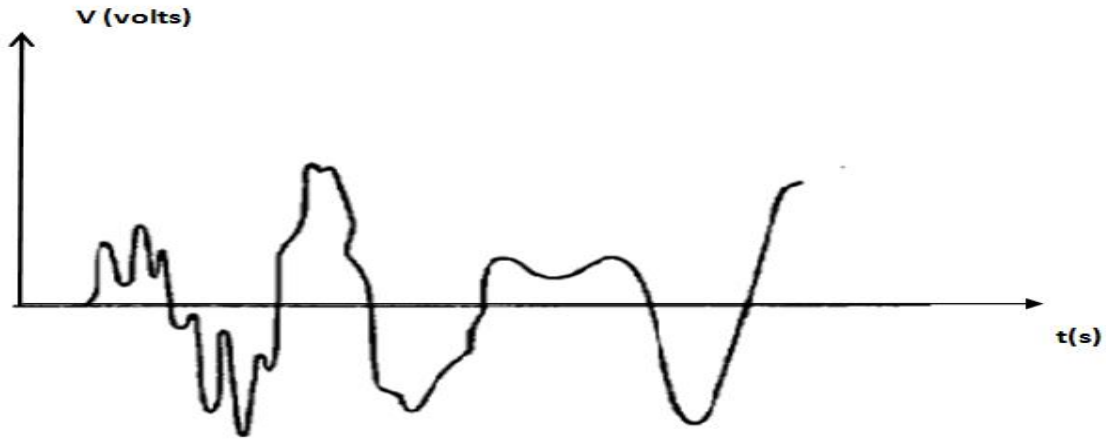


Figure I.7 : Enclenchement d'une ligne à vide [15].

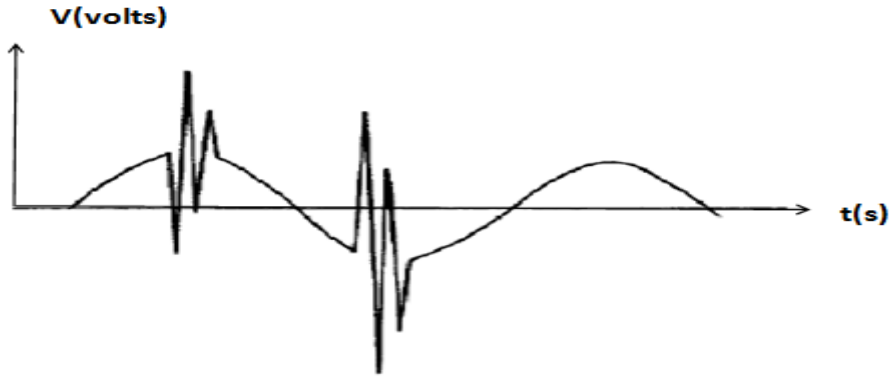


Figure I.8 : Réamorçage après déclenchement d'une ligne à vide [15].

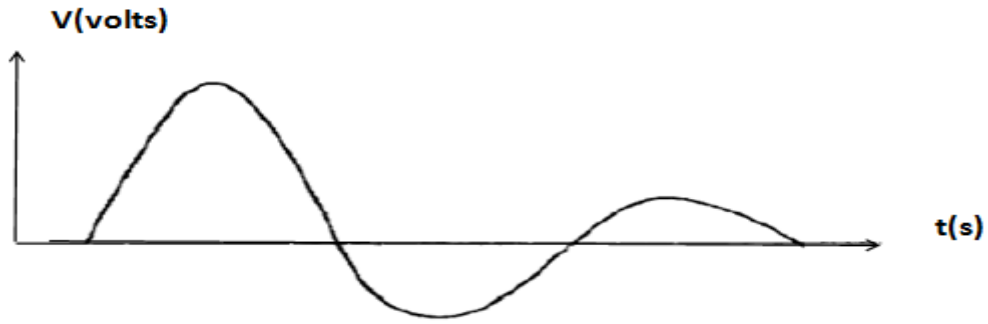


Figure I.9 : Oscillation de déclenchement amortie [15].

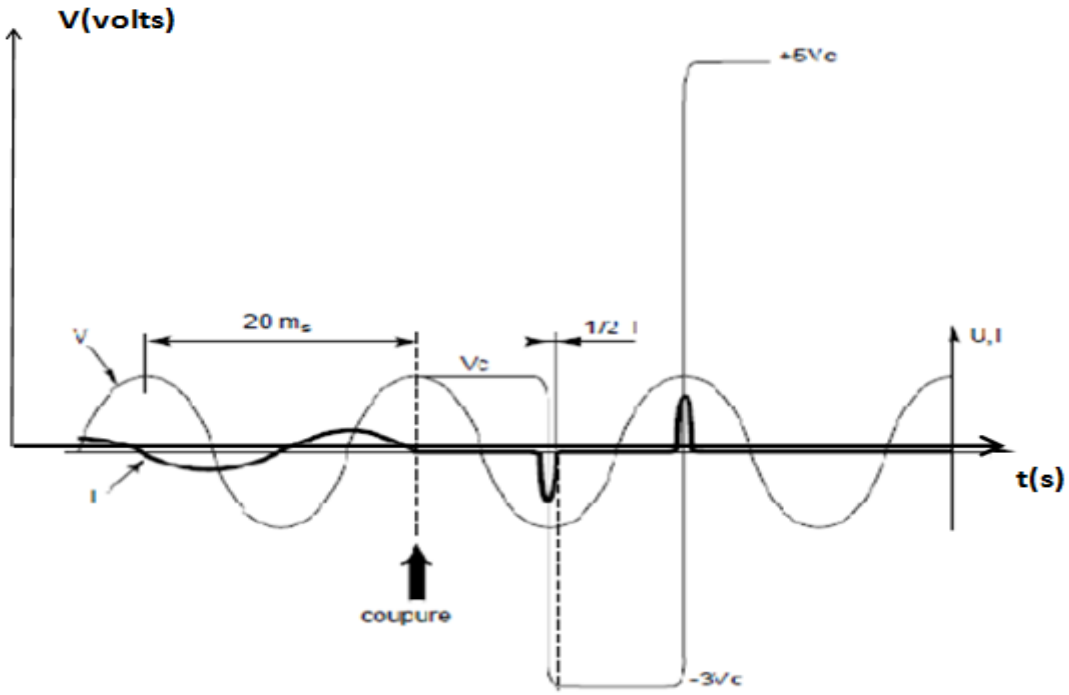


Figure I.10 : Escalade de tension lors de la séparation d'un banc de condensateurs du réseau par un appareil à manœuvre [15].

I.5.2.3 - Les surtensions de foudre (atmosphérique) :

Les surtensions de foudre n'ont leur amplitude limitée que par l'amorçage d'éléments du réseau, le plus souvent d'éléments de ligne, ou par celui des dispositifs de protection qui y sont placés. Lorsqu'un coup de foudre atteint une ligne, il peut frapper un conducteur de phase, un pylône ou le câble de garde de la ligne lorsqu'il existe. S'il atteint un conducteur de phase et est de faible, aucun amorçage n'a lieu et l'onde de courant de foudre se propage dans les deux directions en provoquant une montée en tension égale au produit du demi-courant de foudre par l'impédance d'onde de la ligne ; s'il est de forte amplitude, il peut donner lieu à un amorçage direct entre une phase et la

terre, créant alors une onde de tension coupée qui se propage dans les deux directions vers les postes les plus proches [15].

Il se peut également que le coup de foudre atteigne directement un support ou le câble de garde de la ligne lorsqu'il existe. Le courant de foudre s'écoule alors à la terre, mais en provoquant une élévation locale du potentiel de terre, donc de celui du support correspondant, d'autant plus grande que son intensité et l'impédance de terre sont élevées. Cette élévation de potentiel peut être suffisante pour créer un amorçage entre le support et une ou plusieurs phase, appelé communément amorçage en retour [15].

I.6-Nature et phénomène de la foudre :

I.6.1-Définition :

La foudre est une décharge électrique violente d'origine atmosphérique qui se développe entre un nuage et la terre, en un ou plusieurs coups. L'impact de la foudre sur une installation est équivalent à un générateur de courant très fort (10 à 100kA et plus), Ces surtensions sont très dangereuses dans la mesure où elles causent des dégâts importants au niveau de l'isolation des lignes de transmission et au niveau des équipements constituants le système d'énergie électrique.[17]

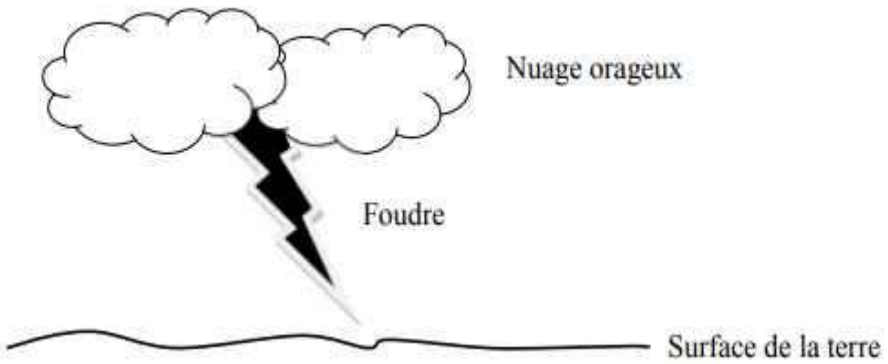


Figure I.11 : coup de foudre [17]

Le nuage orageux constitue une gigantesque machine thermique dont la base est à 2 km et le sommet à 14 km d'altitude environ.[18]

Sa constitution est rendue possible par l'élévation d'air chaud en provenance du sol. Lors de son ascension, cette masse d'air se charge d'humidité jusqu'à devenir un nuage. La partie supérieure ou il fait plus froid est occupée par les particules de glace,

tandis que les gouttes d'eau s'établissent dans la partie inférieure. Ces dernières se chargent positivement tandis que les gouttes d'eau prennent une charge négative.[18]

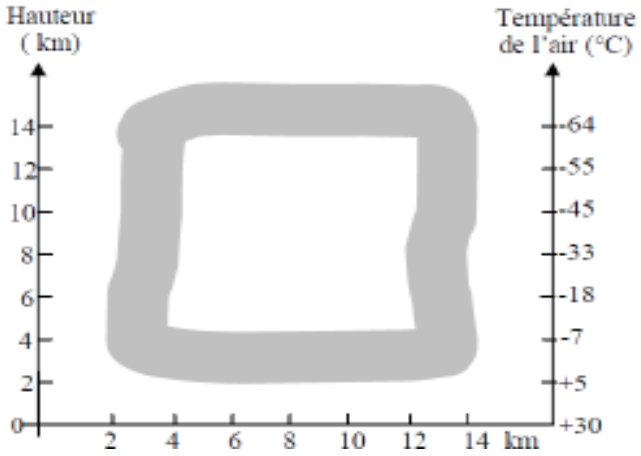


Figure I.12: Nuage orageux.[18]

Les violents courants d'air ascendants provoquent des collisions entre les gouttes d'eau et les microparticules de glace, ce qui provoque la création des charges électriques par frottement. Les microparticules de glace plus légères et chargées positivement, sont emportées par le courant d'air ascendant vers le haut, occupent la partie supérieure du nuage et forment le pôle positif. Tandis que les gouttes d'eau chargées négativement s'établissent dans la partie inférieure et créent le pôle négatif. Une petite quantité de charges positives demeurent à la base du nuage [18].

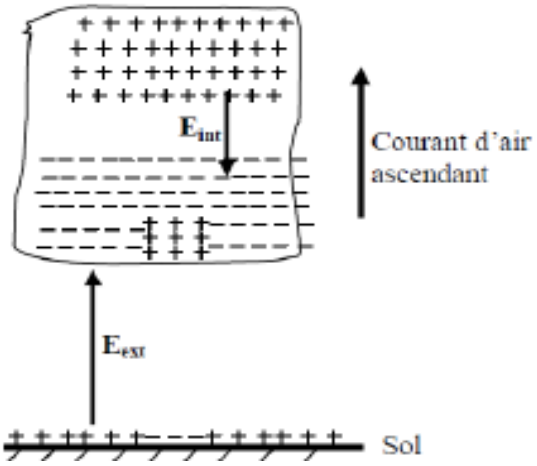


Figure I.13 : Les violents courants d'air ascendants.[18]

Le nuage fait apparaitre sur la terre, par influence électrique, une charge de signe opposé et crée ainsi deux véritables dipôles électriques : [18]

1. Un dipôle interne, génère entre les pôles positif et négatif du nuage : si le champ interne Int devient suffisamment grand, il provoque un claquage interne dans le nuage appelé éclair.
2. Un dipôle externe, entre la base nuage et la surface de la terre : si le champ externe Exit atteint les conditions critiques, il finit par provoquer une grande décharge entre le nuage et la terre appelé coup de foudre.

I.6.2-L'origine des surtensions de la foudre :

a-La foudre sur les lignes aériennes :

En touchant une ligne, la foudre crée une onde de courant de plusieurs milliers d'Ampères qui provoque une surtension sur les appareils raccordés à la ligne[17]

b- La foudre sur la terre :

En touchant le sol, la foudre provoque une remontée de potentiel électrique de la terre qui entraîne des surtensions dans les câbles souterrains et les prises de terre.[17]

c- La foudre par rayonnement :

Le champ électromagnétique crée par la foudre (plusieurs milliers de Volts par mètre à plus d'un kilomètre de son point d'impact) crée des surtensions sur les équipements électriques qui sont à plusieurs kilomètres autour du point de chute.[17]

I.6.3- Types de coup de foudre :

Il existe deux types de coup de foudre :

a- Le coup de foudre direct :

Il se manifeste par l'injection dans la ligne, d'une onde de courant de plusieurs dizaines de kA. Cette onde de courant, qui peut faire fondre des conducteurs en se propageant de part et d'autre du point d'impact (figure I.14), provoque une augmentation de la tension U donnée par la formule :[17]

$$U(t)=Zc\frac{I(t)}{2} \qquad (I.1)$$

Zc : Impédance caractéristique de la ligne.

I (t) : Le courant injecté.

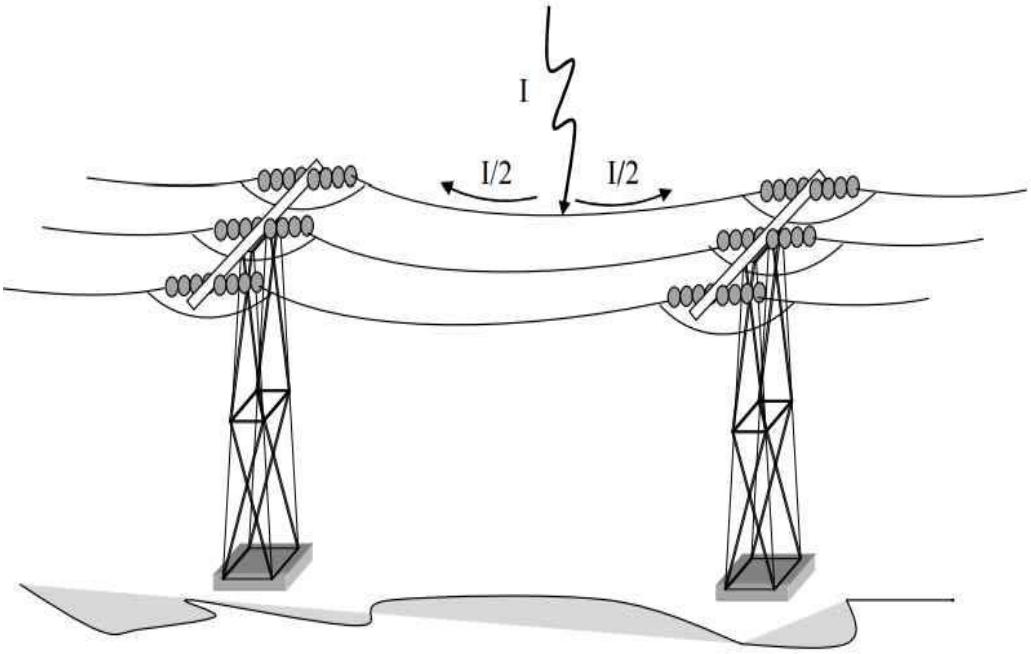


Figure I.14 : Coup de foudre direct sur une ligne [17]

b-Le coup de foudre indirect :

Si la foudre tombe à proximité de la ligne, le courant provoque une variation extrêmement rapide du champ électromagnétique. À cause des ondes électromagnétiques générées par la foudre, des surtensions sont induites dans des conducteurs situés loin du point d'impact. Ses effets se font sentir à plusieurs kilomètres. La surtension correspondante peut atteindre des centaines de KV

$$U(t)=R\frac{i}{2}+L\frac{di}{2dt} \qquad (I.2)$$

R : Résistance de la prise de terre.

L : Inductance du pylône et/ou du conducteur de mise à la terre. [19]

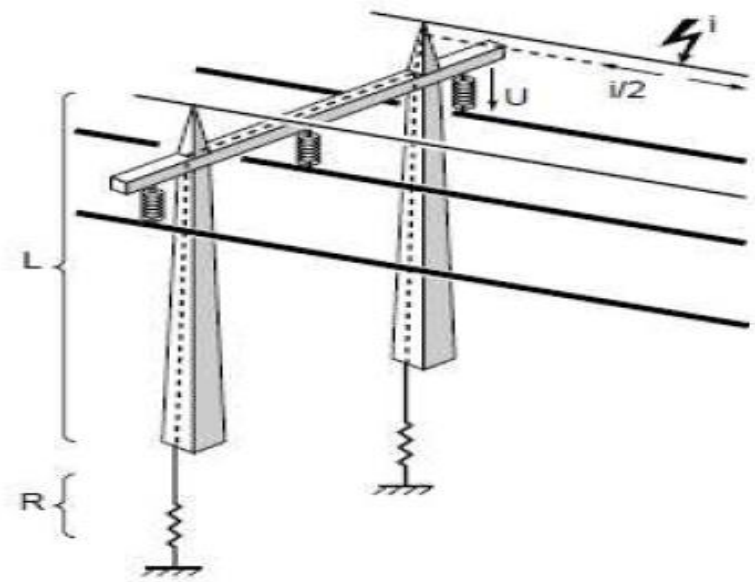


Figure I.15 : Coup de foudre indirect [19].

I.6.4-Classification et courant de la foudre :

Le traceur est une décharge préliminaire peu lumineuse qui se produit entre la terre et le nuage, préparant le chemin au canal de la foudre [20].

Les coups de foudre sont classes selon :

- ➔ Le sens de progression du traceur.
- ➔ Le signe de la charge qui se décharge.

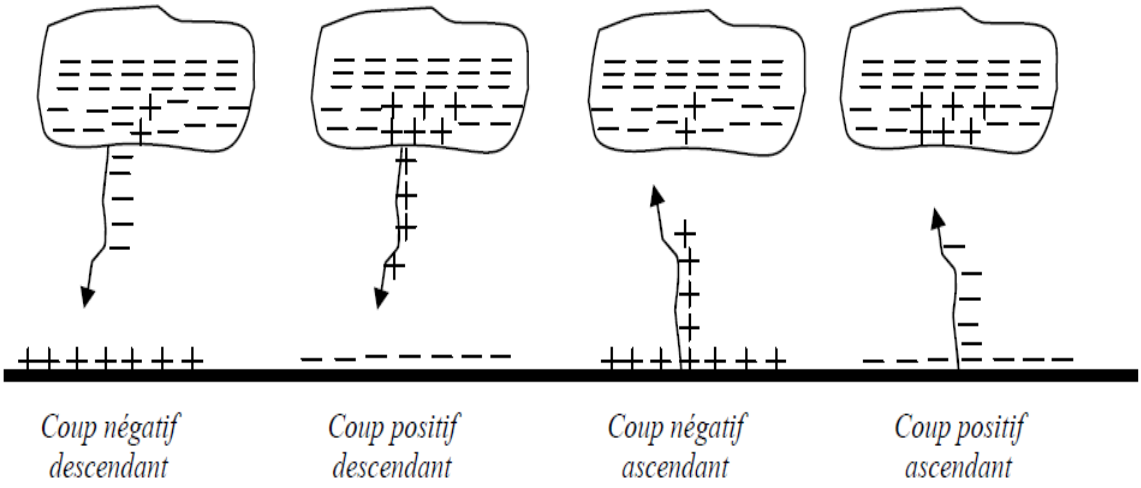


Figure I.16: Coups de foudre [20].

Plus de 80 à 90 % des coups de foudre sont de type négatif descendant, mais les plus énergétiques sont les positifs. En montagne, des coups négatifs ascendants peuvent se développer [20].

Le coup de foudre est équivalent à un générateur de courant. Le courant est constitué par les charges superficielles du sol qui remontent le canal ionisé du traceur : on observe alors un fait fortement lumineux qui progresse du sol en direction du nuage, avec une vitesse estimée à 10^8m/s. C'est « l'arc en retour » ou « return stroke » [20].

Un coup de foudre est en général constitué de plusieurs décharges partielles s'écoulant par le même canal ionisé. Lorsque la décharge principale est terminée, après une durée environ de 100 ms apparait une ou plusieurs décharges secondaires [20].

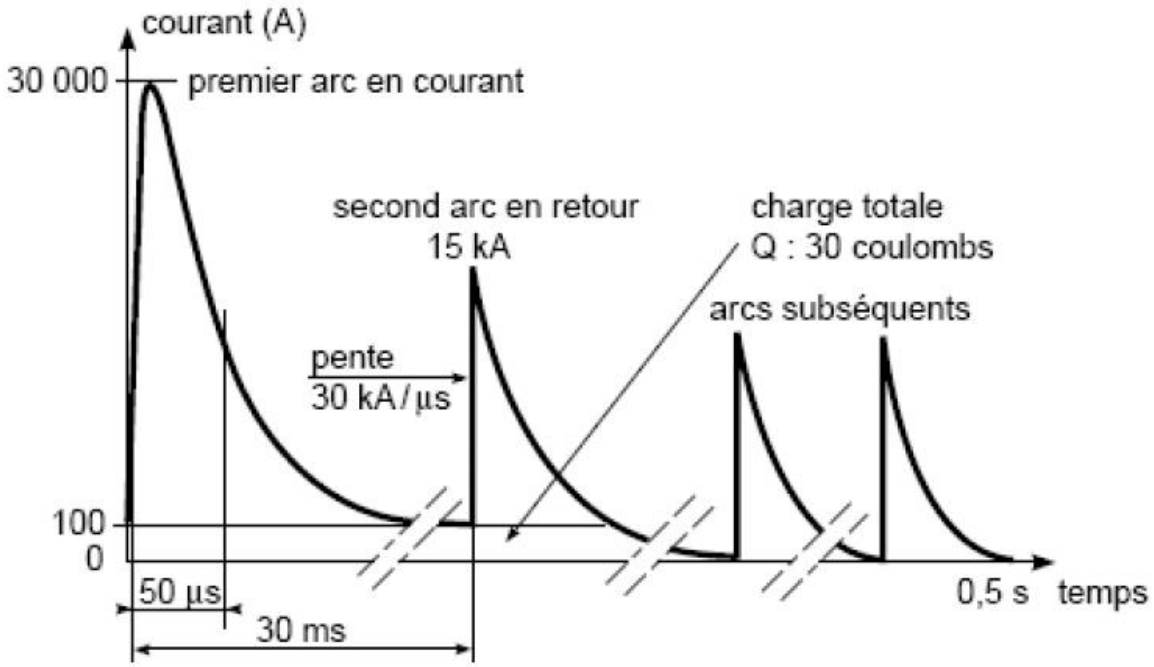


Figure I.17 : courbe du coup de foudre [20].

- Pour un CdF positif : I > 150 KA dans 10% des cas, I ≈ 50 KA dans 50% des cas.
- Pour un CdF négatif : I ≈ 50 KA dans 10% des cas, I≈8 KA dans 50% des cas.

❖ **Onde de choc conventionnelle:**

L'onde de choc conventionnelle est une onde normalisée que tous les constructeurs d'appareillage électrique HT utilisent pour effectuer les tests de contrôle [20,21].

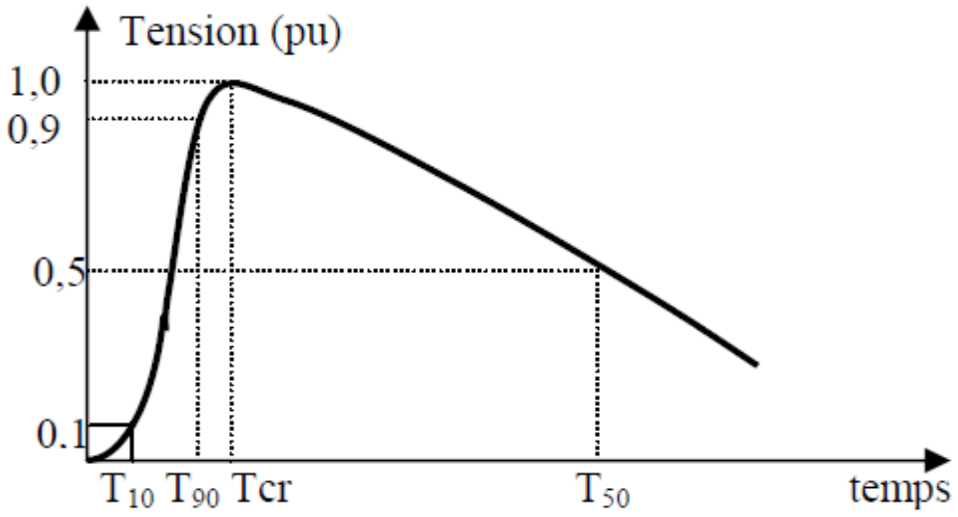


Figure I.18: Courbe d'onde de choc conventionnelle [20].

- **Coup de Foudre négatif :**

  Tfront (90%) = 1 à 10 µs, T queue (50%) = 40 à 200 µs.

- **Coup de Foudre positif:**

  Tfront (90%) = 10 à 100 µ s, T queue (50%) = 500 à 1000 µs.

I.7-Conclusion:

Dans ce chapitre, j'ai donné un aperçu général sur les hautes tensions, les types de tension conventionnelle ainsi que les différentes technologies d'électronique de puissance utilisées pour le transport de l'électricité sont présentées. En plus une vue d'ensemble dénature et phénomène de la foudre est présentée.

Chapitre II

Générateurs de la haute tension

II.1- Introduction :

Les générateurs de haute tension sont des dispositifs qui produisent des tensions électriques élevées, généralement supérieures à 1000 volts. Ils sont utilisés dans divers domaines tels que l'industrie, la recherche scientifique, la médecine et les télécommunications. Ces générateurs peuvent être de différents types, tels que les générateurs à haute tension continue(HVDC), les générateurs à haute tension alternative (HVAC) et les générateurs à haute tensionde choc. Ils sont souvent utilisés pour alimenter des équipements nécessitant des tensions élevées, tels que les tubes à rayons X, les accélérateurs de particules, les lasers ou les antennes de communication.

Dans ce qui suit, une étude théorique portant sur le détail des générateurs de la haute tension.

II.2- Dimensionnement des sources d'essais :

Pour un bon dimensionnement des sources de tension, il faut que [22]:

- Les sources doivent délivrer des tensions suffisamment élevées pour permettre d'effectuer les différents types d'essais (en général : U_n>Uclaquage).
  - tension de tenue Ut : Ut = 2 Us + 20 avec U_s est la tension de service.
  - tension de claquage Uc : Uc = (1,1 à 1,15) Ut
  - tension nominale de la source UN : Un = 1,2 Uc
- La source doit délivrer une puissance correspondante à lanature (capacité) de l'objet d'essais.

$$S_n = C_{max} * \omega * U_n^2 \qquad \text{(II.1)}$$

II-3 -Générateurs de la haute tension :

II.3.1 - Générateurs d'essais HT à fréquence Industrielle (alternatifs) :

II.3.1.a - Transformateur d'essais élévateur :

Le transformateur élévateur représente la source de haute tension la plus répandue et utilisée dans la pratique. Ce sont des transformateurs de faible puissance (de quelques centaines de VA à quelques kVA) dont l'objectif principal est de procurer une haute tension au détriment du courant qui est de l'ordre du milliampère généralement. Ces transformateurs qui sont destines principalement aux laboratoires d'essais, doivent avoir une très bonne

isolation car ils sont appelés à supporter les nombreux claquages qui surviennent lors des tests[22].

Ces transformateurs sont généralement à point milieu, et pour des tensions très élevées (U > 750 kV), le coût et l'encombrement devient très gênant, d'où on utilise des transformateurs montés en cascade [23]

Le transformateur HT d'essais est présenté à la figure suivante :

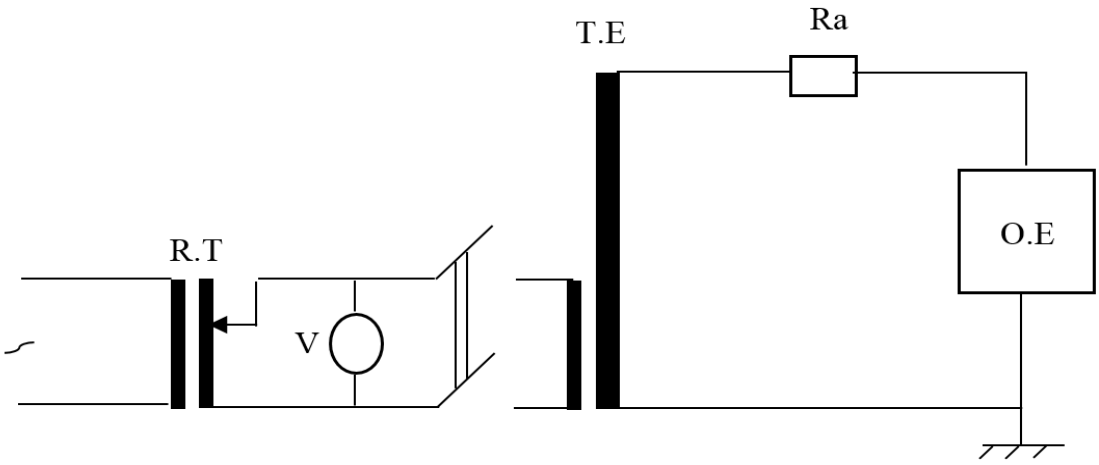


Figure II.1 : Transformateur HT d'essais [22].

R.T : régulateur de tension,

T.E : transformateur d'essai

O.E : objet d'essai,

Ra : résistance d'amortissement du régime transitoire des claquages de l'objet d'essai lors d'un court-circuit au secondaire.

La puissance nominale du transformateur est calculée comme suit[22] :

$$S_n = C_{max}.w.U^2{}_n.10^{-9} \qquad \text{(II.2)}$$

Avec S_n en kVA, Un en kV et C la capacité d'essai en pF.

Le tableau ci-dessous présente les capacités d'essai de quelques objets d'essai en pF [22] *:*

Tableau II.1 : Les capacités d'essai de quelques objets d'essai en pF [22].

Objet d'essai O.E	Capacité C en PF
Isolateurs	Quelque
Transformateur de courant	De 200 à 600
Transformateur de puissance T.P≤1000 KVA	Prés de 1000
Transformateur de puissance T.P>1000 KVA	De 1000 a 8000
Câble (par 10m de longueur)	De 1500 a 3000

La puissance de court-circuit et le courant de court-circuit sont donnés par :

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{U_n} = \frac{1}{U_n} * \frac{S_n}{U_{cc}[\%]} \qquad \text{(II.3)}$$

II .3.1.b -Transformateur d'essai en cascade :

Pour des tensions nominales supérieures à 300 kV, le coût du transformateur d'essai est élevé et l'encombrement devient très gênant, on préfère d'utiliser des transformateurs montés en cascade [22-23].

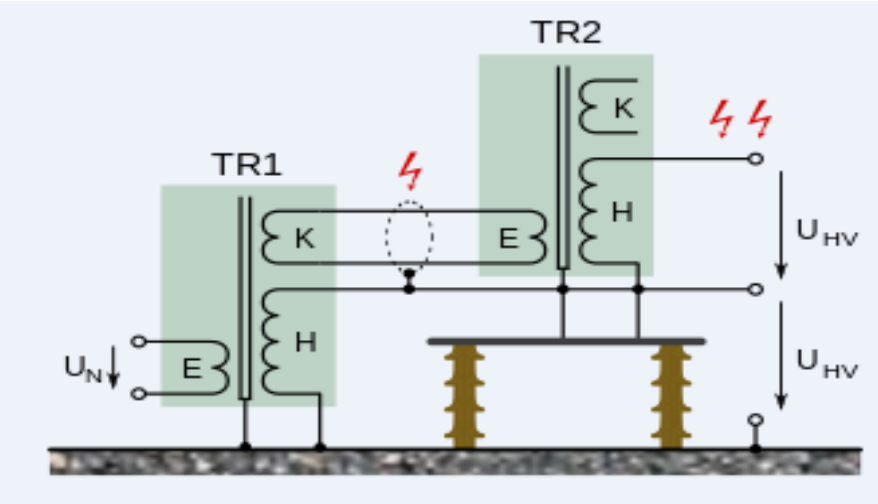


Figure II.2 : Transformateur d'essai en cascade[22].

Le transformateur d'essai en cascade permet de procurer une tension élevée et augmenter la puissance délivrée. La tension et la puissance sont multipliées par le nombre d'étages ou le nombre de transformateurs d'essai utilisés [24].

La chaine d'isolateur au secondaire permet un bon isolement du deuxième transformateur [24].

La source est en générale non-symétrique, avec une électrode sous HT et l'autre mise à la terre. Elle peut aussi être symétrique avec les deux bornes sous tension dans des cas particuliers[24].

II-3.1.c- Circuit résonant :

Les systèmes résonants sont utilisés depuis longtemps pour effectuer les essais diélectriques sur tous les matériels purement capacitifs tel que les câbles HT ou des appareillages isolés au SF6.Une explosion de l'équipement testé se produit suite à l'apparition d'une forte surtension générée par résonance électrique [22-25].

Un phénomène de résonance dans un circuit électrique est constaté lorsque la réactance de l'inductance est égale à celle du condensateur. Ce phénomène est mis à profit pour produire de très haute tension [22-25].

Lorsqu'on veut obtenir une tension beaucoup plus importante que la tension de sortie d'un transformateur de haute tension, on peut recourir aux circuits résonnants série ou parallèle.

Dans le circuit de la figure (II.3), une impédance de réglage variable insérée en série avec le circuit du transformateur permet de régler et d'augmenter la tension a des valeurs très grandes (jusqu'a 600 kV). Le régulateur, alimenté par une source BT alternative, règle la tension en ajustant la valeur totale de l'impédance réactive. Si l'on a besoin d'une tension plus grande, on utilise plusieurs circuits résonants en série [22].

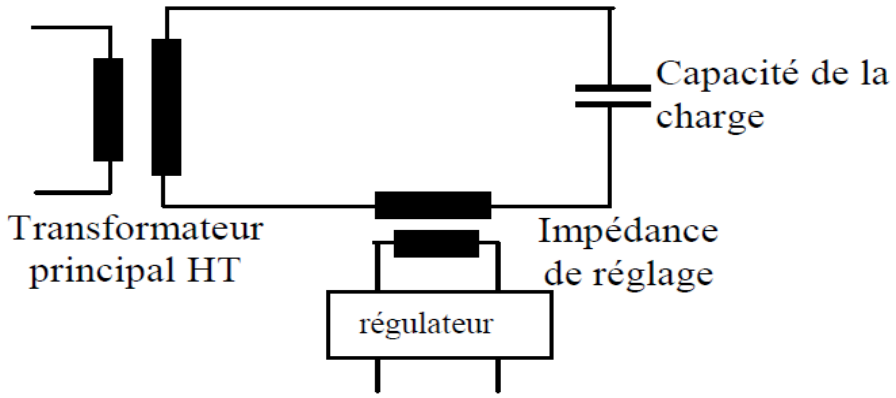


Figure II.3 : circuit résonant [22].

Les générateurs à circuit résonant série sont principalement utilisés pour les essais d'équipements à grande capacité, comme les câbles.

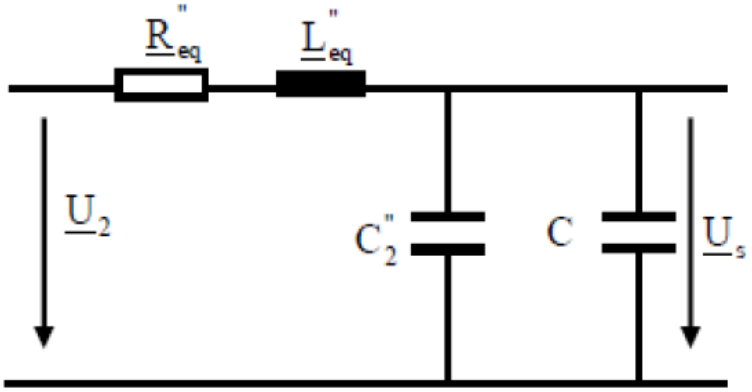


Figure II.4 : Générateurs à circuit résonant série [22].

La tension de sortie du transformateur est alors multipliée par un facteur d'amplification égal au facteur de qualité de l'inductance L série :

$$\alpha = \frac{L_{eq}.w}{R_{eq}} \qquad \text{(II.4)}$$

Les générateurs à circuit résonant parallèle comportent une inductance Lp rajoutée en parallèle avec la charge C. Ces circuits ont l'avantage de diminuer le courant du transformateur HT [26].

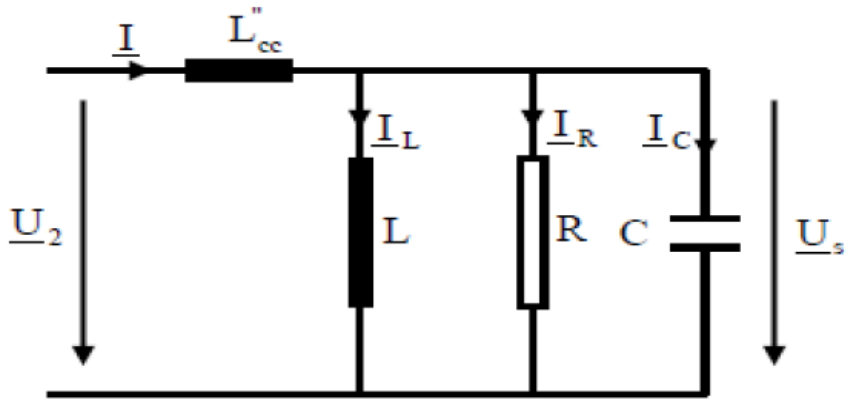


Figure II.5 : Générateurs à circuit résonant parallèle[22].

Le facteur de réduction de courant est défini par :

$$\beta = \frac{R_{LP}}{L_p.w} \qquad \text{(II.5)}$$

II-3.2 Générateurs d'essais HT continus :

La haute tension continue est utilisée dans de nombreuses applications telles que [22]:

- Transport de l'énergie électrique sous tension continue (HVDC).
- Recherche fondamentale : l'analyse des phénomènes est plus facile avec des tensions constantes que des tensions variables.
- Les rayons X, la traction électrique, les filtres électrostatiques, ainsi que de nombreuses applications qui nécessitent des tensions continues.
- Le facteur économique.

II.3.2.a- Redressement simple et double alternance :

Les redresseurs à diodes basse tension permettent de transformer une tension alternative en une basse tension continue. En HT, une diode HT est issue de la mise en série de n diodes conventionnelles en basse tension. Pour redresser par exemple une tension de 100 kV, on met en série 100 diodes de 1000 V chacune pour avoir une diode haute tension de 100 KV [27]:

Le redressement simple alternance est présenté à la figure ci-dessous :

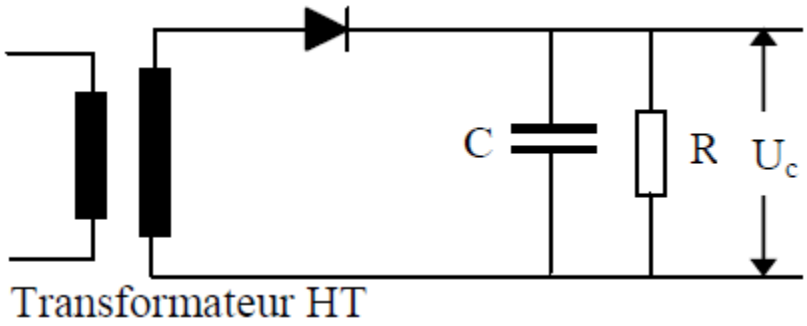


Figure II.6 : Redressement simple alternance[22].

Avec :

C : somme de la capacité de lissage du redresseur et la capacité de l'objet d'essai, ainsi que la capacité parasite.

R : somme de la résistance de l'objet d'essai et la résistance de fuite du condensateur de lissage.

La tension après redressement est donnée par :

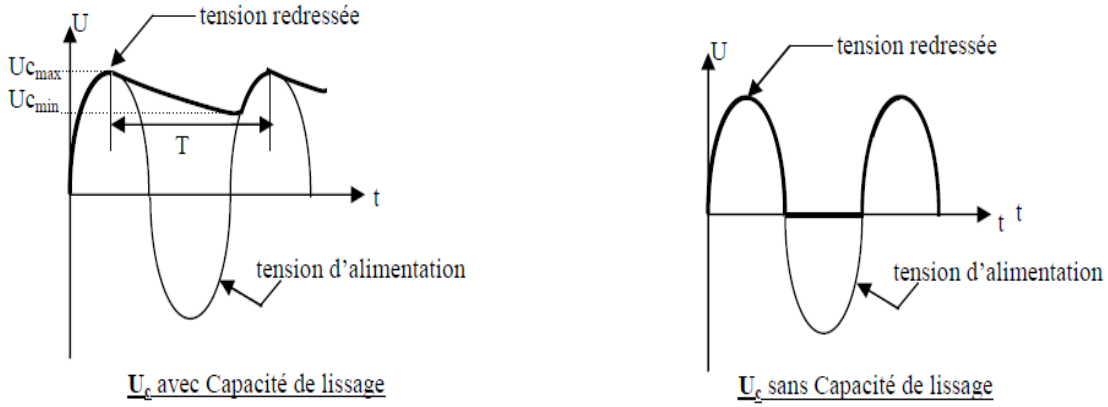


Figure II.7 : Tension après redressement[28].

Ce type de redressement est possible jusqu'à des hautes tensions entre 150 kV et

200 kV.

Le redressement double alternance est similaire au redressement simple alternance, et permet en plus de redresser l'alternance négative selon la figure suivante :

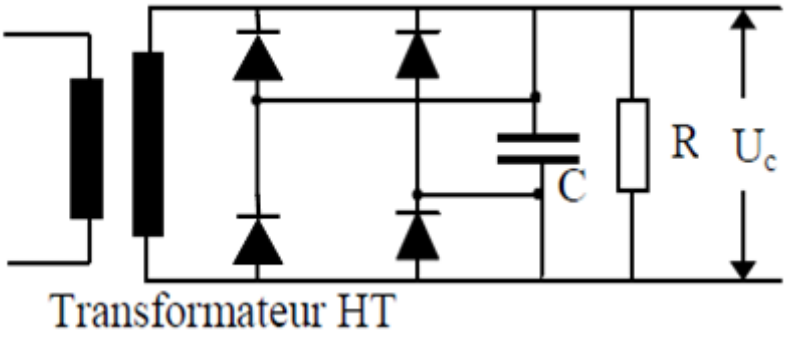


Figure II.8 : Redressement double alternance[28].

La tension après redressement est :

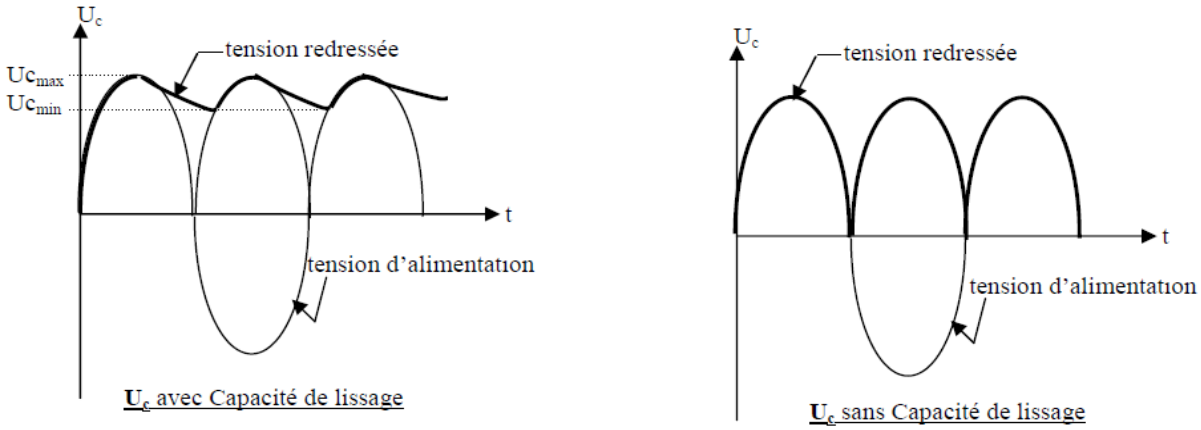


Figure II.9 : Tension après redressement[28].

II.3.2.b- Montage doubleur de tension de Schenkel :

Le montage de Schenkel permet de doubler la haute tension continue redressée à des valeurs assez élevées [29].

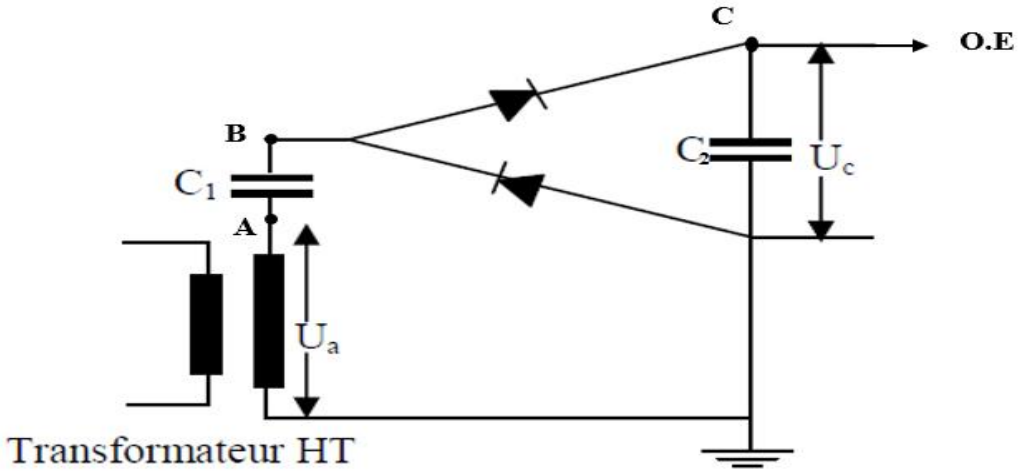


Figure II.10 : Montage doubleur de tension de Schenkel [22].

La tension de sortie du transformateur HT permet la charge du condensateur de haute tension jusqu'à la tension maximale Um. Les deux diodes et le deuxième condensateur C2 redressent et lisse la tension, pour avoir à la sortie, une tension continue multipliée par deux (2) qui alimente l'objet d'essai selon le schéma de tension [30].

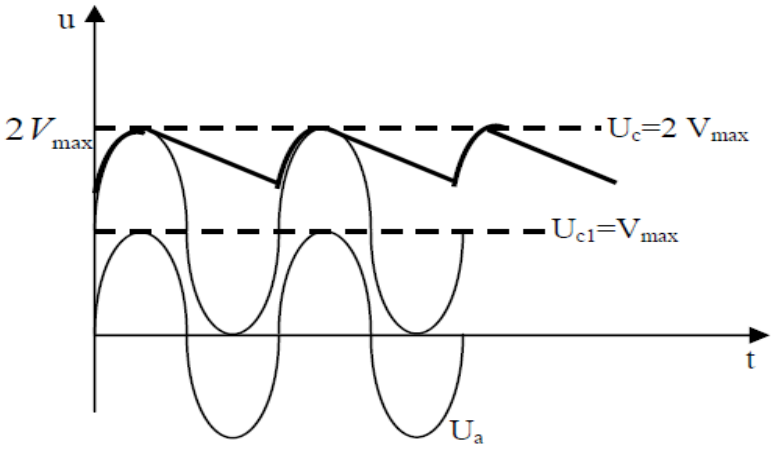


Figure II.11 : Tensionaprès redressement de sortie du transformateur HT [29].

$$U_A = U_m . sin\, wt \qquad \text{(II.6)}$$

C1 se charge jusqu'à $U_{C1} = U_m$

$$U_B = U_{C1} + U_A = U_m + U_m . sin\, wt \qquad \text{(II.7)}$$

La diode et le condensateur C2 redresse et lisse la tension.

D'où : $U_C = 2. U_m$.

II .3.2.c- Montage multiplicateur de tension de Greinacher :

Le montage multiplicateur de Greinacher est un redresseur en cascade de différents étages du montage doubleur de tension de Schenkel. Des diodes et des condensateurs identiques sont utilisés pour permettent le redressement et le lissage de la tension de sortie. Cette tension qui alimente l'objet d'essai dépend du nombre d'étages. Le schéma de Greinacher est le suivant [22,30] :

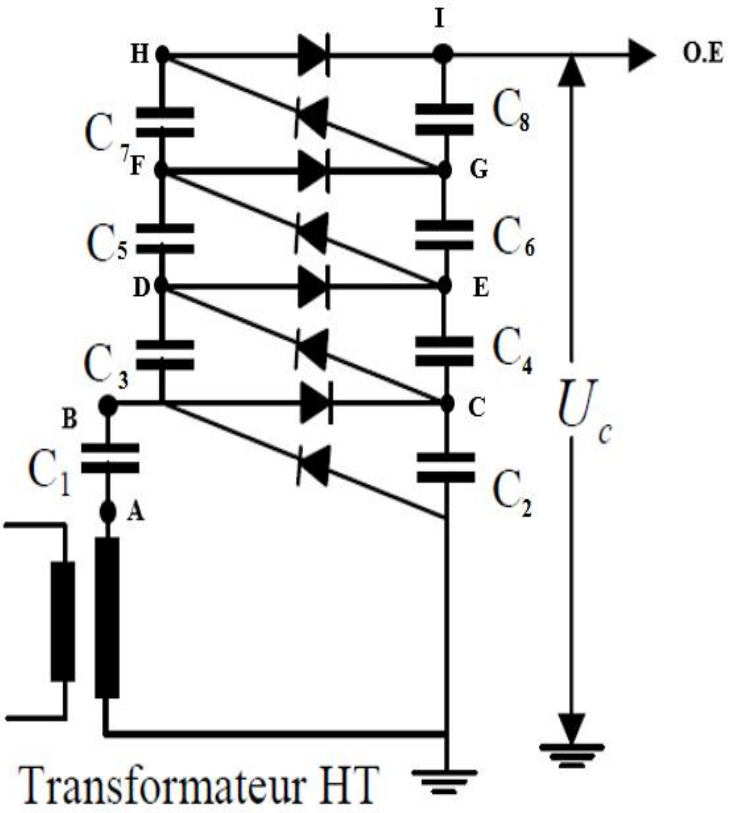


Figure II.12 : Montage multiplicateur de tension de Greinacher [22].

La tension de sortie alternative du transformateur permet la charge des condensateurs C1, C3, C5 et C7 en parallèle à la valeur maximale de la tension Um [30].

La série des diodes et les condensateurs en cascade C2, C4, C6 et C8 permettent le redressement et le lissage de la tension pour avoir à la sortie une tension continue redressée et multipliée par le nombre d'étages de Schenkel[30].

Dans le cas de n étages de schenkel, la tension redressée est calculée selon l'équation :

$$Un = n * (2Um) \qquad (II.8)$$

II.3.2.d- Multiplicateur de tension continue :

Le principe de fonctionnement de ce multiplicateur repose sur deux phases :

- Pendant la première phase : Les interrupteurs S1sont fermés pour charger en parallèle les capacités Ci [31].
- Dans une deuxième phase, les interrupteurs S1 sont ouverts et les interrupteurs S2 sont fermés, les tensions de chaque condensateur s'ajoutent pour délivrer une tension de sortie :

$$U_C = n*U_0 \qquad \text{(II.9)}$$

Avec n est le nombre de capacités C.

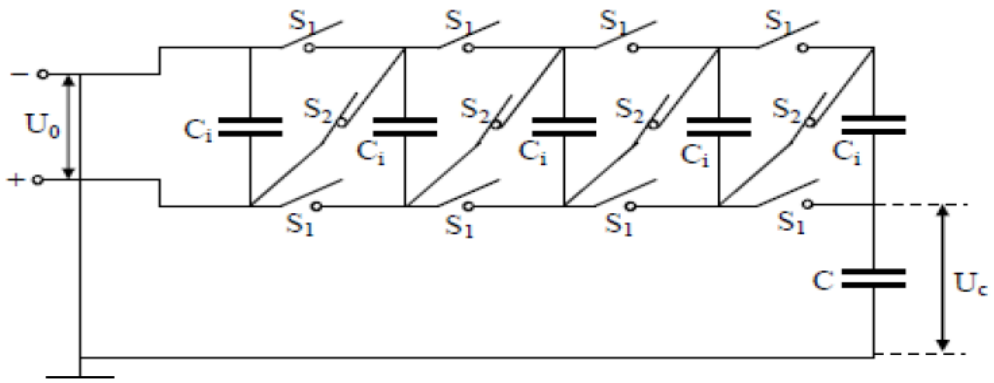


Figure II.13 : Multiplicateur de tension continue [22].

II-3.3 Générateurs d'essais HT de choc :

II-3.3.1 Générateur de Tesla :

Le transformateur de Tesla est un transformateur à couplage par l'air dans lequel le primaire et le secondaire sont en résonance. Il fournit une haute tension oscillante [28]

Le condensateur C1 se charge par l'intermédiaire du transformateurHT associé à la diode D.

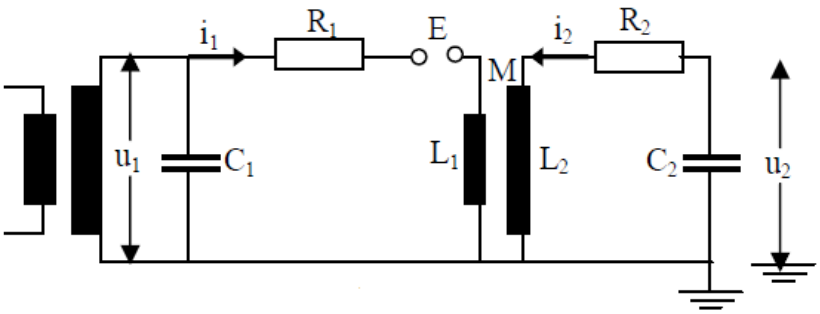


Figure II.14 :Générateur de Tesla [28].

Le transformateur charge le condensateur C1 à une tension U1.

Quand la tension est suffisamment grande, le claquage de l'éclateur E provoque la décharge de l'énergie emmagasinée dans C1 dans un système de deux circuits RLC couplés, générant une tension de sortie U2 qui croît de façon oscillante [22].

Les résistances R1 et R2 servent à amortir l'oscillation. L'arrêt de la tension oscillante s'effectue par l'extinction de l'arc aux bornes de l'éclateur par soufflage d'air. Des tensions à HF fréquence 10^4 à 10^5Hz sont obtenues et qui peuvent atteindre des valeurs de 1 MV [22].

- Dans la phase I, le condensateur C1 se charge à la tension U0.
- Dans la phase II, le condensateur C1 se décharge dans le circuit primaire et l'énergie est transférée au secondaire, accordé en fréquence avec le primaire.

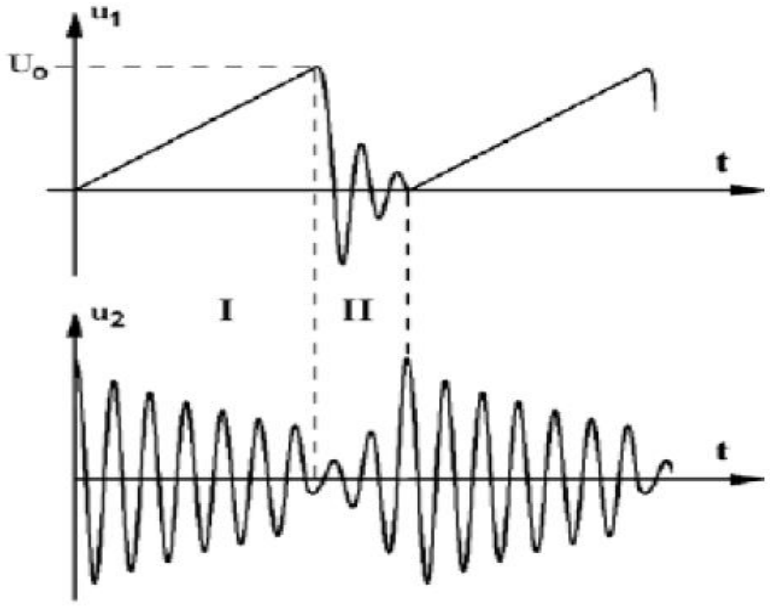


Figure II.15 :*Tensions d'entrée U1 et de sortie U2*[28].

❖ **Tension de choc ou impulsionelle :**

La tension de choc (ou impulsion) est une très haute tension unidirectionnelle, appliquée pendant un temps très bref de l'ordre de quelques µs. C'est un courant ou une tension qui croit rapidement jusqu'à une valeur crête, puis décroît jusqu'à zéro [32].

Les essais de choc au laboratoire sont nécessaires pour les raisons suivantes [32]:

- Des raisons d'étude et de recherche en simulant des surtensions de ligne similaires à celle de l'onde de foudre.
- Des raisons de protection en réalisant des essais sur les appareillages de hautes tensions utilisées dans la protection contre les surtensions.

Le coup de foudre génère sur la ligne une onde de tension qui crée dans l'enroulement des transformateurs une distribution inégale du potentiel, ce qui peut provoquer la détérioration de l'isolement[32].

Les générateurs de choc sont identifiés par les deux constantes de temps t1 et t2.

$$t1 = 1{,}67\ (T90 - T10) \qquad \text{(II.10)}$$

$$t2 = T50 \qquad \text{(II.11)}$$

Avec :

t1 : durée de front,

t2 : durée de queue ou durée de la demi-amplitude.

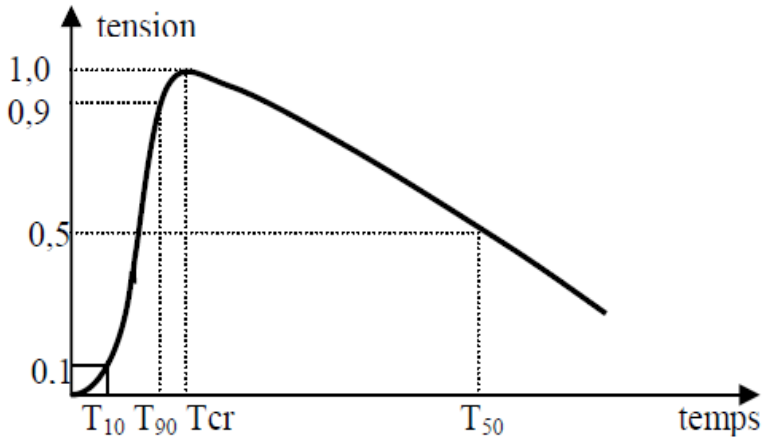


Figure II.16 : Tension de choc [22].

- L'onde de choc de foudre est l'onde 1,2/50 µs
- L'onde de surtension de manœuvre est l'onde 250/2500 µs

II-3.3.2 Générateur de choc à un étage :

Le générateur de choc à un étage est présenté à la figure suivante :

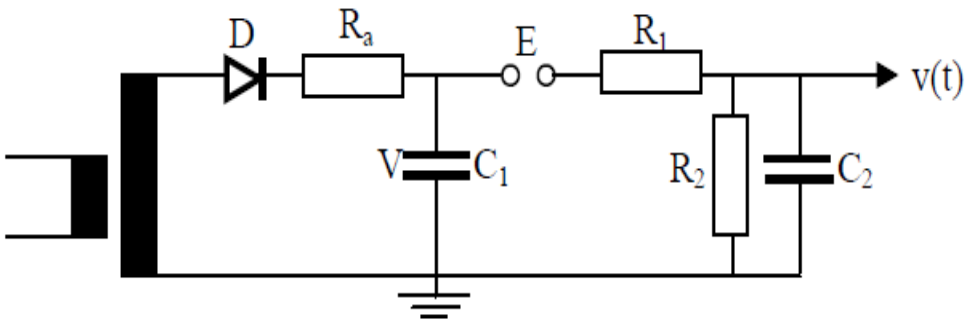


Figure II.17 :Générateur de choc à un étage [33].

D : diode,

Ra : résistance d'amortissement de charge de C1,

C1 : capacité de charge,

V : tension continue aux bornes de C1,

E : éclateur,

R1 : résistance de front en série,

R2 : résistance de queue en parallèle,

C2 : capacité de l'objet d'essai,

V(t) : tension de choc.

Le condensateur C1 se charge à travers un transformateur HT associé à une diode D. La résistance d'amortissement Ra empêche une charge trop rapide. La constante de temps lors du processus de charge de C1 est τ= Ra. C1 est de l'ordre de 10 à 20 s [33].

Lorsque la tension disruptive U0 de l'éclateur E est atteinte, un claquage est réalisé, et C1 se décharge brusquement dans C2 à travers la résistance de front R1 d'où la charge de C2 à travers R1. La constante de charge de C2 est petite $\tau 1$ = R1.C2 (valeurs de R1 et C2 petites). Ceci correspond au temps de front de la tension de choc ou une charge rapide [22].

Les deux condensateurs C1 et C2 vont se décharger ensuite dans la résistance R2 avec une constante de temps $\tau 2$ = R2. (C1 + C2) assez grande (valeur de R2 et C1 grandes). Ceci correspond au temps de queue de la tension de choc ou une décharge lente [22].

II-3.3.3 Générateur de choc de Marx à plusieurs étages :

Le générateur de choc de Marx est un ensemble de générateurs de choc à un étage montés en cascade. Les tensions obtenues sont de l'ordre de MV (maximum réalisé jusqu'à 6 MV) [34].

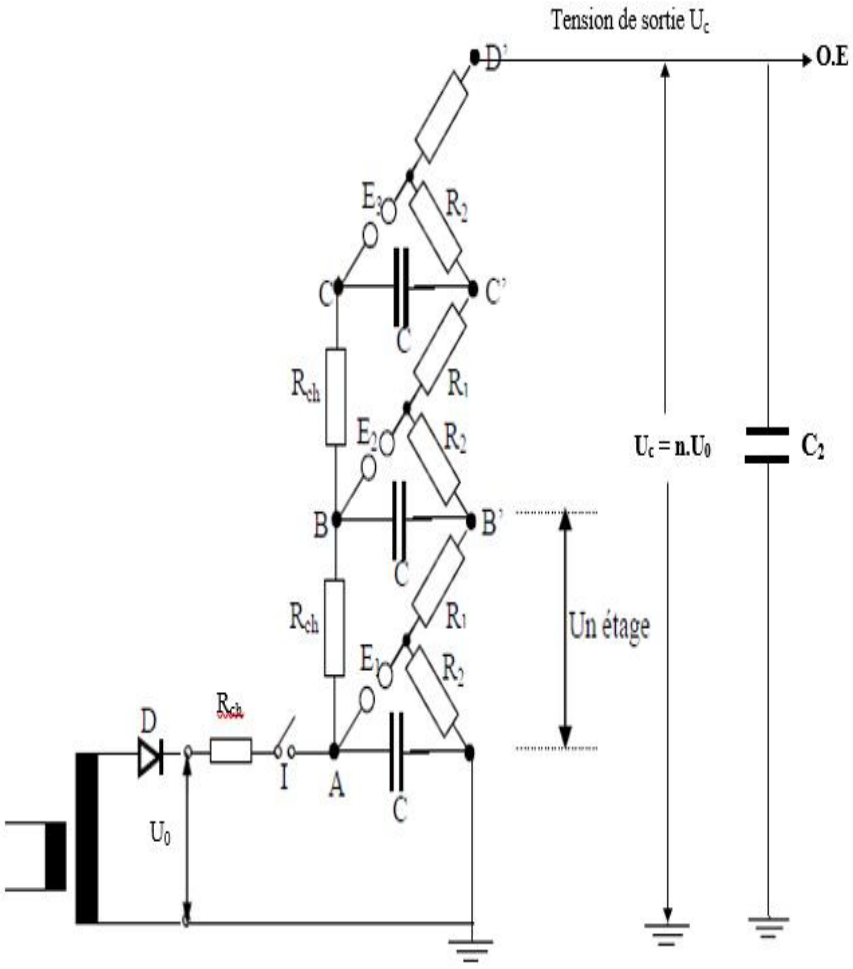


Figure II.18 :Générateur de choc de Marx à plusieurs étages [22].

L'alimentation est assurée par une source de tension continue U0 (U0 peut atteindre entre 50 et 200 kV). Cette tension continue étant alimentée par un transformateur d'essai et redressée par une diode [22].

On peut distinguer deux phases de fonctionnement [22]:

- ✓ **1ère phase : le sectionneur I est fermé :**

Les n condensateurs C en parallèle se chargent à travers de grandes résistances Rch selon la constante de temps : $\tau = Rch * C$

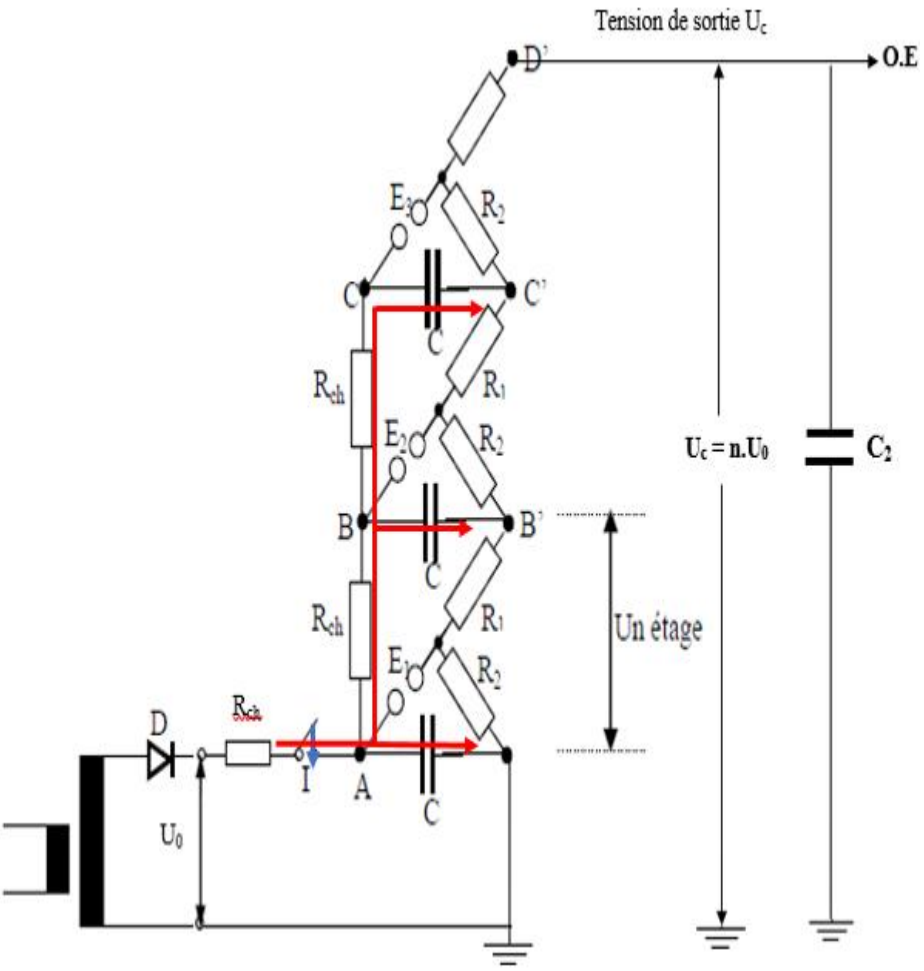


Figure II.19 :Générateur de choc de Marx à plusieurs étages après la fermeture du sectionneur I [22].

✓ **2ème phase : le sectionneur I ouvert :**

L'amorçage des éclateurs Ei est commandé presque simultanément. Les condensateurs se trouvent en série pour former Uc = n*U0, et chargent rapidement le condensateur C2 à travers la petite résistance R1, ce qui donne la constante de temps de charge du front $\tau\ 1 = n * R1 * C$ dont la valeur est petite. Ceci représente le front de l'onde de choc [22,35].

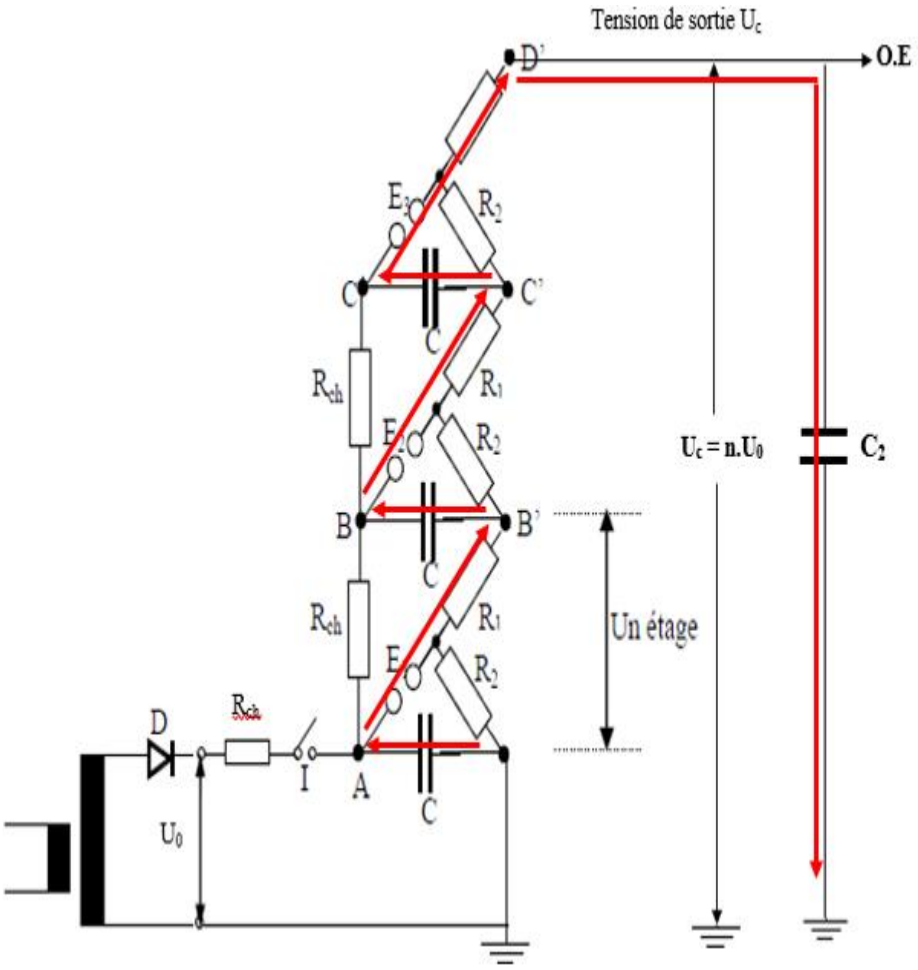


Figure II.20 :Générateur de choc de Marx à plusieurs étages après l'ouverture du sectionneur I (front de l'onde de choc) [22].

Après chargement de C2, L'air isolant entre les éclateurs retrouve ses caractéristiques isolantes, la tension nU0 se décharge lentement dans les résistances R1 et R2. Comme R2 est grande, la constante de temps de décharge $\tau\, 2 \;=\; n * (R1 + R2) * C2$ est grande, et donc la décharge est lente. Ceci représente la queue de l'onde de choc [22].

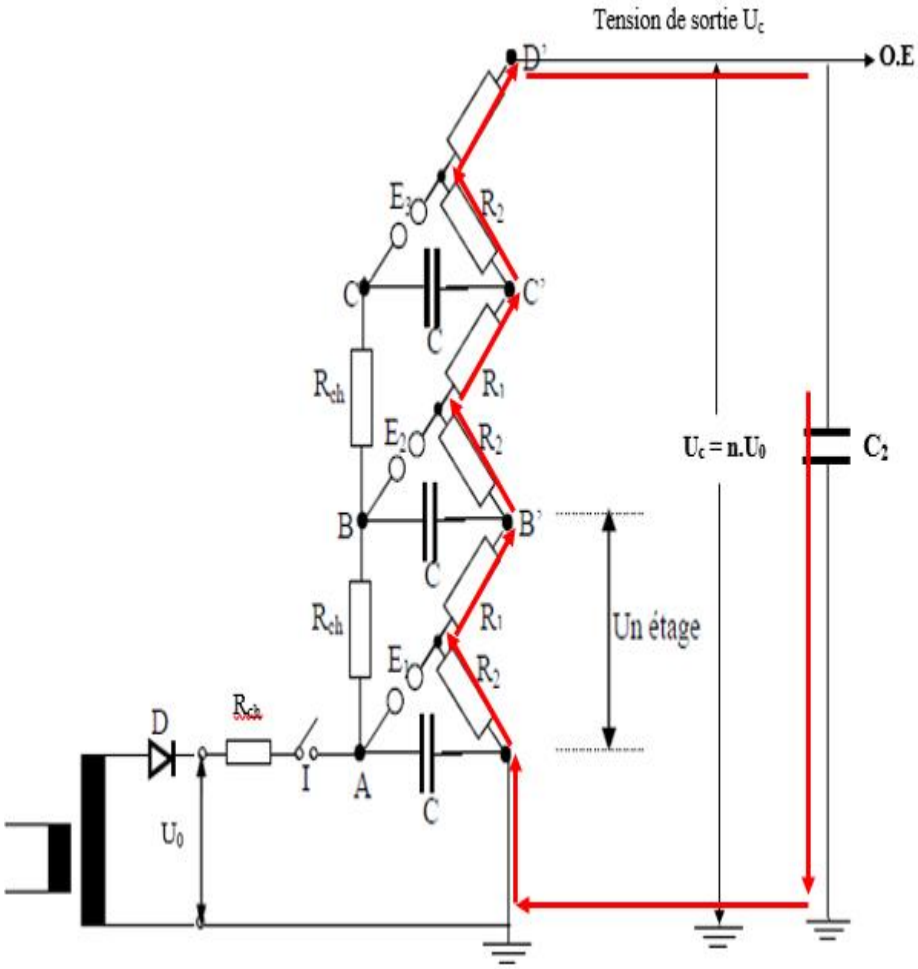


Figure II.21 :Générateur de choc de Marx à plusieurs étages après l'ouverture du sectionneur I (queue de l'onde de choc) [22].

II-4 -Conclusion :

En conclusion, les générateurs de haute tension jouent un rôle crucial dans de nombreux domaines de la technologie moderne en fournissant des tensions électriques élevées pour alimenter divers équipements et dispositifs. Leur capacité à produire des tensions élevées de manière fiable et efficace en fait des composants essentiels dans de nombreux secteurs d'activité. Leur utilisation continue d'évoluer pour répondre aux besoins croissants de l'industrie, de la recherche et de la société en général.

Chapitre III

Simulation des générateurs de haute tension

III.1-Introduction :

Les générateurs de haute tension jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications électriques, telles que les réseaux de distribution d'énergie, les équipements de laboratoire et les systèmes de télécommunication. La simulation et la modélisation des générateurs de haute tension sont des outils essentiels pour concevoir, tester et optimiser ces systèmes complexes. En utilisant des logiciels de simulation spécialisés, il est possible d'analyser en profondeur le comportement des générateurs de haute tension, de prédire leur performance dans des conditions variées et de développer des stratégies de contrôle avancées.

Ce chapitre est consacré d'une part, à la modélisation et la simulation des générateurs de la haute tension continue, et d'autre part, à la modélisation et la simulation des générateurs de la haute tension impulsionelle.

III.2 -Objectifs :

Les objectifs de cette étude sont :

- Modélisation et Simulation d'un générateur de tension continue.
- Modélisation et Simulation d'un générateur de tension d'impulsion.
- Détermination de la tension continue et impulsionelle de sortie des différents étages.
- Comparaison entre les résultats simulés et obtenus théoriquement.

III.3 -Générateur de tension continue :

III.3.1- Définition :

La génération de tension était la génération de courant continu haute tension avec le circuit modifié Cockcroft-Walton. La génération de courant continu haute tension visait à découvrir le phénomène de la haute tension électrique telle que dans les isolateurs. Par conséquent, en faisant ce rapport, nous avons créé un outil qui destiné à être utilisé comme source d'essai pour les matériaux isolants haute tension, et pouvant ensuite être mis au point de manière satisfaisante. Classe de tension supérieure. La haute tension dégradera progressivement le système d'isolation à l'aveuglette sur l'équipement électrique.

III.3.2-Constitution :

La conception de Greinacher (Cockcroft-Walton) se compose essentiellement d':

- Un transformateur de baisse tension.
- Une colonne des condensateurs de lissage.
- Une colonne de condensateurs de couplage.
- Une série raccordement des redresseurs.

III.3.3 -Avantages :

- En utilisant uniquement des condensateurs et des diodes, ces multiplicateurs de tension peuvent renforcer des tensions relativement faibles à des valeurs extrêmement élevées ,tout en étant en même temps beaucoup plus léger et moins cher que les transformateurs.
- Le plus grand avantage de ce circuit est que la tension aux bornes de chaque étape de cette cascade est seulement égale à deux fois la tension d'entrée de crête, il a donc l'avantage de nécessiter des composants relativement faibles coûts et d'être facile à isoler**.**

III.3.4 -Simulation :

Le travail de simulation a été effectué et élaboré en utilisant le logiciel *PSIM* de version 6.0.Les figures(III.2,III.6,III.8, III.10,et III.12) représentent les schémas de fonctionnement, et les figures (III.3,III.4,III.5, III.7,III.9,III.11, III.13et III.14) sont les résultats de simulation .

III.3.4.1 -Description de schéma de conception :

Le schéma de principe de la conception pour générer une haute tension à courant continu ,comprenant un système de mesure et de chargement est montré dans la(Figure III.1).

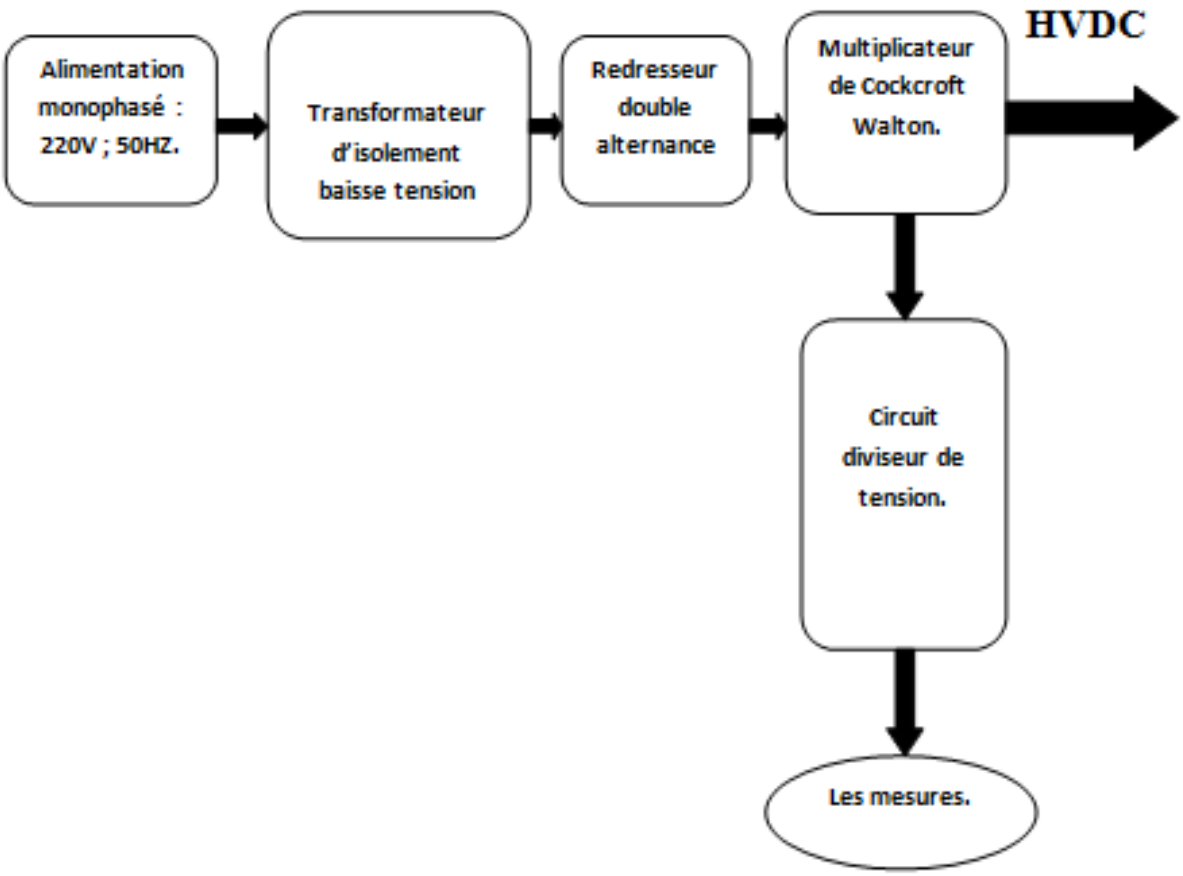


Figure III.1 : Schéma de la conception d'HVDC.

III.3.4.2-Générateur de tension continue à un étage :

Le circuit équivalent de tension continue à un étage est présenté dans la (figure III.2).

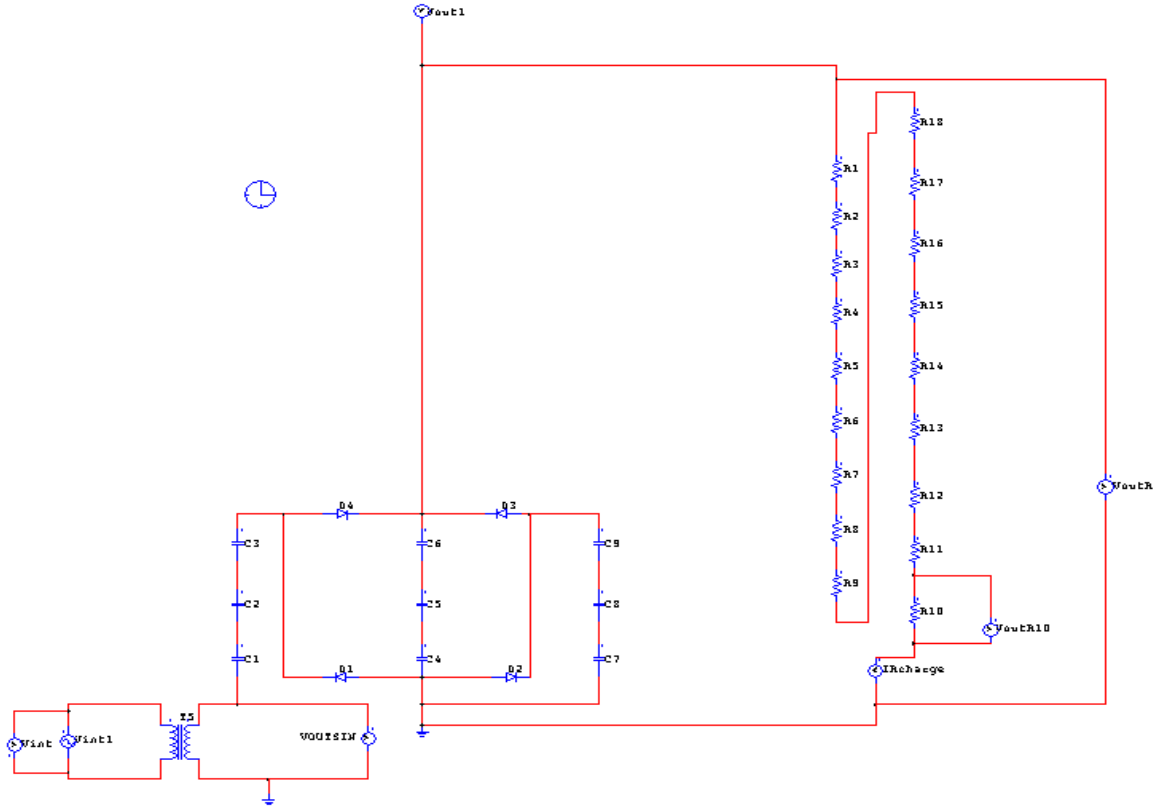


Figure III.2 : Générateur à un étage.

Les figures (III.3 - III.4) représentent respectivement les résultats de simulation d'une tension primaire et secondaire du transformateur.

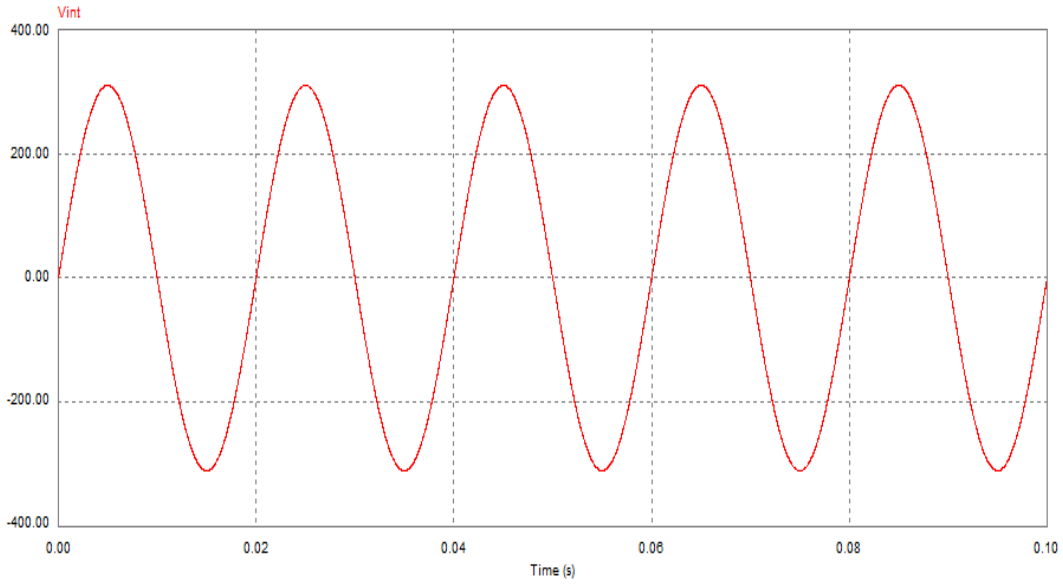


Figure III.3 : Tension primaire du transformateur.

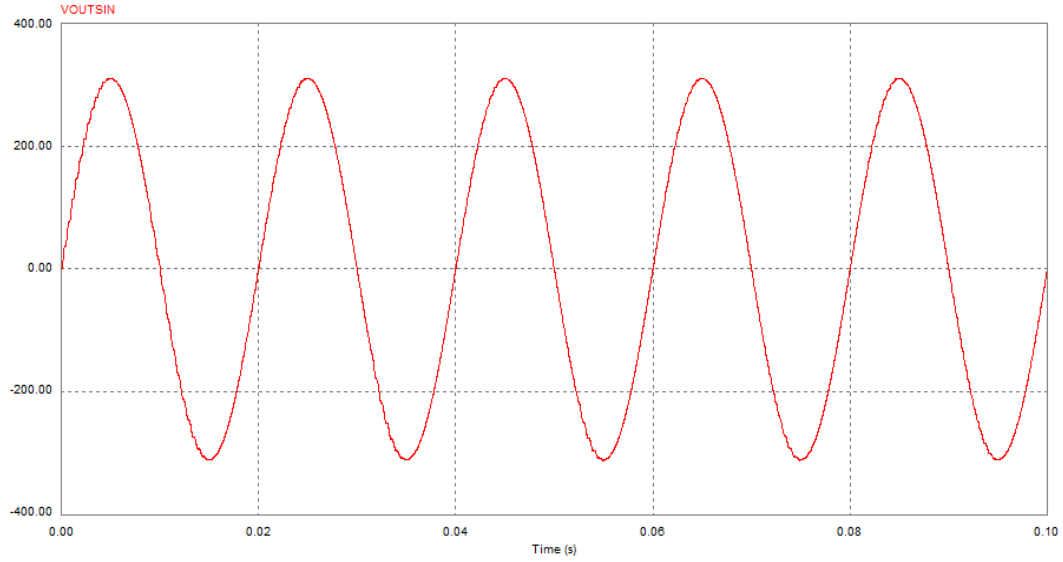


Figure III.4 : Tension secondaire du transformateur.

La figure III.5 ci-dessous représente la caractéristique AC d'entrée et la caractéristique DC de sortie à la borne de l'étage 1.

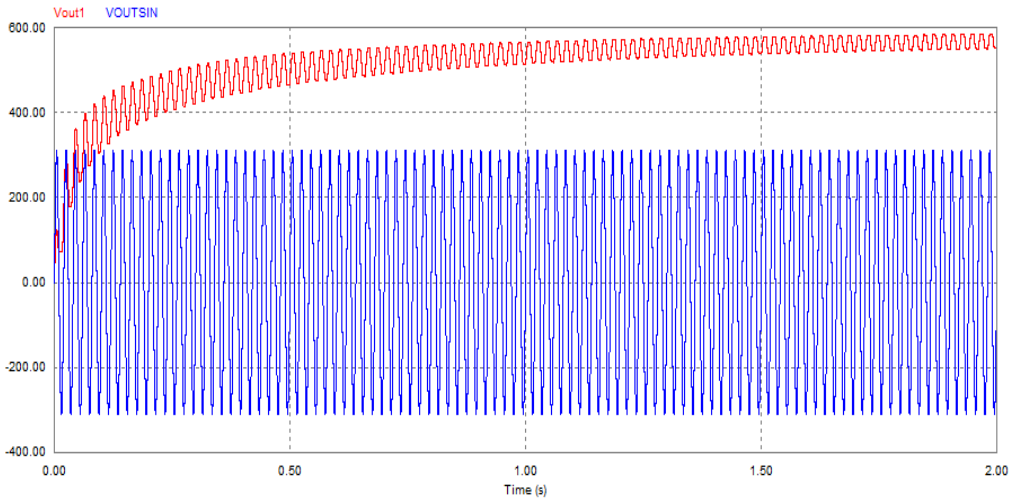


Figure III.5 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du premier étage.

↳ La tension de sortie :

$$\mathbf{V_{out1} = 2nv_{max}\ [V]} \qquad \text{(III.1)}$$

Application :

$$\mathbf{V_{out1} = 2(1)(310)}$$

$$\mathbf{V_{out1} = 620\ \ [V]}$$

III.3.4.3 -Générateur de tension continue à deux étages :

Le circuit équivalent de tension continue à deux étages est présenté dans la (figure III.6).

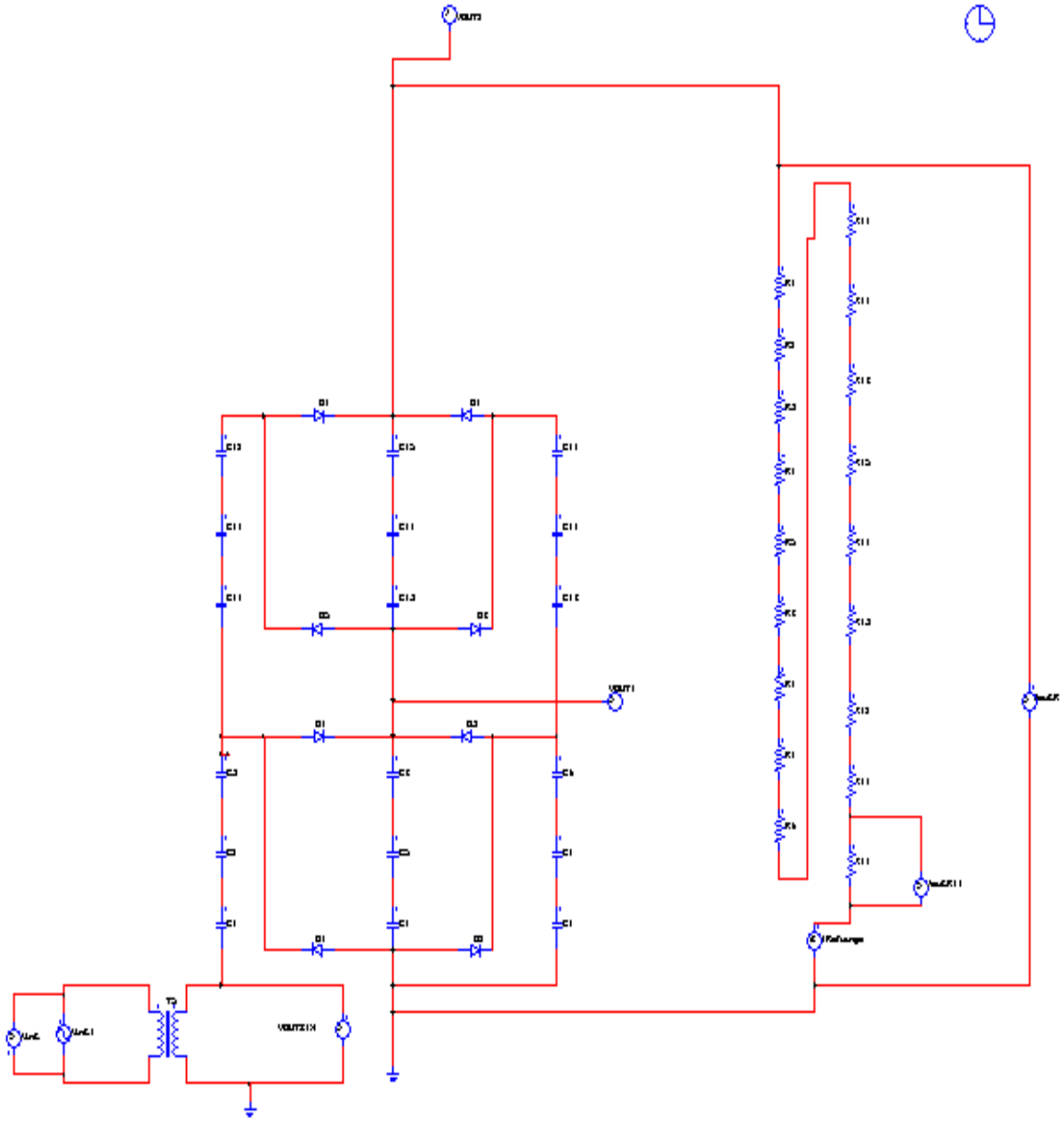


Figure III.6 : Générateur à deux étages.

La figure III.7 ci-dessous représente la caractéristique AC d'entrée et la caractéristique DC de sortie à la borne de l'étage 2.

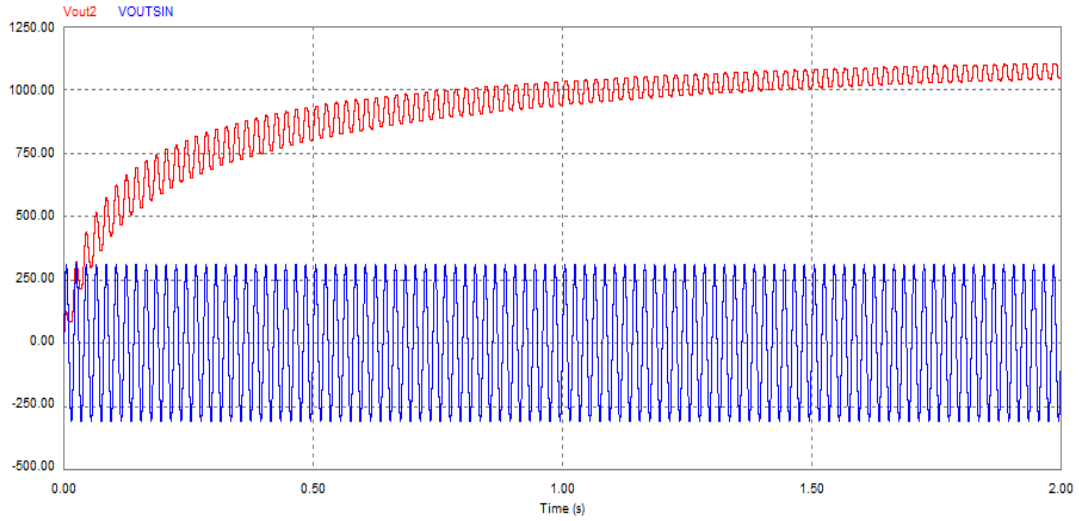


Figure III.7 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du deuxième étage.

- La tension de sortie :

$$\mathbf{V_{out2} = 2nv_{max}\ [V]} \qquad (\text{III.2})$$

Application :

$$\mathbf{V_{out2} = 2(2)(310)}$$

$$\mathbf{V_{out2} = 1240\ \ [V]}$$

III.3.4.4-Générateur de tension continue à trois étages :

Le circuit équivalent de tension continue à trois étages est présenté dans la (figure III.8).

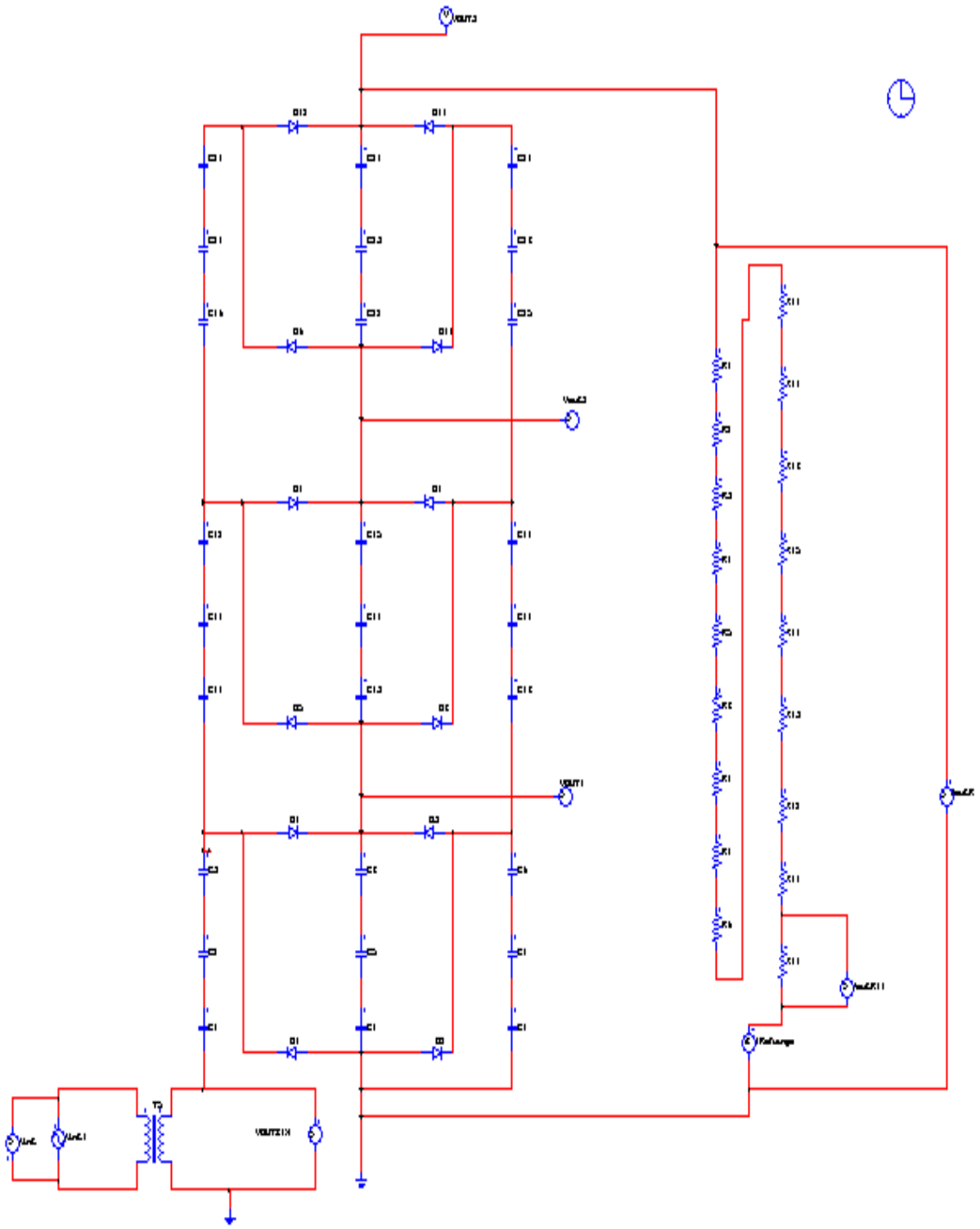


Figure III.8 : Générateur à trois étages.

La figure III.9 ci-dessous représente la caractéristique AC d'entrée et la caractéristique DC de sortie à la borne de l'étage 3.

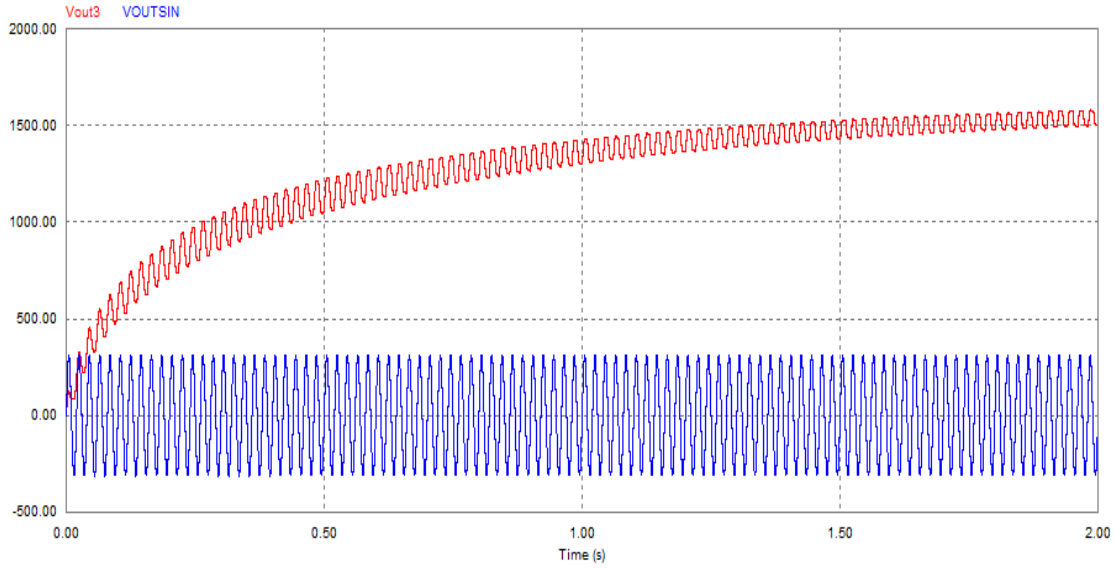


Figure III.9 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du troisième étage.

- La tension de sortie :

$$\mathbf{V_{out3} = 2nv_{max}\ [V]} \qquad \text{(III.3)}$$

Application :

$$\mathbf{V_{out3} = 2(3)(310)}$$

$$\mathbf{V_{out3} = 1860\ [V]}$$

III.3.4.5 -Générateur de tension continue à quatre étages :

Le circuit équivalent de tension continue à quatre étages est présenté dans la (figure III.10).

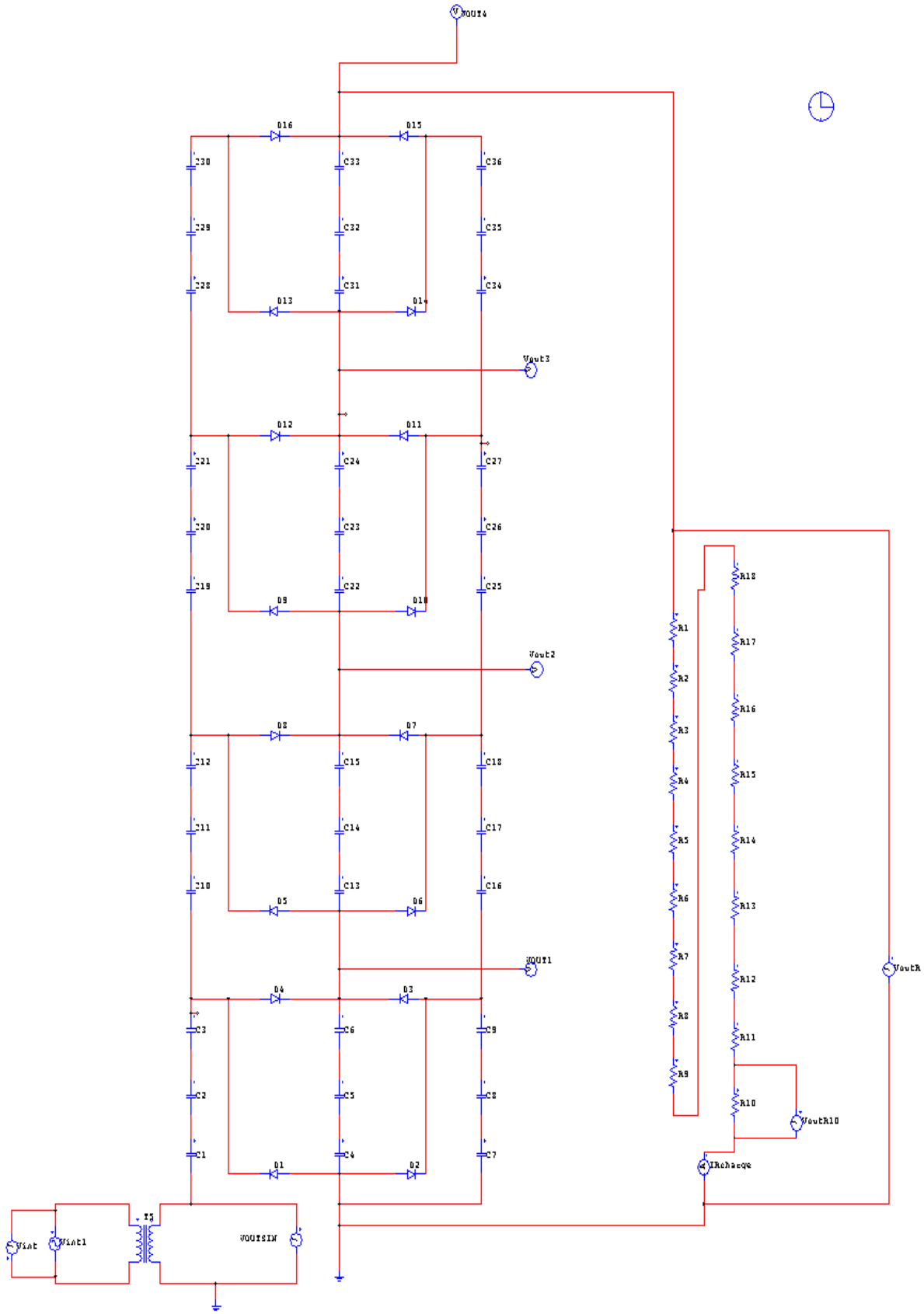


Figure III.10 : Générateur à quatre étages.

La figure III.11 ci-dessous représente la caractéristique AC d'entrée et la caractéristique DC de sortie à la borne de l'étage 4.

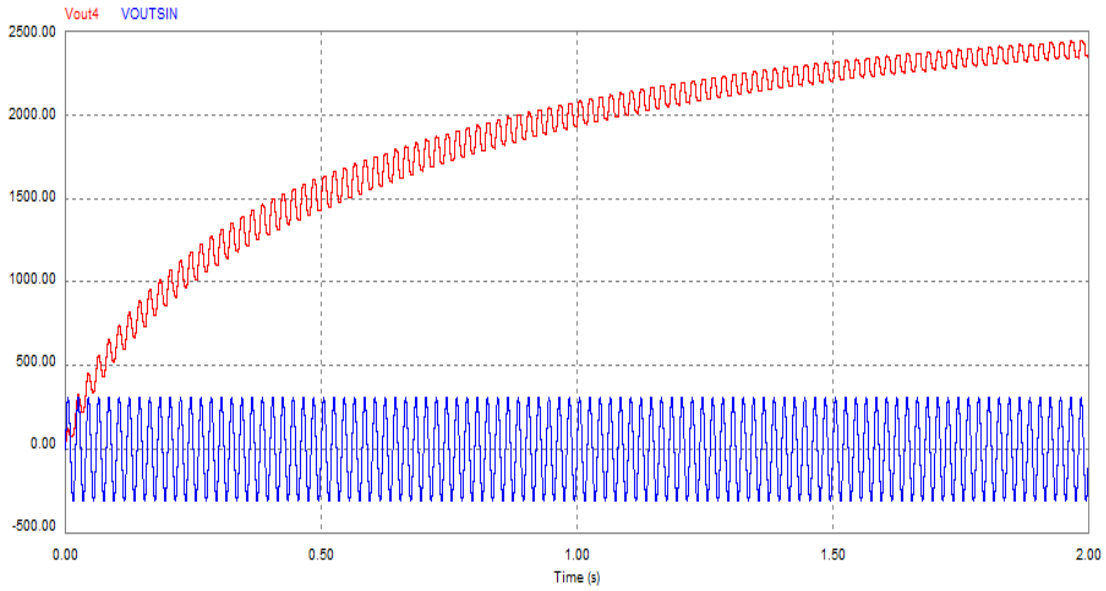


Figure III.11 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du quatrième étage.

- La tension de sortie :

$$\mathbf{V_{out4} = 2nv_{max}\ [V]} \qquad \text{(III.4)}$$

Application :

$$\mathbf{V_{out4} = 2(4)(310)}$$

$$\mathbf{V_{out4} = 2480[V]}$$

III.3.4.6-Générateur de tension continue à cinq étages :

Le circuit équivalent de tension continue à cinq étages est présenté dans la (figure III.12).

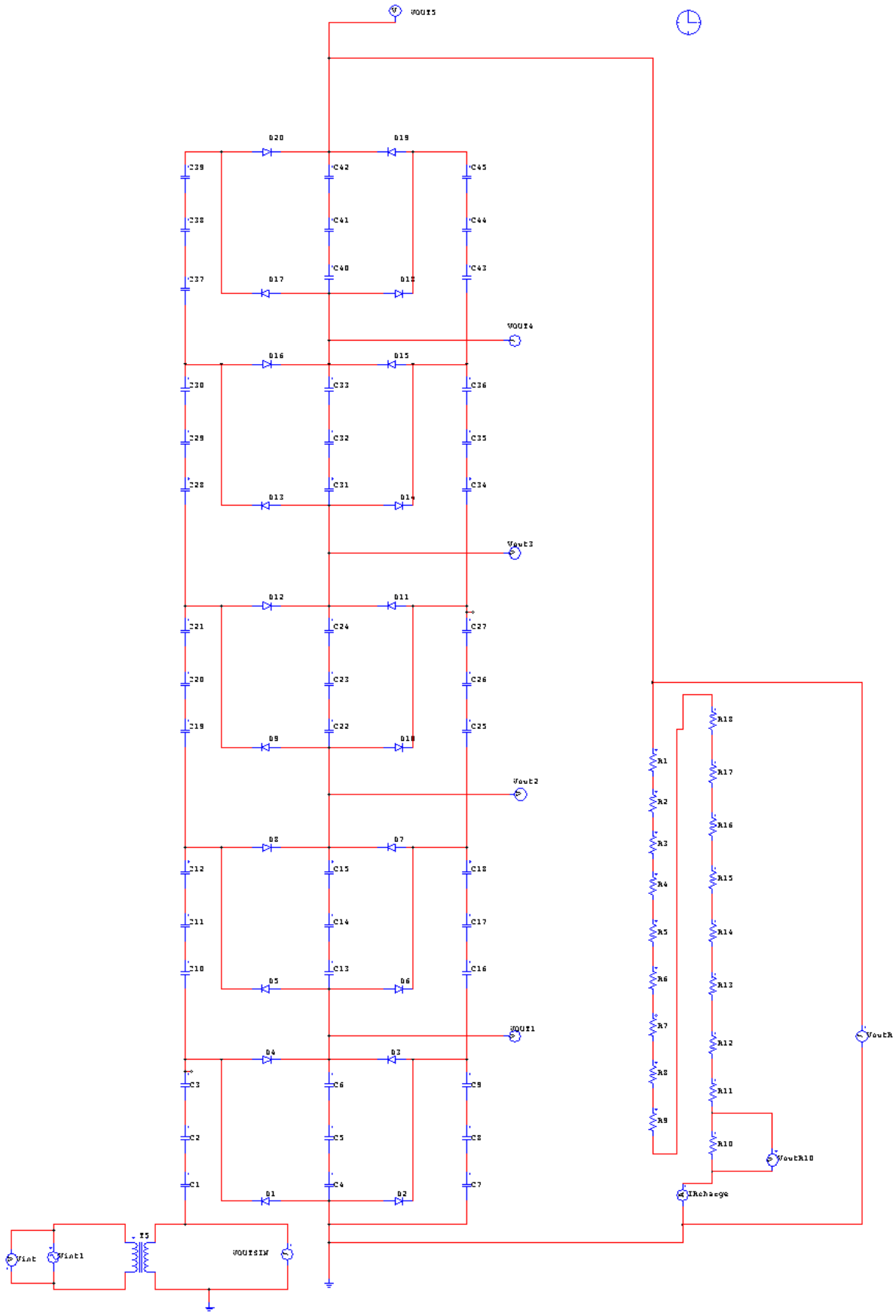


Figure III.12 : Générateur à cinq étages.

La figure III.13 ci-dessous représente la caractéristique AC d'entrée et la caractéristique DC de sortie à la borne de l'étage 5.

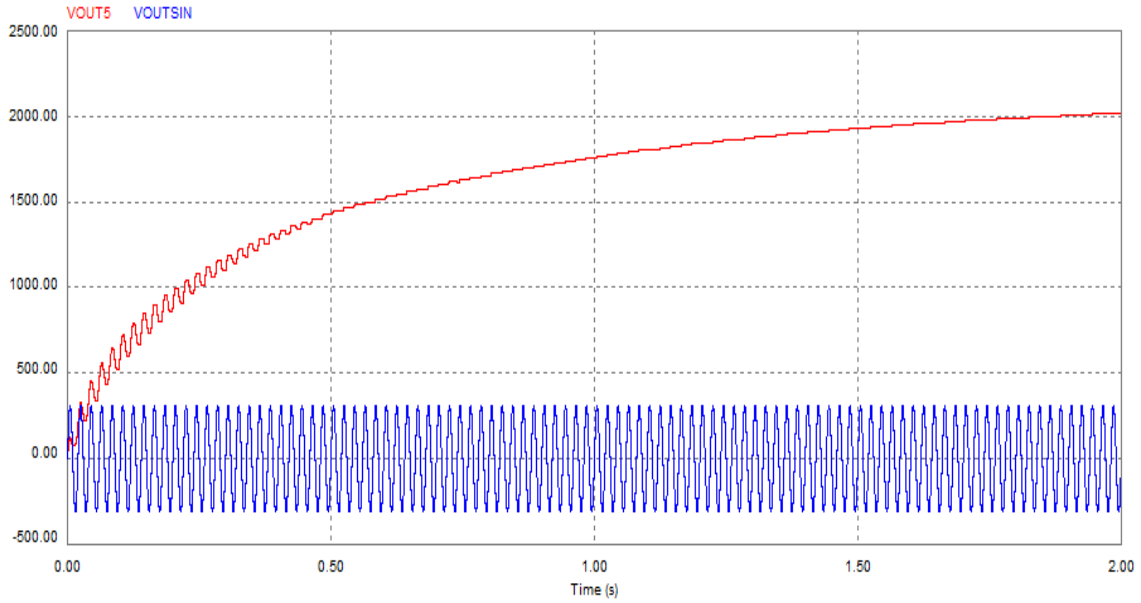


Figure III.13 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie du cinquième étage.

- La tension de sortie :

$$\mathbf{V_{out5} = 2nv_{max}\ [V]} \qquad \text{(III.5)}$$

Application :

$$\mathbf{V_{out5} = 2(5)(310)}$$

$$\mathbf{V_{out5} = 3100[V]}$$

La figure III.14 montre la caractéristique du tension d'entrée ainsi que des tensions de sortie aux bornes de chaque étage.

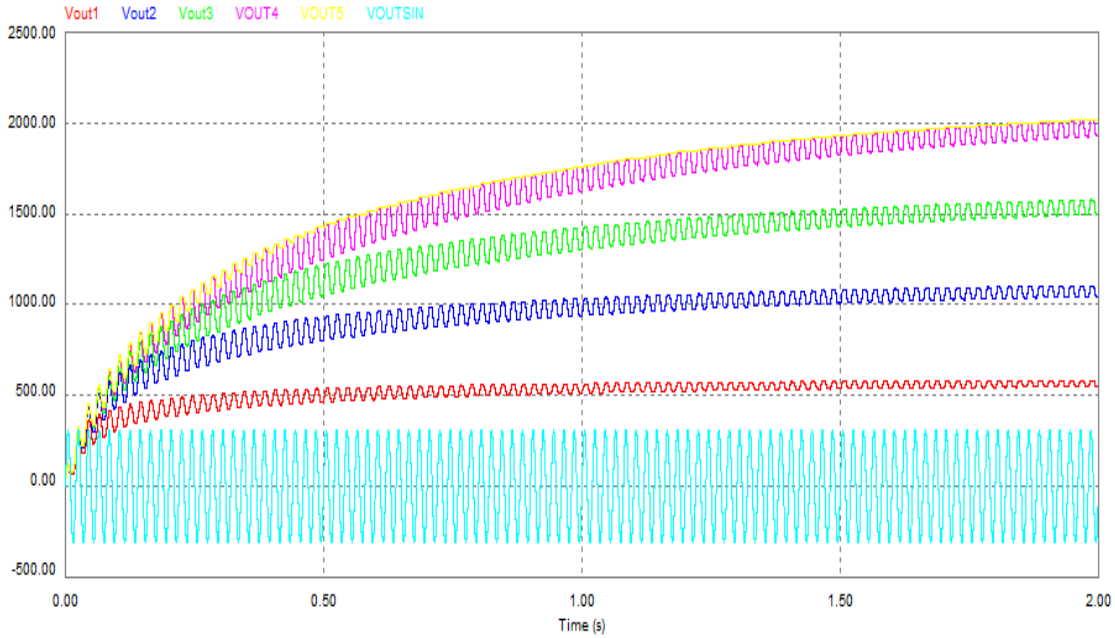


Figure III.14 : Tension AC d'entrée et tension DC de sortie aux bornes de chaque étage.

Où:

Vint : tension d'entrée.

Voute 1 : tension de sortie de 1er étage.

Voute 2 : tension de sortie de 2eme étage.

Voute 3 : tension de sortie de 3eme étage.

Voute 4 : tension de sortie de 4eme étage.

Voute 5 : tension de sortie de 5eme étage.

III.3.4.7 -Interprétation des résultats :

D'après la comparaison entre les résultats simulés etles résultats obtenus théoriquement je peux citer les points suivants:

- Les résultats obtenus en simulation sont proches aux résultats obtenus théoriquement.
- La tension de sortie est égale à la tension d'entrée multipliée par deux fois le nombre d'étage.

III.4- Générateur de tension d'impulsion :

III.4.1- Définition :

Tension d'impulsion ou choc est une tension ou un courant transitoire qui est dit apériodique, qui est appliqué de manière intentionnelle et qui croît rapidement jusqu'à l'obtention d'une valeur crête pour ensuite décroître jusqu'à obtenir une valeur nulle. On peut ainsi représenter un choc par la somme de deux exponentielles. On caractérise alors un générateur de choc par la valeur de tension de crête, le temps de montée et le temps de descente (figure III.15).

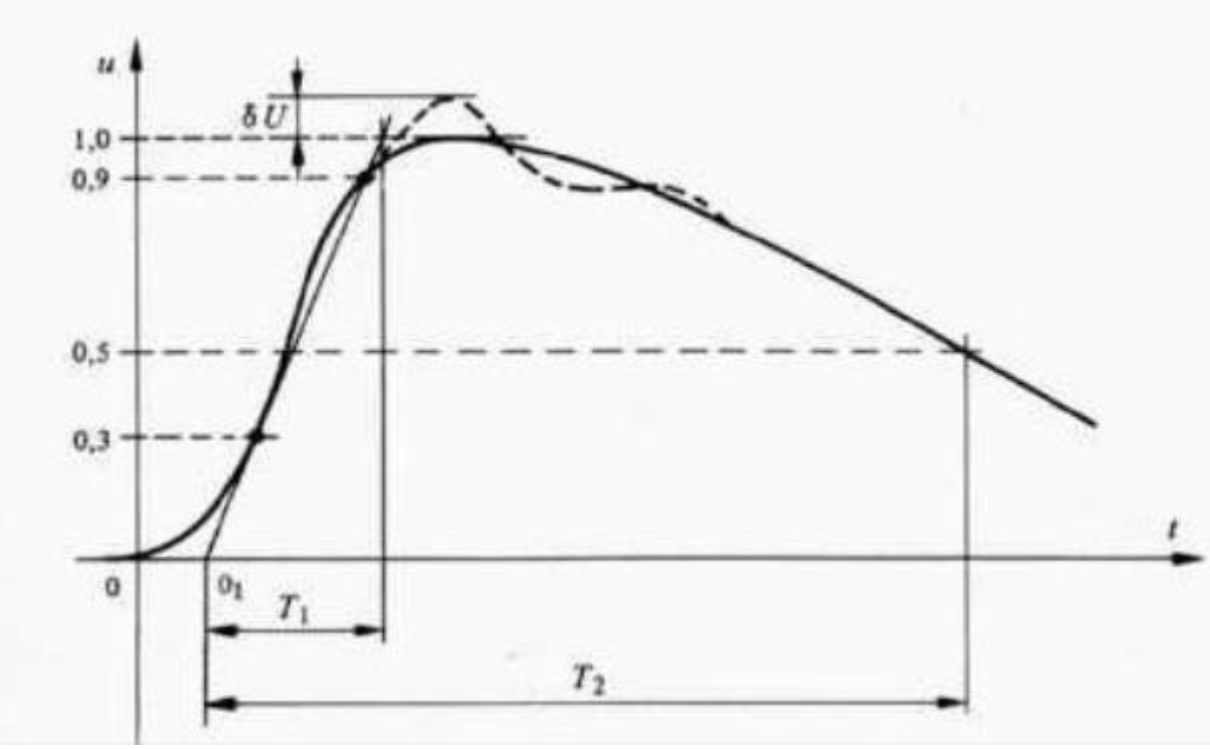


Figure III.15: Forme d'onde du choc de foudre.

Il existe ainsi plusieurs types de chocs, mais dans notre situation le type de choc recherché est de foudre. Il faut alors un temps (T1) de montée ou de front de 1,2 µs et un temps (T2) de descente ou de queue de 50 µs si on veut respecter les critères de ce type de choc.

III.4.2- Constitution :

Le générateur de tension d'impulsion se compose principalement de :

- Source de tension DC.
- Switch (Des éclateurs) sont branchés en série.
- Des condensateurs de choc(de charge).
- Des condensateurs de l'objet en essai.
- Des résistances d'amortissement de charge.
- Des résistances de front d'onde (série).
- Des résistances de queue d'onde (parallèle).

III.4.3-Simulation :

Afin de valider le modèle approuvé, j'ai effectué des simulations à l'aide de logiciel Matlab Simulink, avec une tension d'entrée continue de 30 kV. Cette partie présente une étude de la configuration proposée, ainsi que la détermination des valeurs de tension d'impulsion de sortie pour chaque étage.

III.4.3.1- Générateur de tension de choc à un étage:

Le circuit équivalent de tension de choc à un étage est présenté dans la (figure III.16).

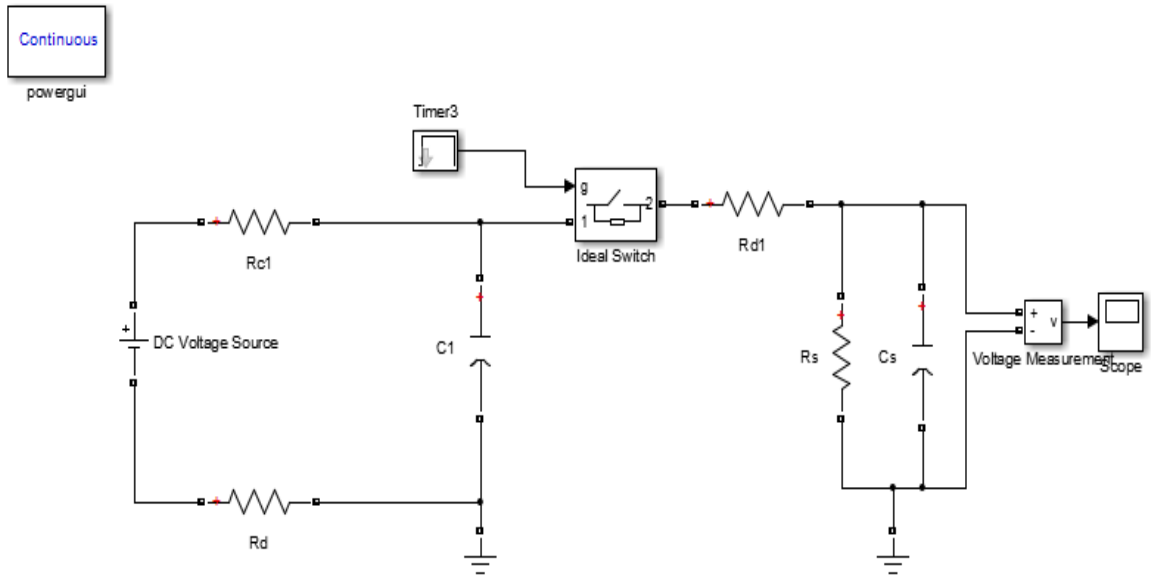


Figure III.16 : Générateur à un étage.

La figure III.17 montre la caractéristique de sortie d'une tension impulsionelle aux bornes de l'étage 1.

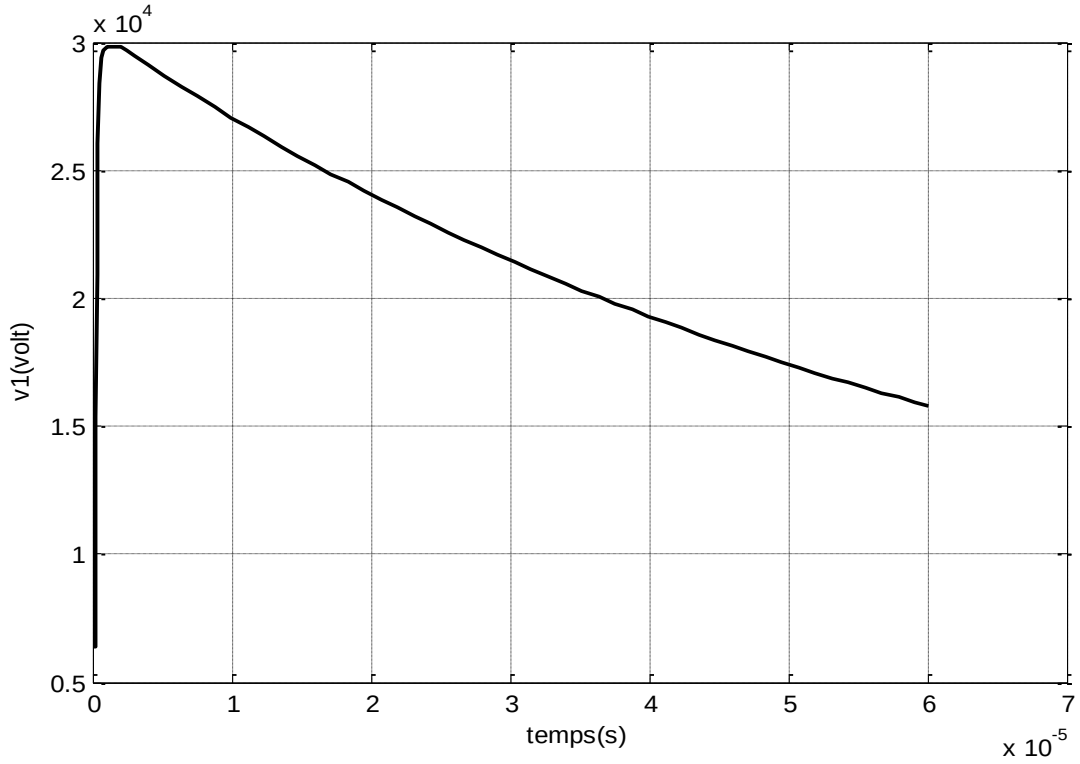


Figure III.17: Courbe de la tension de sortieV1 (volt) de 1' étage 1.

- La tension de sortie :

$$\mathbf{V_1 = nv_0 \ \ [kV]} \qquad \text{(III.6)}$$

Application :

$$\mathbf{V_1 = 1(30)}$$

$$\mathbf{V_1 = 30 \ \ [kV]}$$

III.4.3.2-Générateur de tension de choc à deux étages:

Le circuit équivalent de tension de choc à deux étages est présenté dans la (figure III.18).

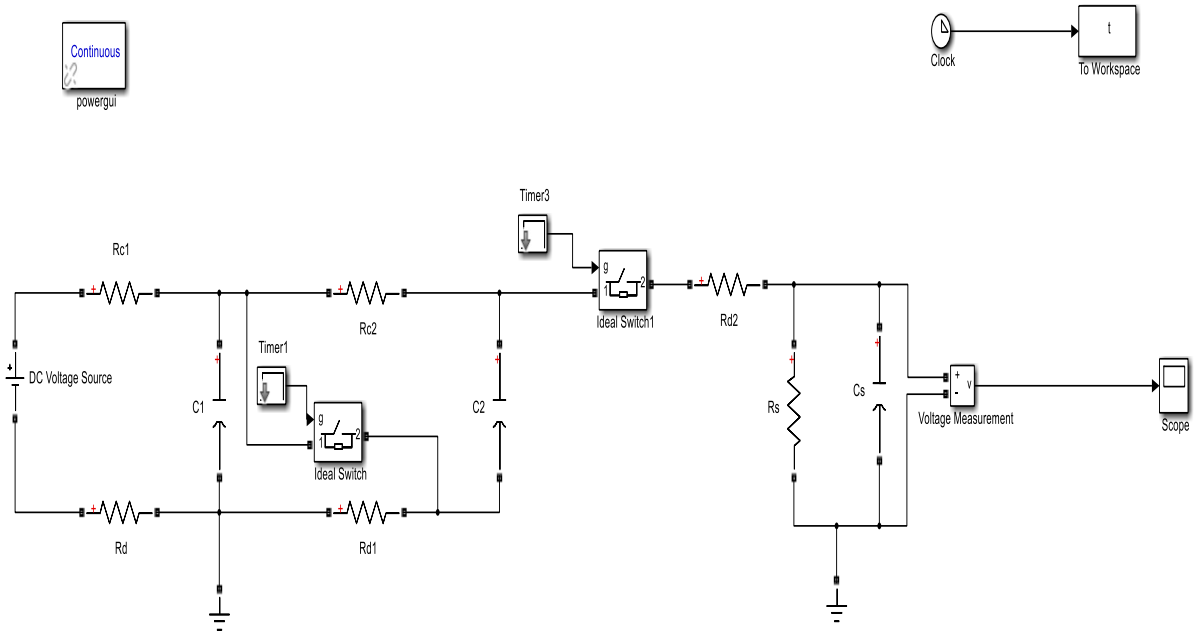


Figure III.18 : Générateur à deux étages.

La figure III.19 montre la caractéristique de sortie d'une tension impulsionelle aux bornes de l'étage 2.

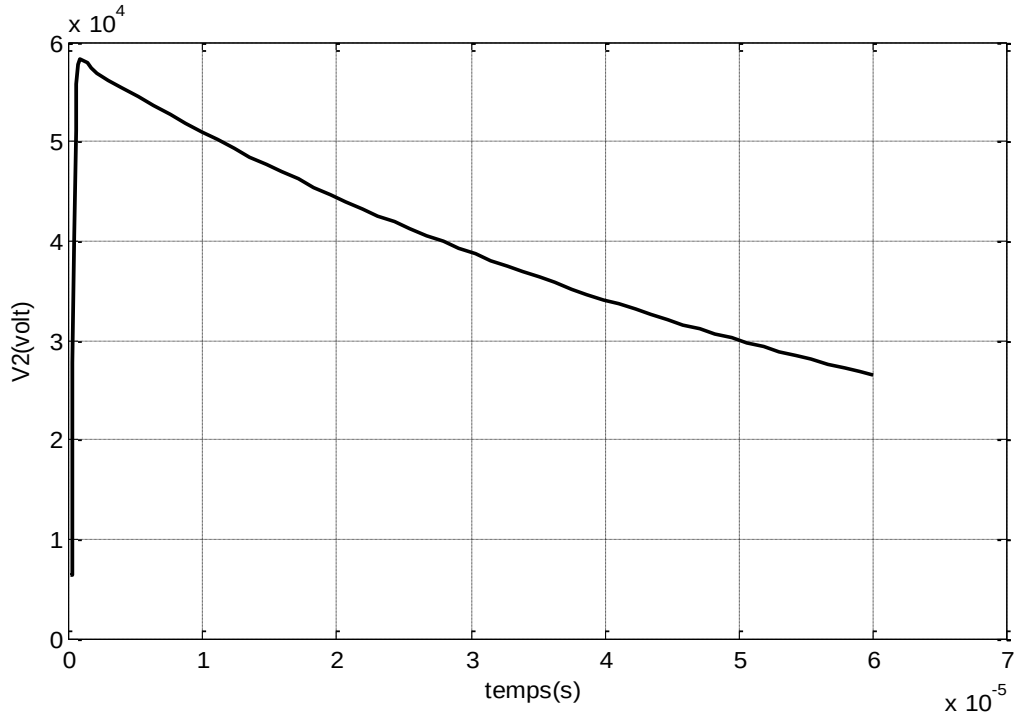


Figure III.19: Courbe de la tension de sortieV2 (volt) de 1' étage 2.

La tension de sortie :

$$V_2 = nv_0 \quad [kV] \qquad \text{(III.7)}$$

Application :

$$V_2 = 2(30)$$

$$\boxed{V_2 = 60 \quad [kV]}$$

III.4.3.3-Générateur de tension de choc à trois étages:

Le circuit équivalent de tension de choc à trois étages est présenté dans la (figure III.20).

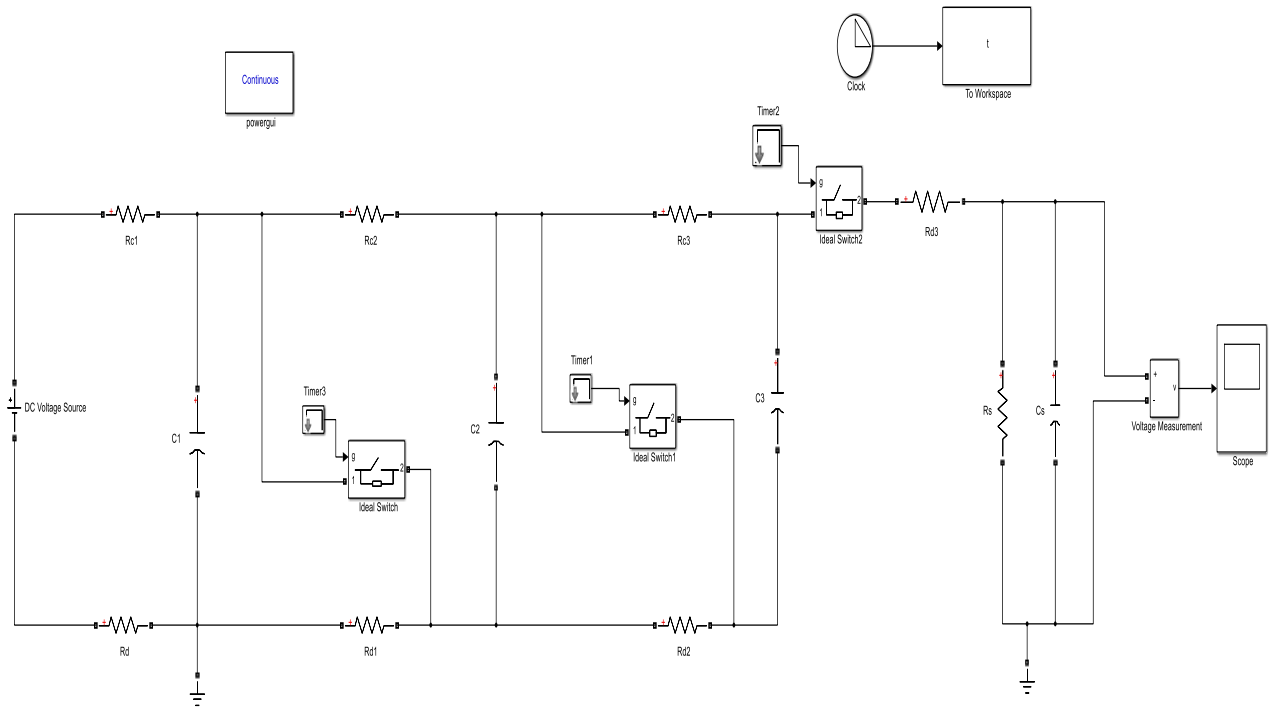


Figure III.20 : Générateur à trois étages.

La figure III.21 montre la caractéristique de sortie d'une tension impulsionelle aux bornes de l'étage 3.

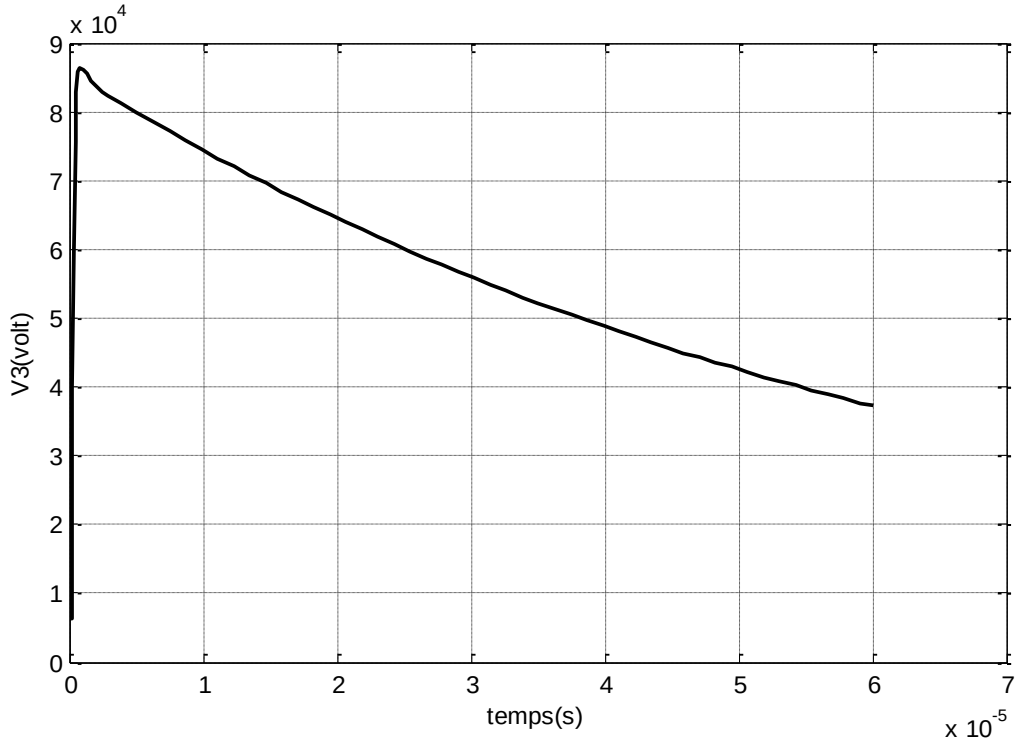


Figure III.21: Courbe de la tension de sortieV3 (volt) de 1' étage 3.

- La tension de sortie :

$$\mathbf{V_3 = nv_0 \quad [kV]} \qquad \text{(III.8)}$$

Application :

$$\mathbf{V_3 = 3(30)}$$

$$\mathbf{V_3 = 90 \quad [kV]}$$

III.4.3.4- Générateur de tension de choc à quatre étages:

Le circuit équivalent de tension de choc à quatre étages est présenté dans la (figure III.22).

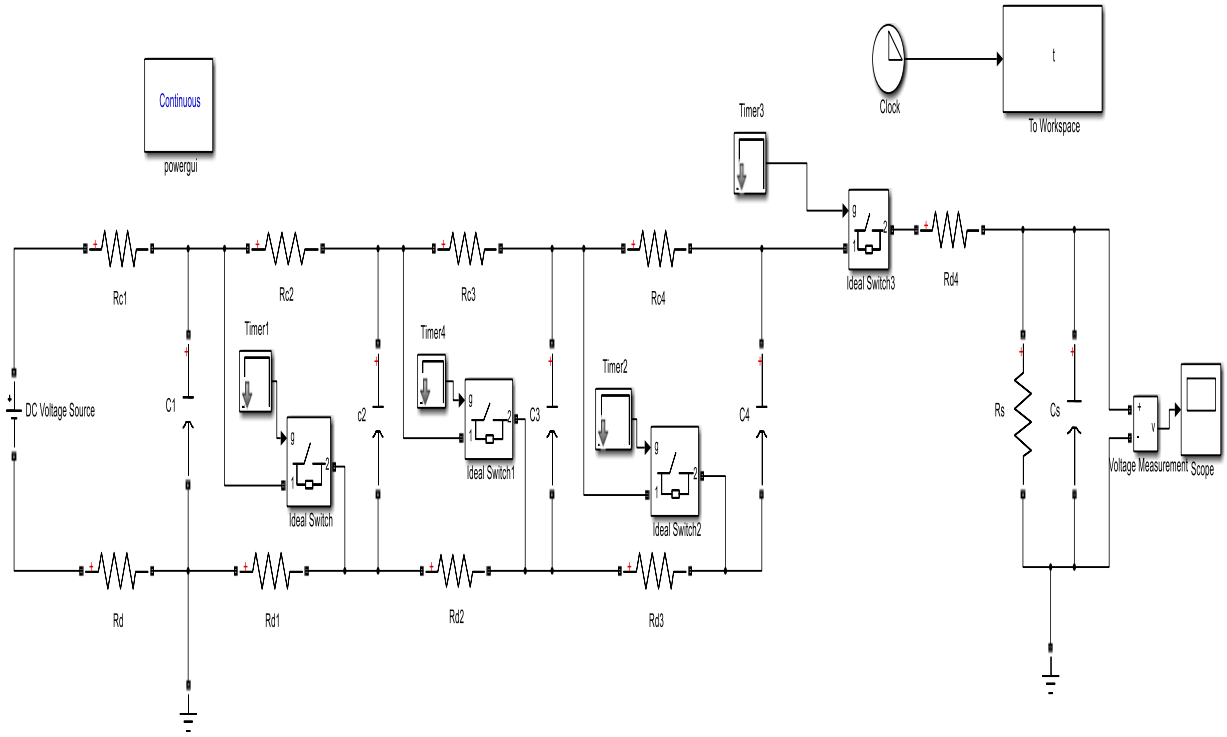


Figure III.22 : Générateur à quatre étages.

La figure III.23 montre la caractéristique de sortie d'une tension impulsionelle aux bornes de l'étage 4.

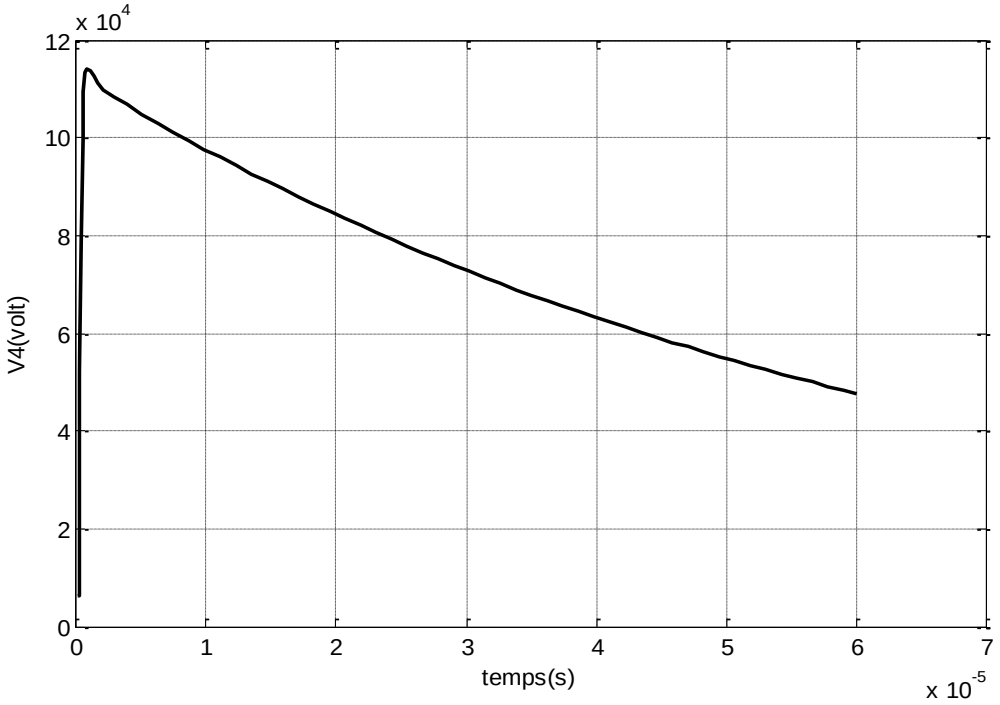


Figure III.23: Courbe de la tension de sortieV4 (volt) de 1' étage 4.

La tension de sortie :

$$V_4 = nv_0 \quad [kV] \qquad (III.9)$$

Application :

$$V_4 = 4(30)$$

$$\boxed{V_4 = 120 \quad [kV]}$$

III.4.3.5 -Générateur de tension de choc à cinq étages:

Le circuit équivalent de tension de choc à cinq étages est présenté dans la (figure III.24).

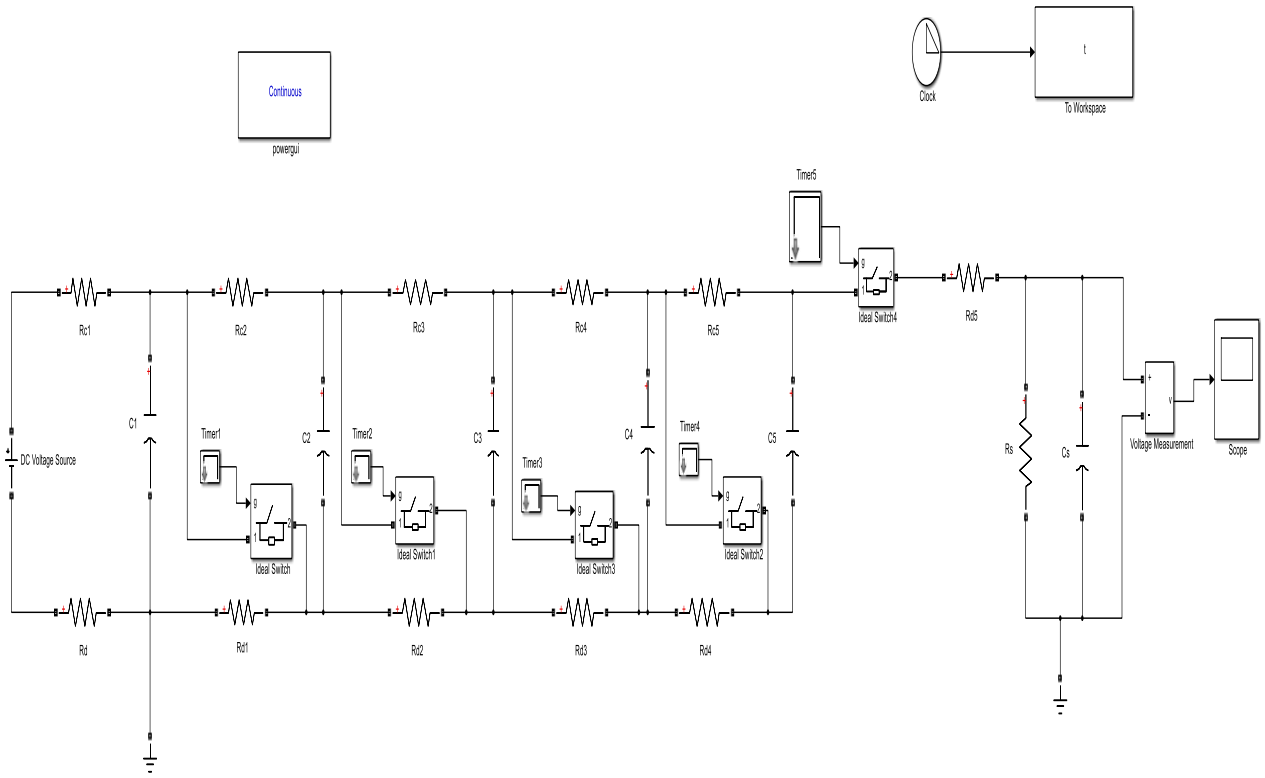


Figure III.24 : Générateur à cinq étages.

La figure III.25 montre la caractéristique de sortie d'une tension impulsionelle aux bornes de l'étage 5.

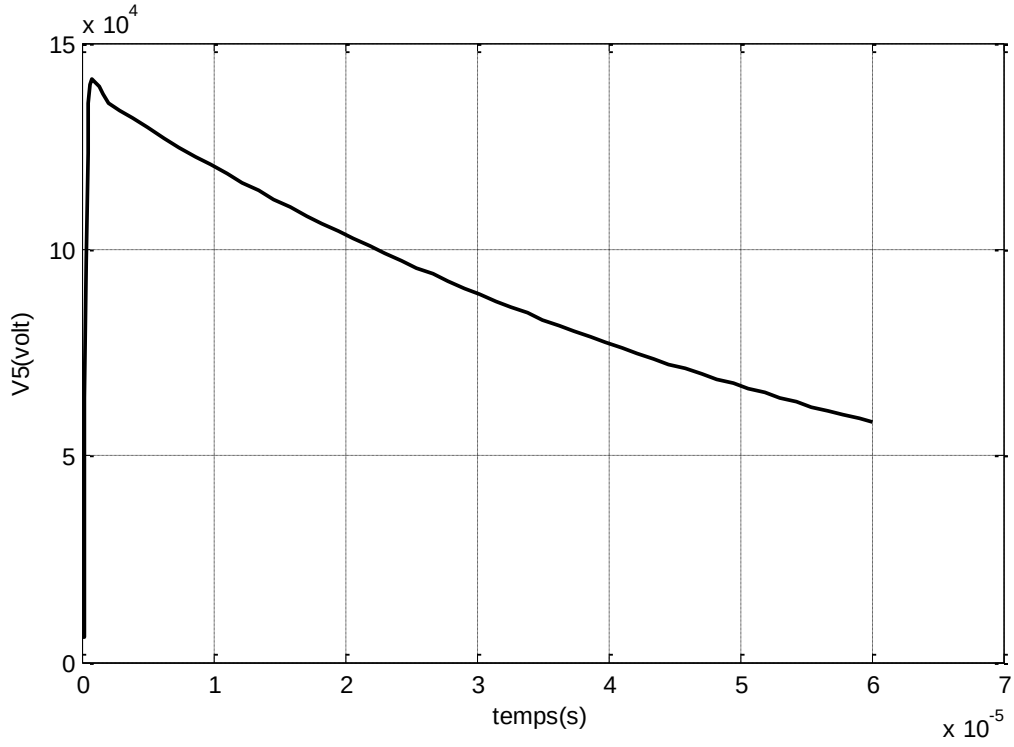


Figure III.25: Courbe de la tension de sortieV5 (volt) de 1' étage 5.

- La tension de sortie :

$$\mathbf{V_5 = nv_0 \quad [kV]} \qquad \text{(III.10)}$$

Application :

$$\mathbf{V_5 = 5(30)}$$

$$\mathbf{V_5 = 150 \quad [kV]}$$

La figure III.26 élabore la caractéristique de sortie des tensions d'impulsion aux bornes de chaque étage.

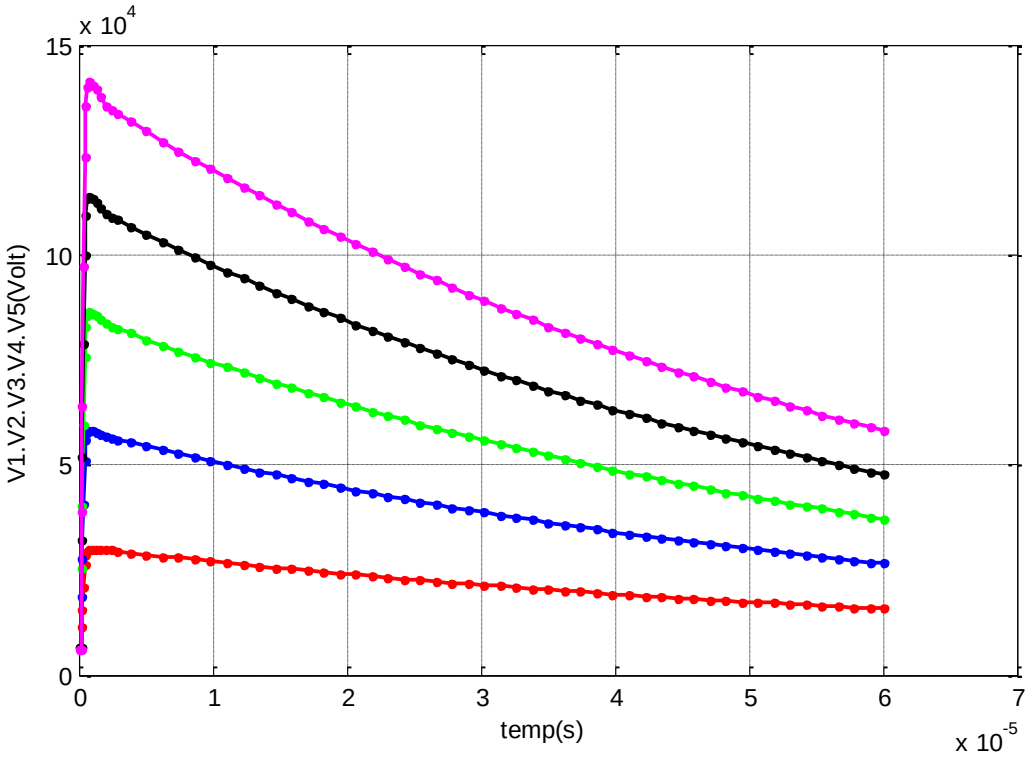


Figure III.26: Courbes de tension impulsionelle aux bornes de chaque étage.

III.4.3.6 -Interprétation des résultats :

D'après les résultats de la simulation, je remarque que :

- Les résultats obtenus en simulation sont concordant aux des résultats obtenus théoriquement.
- La tension de sortie impulsionelle égale à la tension d'entrée continue multipliée par le nombre d'étages de choc et c'est le résultat désiré.
- Une augmentation de la chute de tension lorsque on augmente le nombre d'étages de choc.

III.5-Conclusion :

Dans ce chapitre, J'ai effectué une simulation en utilisant le logiciel PSIM_version 6.0 dans la première partie et l'utilisation de logiciel Matlab-Simulink » avec Power Système Toolbox dans la deuxième partie.

D'après la simulation de générateur HVDC approuvé, j'ai trouvé que :

- Le circuit utilisé permet d'obtenir des tensions continues élevées à partir d'une source alternative.
- La valeur de la tension de sortie à voisine le double de la tension crête d'entrée multipliée par le nombre d'étages de la cascade.
- L'augmentation de chute de tension dépend de l'augmentation du nombre d'étages.

D'après l'étude menée de générateur HVAC, j'ai conclue que:

- Le montage utilisé permet d'obtenir des tensions impulsionelles à partir d'une source continue.
- La tension de sortie impulsionelle égale à la tension d'entrée continue multipliée par le nombre d'étages de choc ce qui permet alors d'atteindre des valeurs de tension de sortie très élevées, mais avec une chute de tension qui augmente en augmentant le nombre d'étages.
- Le rendement de la cascade de choc est limité par le nombre d'étages utilisés.
- Le modèle équivalent étudier contient parfaitement à une étude en très haute tension, exploité pour l'étude de phénomène de foudre.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un réseau électrique, la foudre peut également avoir un impact sur les générateurs en provoquant des perturbations dans le système de distribution d'électricité. Lorsqu'un éclair frappe une ligne électrique ou une sous-station, il peut entraîner des surtensions et des surintensités qui se propagent à travers le réseau. Ces surtensions peuvent endommager les générateurs connectés au réseau en surchargeant leurs composants électriques et en provoquant des pannes. Pour protéger les générateurs et le réseau électrique contre les effets de la foudre, des mesures de protection sont mises en place. Cela peut inclure l'installation de parafoudres sur les lignes électriques, la mise en place de systèmes de détection d'éclairs pour anticiper les risques de foudre, et la mise en œuvre de protocoles de sécurité pour minimiser les dommages en cas de surtensions. En résumé, la relation entre la foudre et les générateurs dans un réseau électrique est que la foudre peut causer des dommages aux générateurs en provoquant des surtensions et des surintensités dans le système de distribution d'électricité. Des mesures de protection sont nécessaires pour prévenir ces dommages et assurer la stabilité du réseau électrique.

Le premier chapitre, j'ai abordé les généralités et les concepts de base des générateurs de haute tension et l'impact de la foudre sur les réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre, j'ai étudié les trois types de générateurs de haute tension.

Dans le troisième chapitre, j'ai élaboré une simulation en utilisant le logiciel PSIM_version 6.0 dans la première partie et l'utilisation de logiciel Matlab-Simulink » avec Power Système Toolbox dans la deuxième partie.

En conclusion, la simulation d'un générateur de haute tension est un outil essentiel pour les ingénieurs et les chercheurs afin de comprendre et d'optimiser le fonctionnement des systèmes électriques à haute tension. Grâce à cette simulation, il est possible de prévoir et de résoudre les problèmes potentiels liés aux hautes tensions, d'améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité des équipements électriques, et de garantir la sécurité des installations. En somme, la simulation de générateurs de haute tension est un moyen précieux pour avancer dans le domaine de l'électrotechnique et contribuer au développement de technologies plus avancées et durables.

Comme perspectives d'avenir je propose :

- La simulation d'un générateur HVAC et leur réalisation.
- Réalisation des générateur HVDC et générateur de choc.


ANNEXES

1/ Générateur de haute tenson en courant continue à 5 étage :

*Paramètre de la cascade de CW :

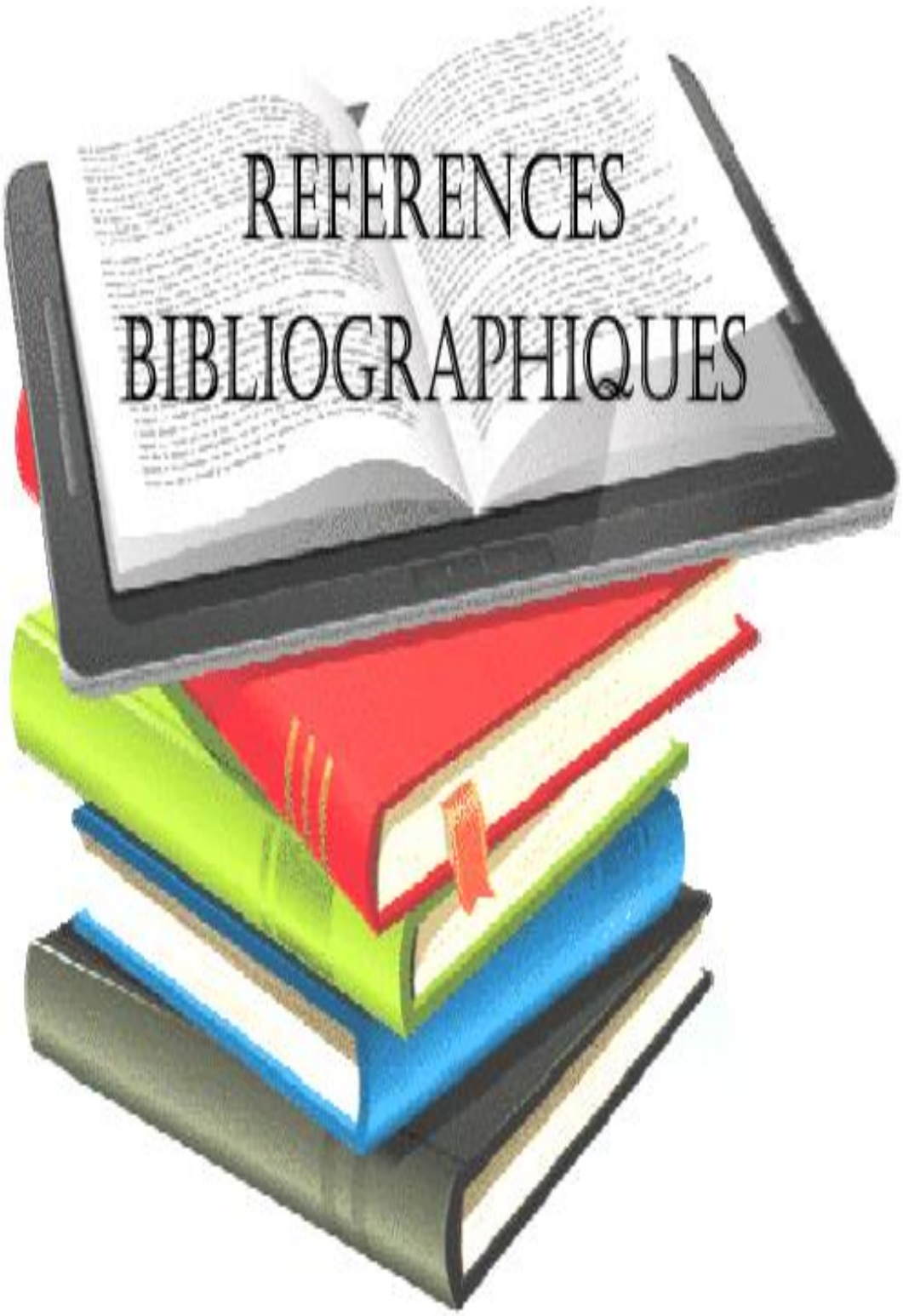
Symbole	Description	Valeurs	Unités
C1,C2,C3	Condensateurs de couplage de 1^{ér} étage.	100e-6	**F**
C10,C11,C12	Condensateurs de couplage de 2ème étage.	100e-6	**F**
C19,C20,C21	Condensateurs de couplage de 3ème étage.	100e-6	**F**
C28,C29,C30.	Condensateurs de couplage de 4ème étage.	100e-6	**F**
C37,C38,C39	Condensateurs de couplage de 5ème étage	100e-6	**F**
C4, C5,C6, C7,C8,C9	Condensateurs de lissage de 1^{ér} étage.	100e-6	**F**
C13,C14,C15, C16,C17,C18	Condensateurs de lissage de 2ème étage.	100e-6	**F**
C22,C23,C24, C25,C26,C27	Condensateurs de lissage de 3ème étage.	100e-6	**F**
C31,C32,C33, C34,C35,C36	Condensateurs de lissage de 4ème étage.	100e-6	**F**
C40,C41,C42, C43,C44,C45	Condensateurs de lissage de 5ème étage.	100e-6	**F**
R_{eq}	Résistance équivalente.	270	**kΩ**

***Paramètre du transformateur :**

Symbole	Description	Valeurs	Unités
$\mathbf{R_p}$	Résistance de l'enroulement primaire.	0.001	**Ω**
$\mathbf{R_s}$	Résistance de l'enroulement secondaire.	0.001	**Ω**
$\mathbf{L_p}$	L'inductance de l'enroulement primaire.	0.0001	**H**
$\mathbf{L_s}$	L'inductance de l'enroulement secondaire.	0.0001	**H**
$\mathbf{L_m}$	L'inductance de magnétisation.	0.5	**H**

2/ Générateur d'impulsion à 5 étages :

Paramètre	valeur
Tension en DC	30 kV
Etage 5	
Rc_1	100Ω
C_1	$0.7*10^{-6}$F
Rd	40 Ω
Rd_1	40Ω
Rs	27000Ω
C_s	$3000*10^{-12}$F
Rc_2	100Ω
C_2	$0.7*10^{-6}$F
Rd_2	40Ω
Rc_3	100Ω
C_3	$0.7*10^{-6}$F
Rd_3	40Ω
Rc_4	100Ω
Rd_4	40Ω
C_4	$0.7*10^{-6}$F
Rc_5	100Ω
Rd_5	40Ω
C_5	$0.7*10^{-6}$F


REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[1] BENCHAIB A, PoullainS, THOMAS J,« application d'une approche de typebackstepping basée sur les techniques de lyapunov au contrôle d'un système hvdc » alstom td, power électronicasresache team, 9 rue ampère, 91345 massy, france françois girard-adee≪ généralités sur la foudre et les surtensions≫, édition octobre 2008.

[2] FRANÇOIS GIRARD-ADEE≪ Généralités sur la foudre et les surtensions≫, édition octobre 2008.

[3] Djilali Ben Youcef, techniques de la haute tension, 2013.

[4] BRAHAMI Youssouf Bbrahami.youss@gmail.com ,cour , Ecole supérieure en génie électrique et énergétique d'Oran, 2020/2021.

[5] ***BELMAHI Fatma,*** **BAKDI Meriem**, mémoire de fin d'études contrôle d'une ligne hvdc pour le transit des puissances, université ibn-khaldoun de Tiaret, 2021-2022.

[6]JOCHEN KREUSEL, 2011-05-12. Abb hvdc_iassworkshop, high voltage direct curent(HVDC) power transmission Workshop, 'transporting tens of gigawatt of green power to theMarker, Potsdam.

[7] KHELIFA Djamel Eddine, DIDI Djafer, BEN MEBAREK Salah Eddine, modélisation et simulation d'un système de transport d'énergie à courant continu à haute tension (hvdc), université Echahid hamma lakhdar –el oued, 2021/06/16.

[8]KHALED KHODJA Oussama,BENOUADAH Mohamed chakib, apport des systèmes hvdc aux réseaux électriques, université ibn-khaldoun de tiaret.

[9] Thi Thu NgaVU « Étude des phénomènes de charges d'espace dans des matériaux de câbles et câbles modèles destinés à des applications au transport d'énergie en Haute Tension Continue (HVDC)», thèse de doctorat, Université Toulouse III, année 16 Juillet 2014.

[10]MICHEL Auget, MICHEL Lanoz, 2001. Haute tension,volumexxii écolepolytechnique fédérale de Lausanne, traité d'électricité deuxième édition.

[11] ROBERTO RUDERVALL, J.. CHARPENTIERP,RAGHUVEER Sharma,march 7-8, 2000.presented at energy week, washington, d.c, usa, high voltage directcurrent (hvdc)transmission systems, technology review paper, abb power systemssweden, world bank united states, abb financial services sweden**.**

[12] BELGACEMI Adel, Etude et modélisation d'un générateur de tension duchocGénérateur d'impulsion de Marx, université dr. Yahia fares de Médéa , 2022/2023.

[13] KAROUT Wassila, BELHADJ Soumia,analyse des surtensions electriques et leurs protections, badji mokhtar- annaba .

[14] AFFOLTER Jean-François≪Haute tension≫. Yverdon-les-Bains, octobre 2000.

[15]HANDALAM.A, AIT GHERBI S, BELKESSAC, Etude et réalisation d'un générateur d'ondes de choc Université Mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2012/2013.

[16]La protection contre les surtensions des installations à haute et très haute tension (63 à 400 KV). Electricité de France /centre de normalisation, 1980-EDF.

[17] AOUDIA Mustapha, AZZOUG Ali, BELHOCINE Merzouk, étude des protections du poste sourcefreha 60/30kv contre les surtensionsatmosphériques,université Mouloud mammeri de tizi-ouzou2011.

[18]Chapitre 1 **:** Généralités sur la haute tension Université Djillali liabes ,cours.

[19]Documentation SONALGAZ.

[20]ABDI.S, ≪cours du surtension Chapitre IV ≫, Université Yahia Farès de Médéa,Faculté de Technologie, Département de Génie Electrique Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et Automatique, 2021/2022.

[21] Schneider Electric-guide de l'installation. édition mars 2010.

[22]ABDI.S, ≪cours du générateurs de la haute tension Chapitre V ≫, Université Yahia Farès de Médéa,faculté de technologie, département de génie électrique laboratoire de recherche enélectrotechnique et automatique, 2021/2022.

[23] YATALIT.D ; MDERRADJ.M, ≪ Etude du générateur d'ondes de choc et réalisation d'un circuit d'essai ≫. Mémoire d'ingénieur, université de Tizi-ouzou 2002.

[24]FITCH R.A, "Marx -and Marx-like-High-Voltage generators", IEEE Trans. Nuclear Science, Vol. 18: pp. 190-198, August 1991 .

[25] BAPTISTE.C≪ Etude et réalisation d'un ensemble autonome démission d'onde Électromagnétiques de fortes puissances≫. Thèse doctorat 2008.

[26] FULCHIRON. D≪surtension et coordination de l'isolement≫ CT 151 édition décembre 1992.

[27] RAYNALD.R≪Etude de l'interaction des ondes de choc avec la glace à l'interface air-glace 2003.

[28] YOUSFI Abdessamad, YOUCEF Mohammed Rachid,réalisation d'une alimentation haute tension pour générateur d'ozone, higher school in applied sciences --Tlemcen, 2019/2020.

[29] JEROME.B≪contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires≫, thèse doctorat 2005.

[30]SUTHAR J. L, LAGHARI J.R, SALUZZOT.J, "usefulness of spice in high voltage engineering éducation", transactions on power system, vol.6 (august 1991): pp. 1272- 1278.

[31] MICHEL. A, MICHEL. I, haute tension, pour presses polytechniques, 2001.

[32]ALLARD Patrick,BOUCHARDSt-Pierre,ALEXANDRE M,conception d'ungénérateur d'impulsion, projet : 2010-161, Université du Québec à Chicoutimi,module D'ingénierie, génie électrique ,6gin555 projet de synthèse en ingénierie, 27 août 2010.

[33] Contribution à l'étude et à la réalisation de commutateurs et de générateurs haute tension transitoires. » Thèse doctorat, université de Pau et des pays de l'Adour Juillet 2005.

[34]LYONEL Baum« le générateur de marx » http://lyonel.baum.pagesperso-orange.fr/marx.html.

[35]MOSES.G.L, "impulse Levels of large high voltage générateurs", ieee transactions on power apparat us and system, vol. pas-84, no. 11 (novembre 1965) : pp. 1007-1010.