

Rapport d'analyse sur les installations électriques de la société ... par la société EduWatt

1 Instrumentation mise en œuvre

Analyseur de réseau : Metrel PHS 50
 Metrel 2192
 Chauvin-Arnoux Qualistar 8334

Pinces ampèremétriques : LEMFLEX 3000A
 Universal 1000A AC
 Ampflex 1000A AC

2 Objet de l'étude

Le client, distribué par EDF en 63 kV, assure une transformation HTB/HTA, pour effectuer une distribution en 20 kV sur le site. Malgré la présence d'une installation de batteries de condensateurs, une consommation excessive d'énergie réactive entraîne le client à payer de pénalités pendant la période allant du 1^{er} Novembre au 31 Mars.

Une expertise a déjà été réalisée mettant en évidence un problème d'harmoniques lors de l'enclenchement des batteries de condensateurs. Les conclusions préconisées par le bureau d'étude étaient l'installation d'une compensation d'énergie réactive avec inductance anti-harmonique.

L'objet de cette expertise consiste donc à définir la mise en place d'une compensation d'énergie réactive sur la base de mesures sur la distribution BTA, équivalentes à celles déjà effectuées, complétées par d'autres mesures, notamment pour l'analyse des tensions composées.

Cette étude comprendra, d'autre part, une campagne de mesures permettant l'analyse de la distribution BT comprenant les caissons Départ *Machine 1*, Départ *Machine 2*, Départ *Transforming* et Départ *Station d'épuration*, avec, pour chacun de ces départs, des mesures effectuées au droit de chaque transformateur HT/BT (17 transformateurs concernés) batteries de compensation activées et non activées.

3 Phénomène observé sur l'ensemble des départs BT

Après une explication générale du phénomène, nous détaillons tout d'abord un cas particulier (départ S21), puis fournissons pour tous les départs les valeurs qui permettent de décider de la solution à mettre en œuvre pour chaque départ.

3.1 Explication du phénomène

Lorsque aucun gradin de condensateur n'est enclenché, on observe, pour l'ensemble des départs comportant des gradins de compensation, que la tension est de bonne qualité avec un taux de distorsion harmonique en tension faible (i.e. < 5%).

Lorsque l'on enclenche les gradins, on voit apparaître des perturbations sur l'onde de tension de plus en plus importantes. Une analyse spectrale des signaux indique l'apparition d'harmoniques, dont la valeur et la fréquence varient avec le nombre de gradins enclenchés.

Une analyse plus fine montre qu'un maximum de perturbation est atteint (valeur maximale du taux de distorsion harmonique en tension) pour un nombre intermédiaire de gradins enclenchés, et si l'on continue d'enclencher des gradins au-delà de ce maximum observé, le taux de distorsion harmonique diminue progressivement.

Ce phénomène est aisément explicable par l'apparition, lors de la mise en service des condensateurs, d'un phénomène de résonance. En effet, le circuit vu par les courants harmoniques générés par la charge, est alors un circuit RLC (voir figure 1) constitué par l'impédance de la source en série avec les impédances de ligne, en parallèle avec les batteries de condensateurs.

Or la particularité d'un circuit RLC est que son impédance équivalente présente un maximum local pour une fréquence donnée (voir figure 2).

Si la charge génère des courants ayant une fréquence proche de la fréquence de résonance, on voit alors apparaître une tension $U(f)$ aux bornes de la charge ($U(f) = Z(f) * I_{\text{harm}}(f)$) proportionnelle à l'impédance.

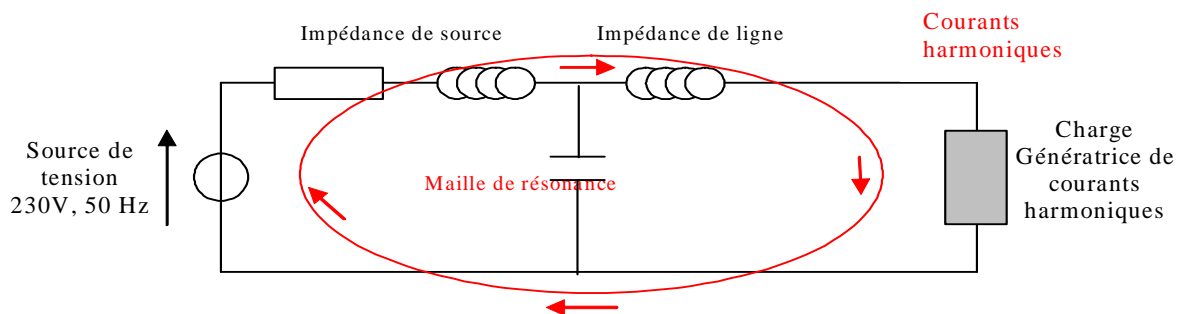


Figure 1 : schéma monophasé équivalent mettant en évidence une maille de résonance

Dans la situation du départ S21 discuté en détail au paragraphe 4 et alimenté par un transformateur de 2500 kVA, une bonne estimation de l'impédance de source est : $2\text{m}\Omega$ pour la partie résistive et $35\mu\text{H}$ pour la partie inductive. Pour les câbles d'alimentation depuis le transformateur vers le disjoncteur principal du départ, l'estimation prise pour l'impédance est de $14\text{m}\Omega$ pour la partie résistive et $30\mu\text{H}$ pour la partie inductive. Le départ S21 compte 10 gradins de compensation (7 gradins de 50 kVAr, et 3 gradins de 100 kVAr), chaque gradin de 50 kVAr. La capacité étoile équivalente pour un gradin de 50 kVAr est de $330\mu\text{F}$.

Il est alors aisé de calculer l'impédance équivalente en fonction de la fréquence et du nombre de gradins enclenchés ; le résultat est présenté sur la figure 2.

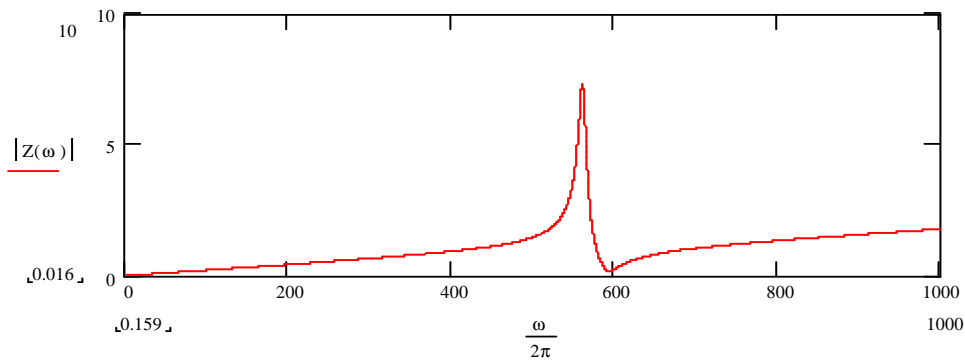


Figure 2 : Simulation mettant en évidence le phénomène de résonance sur le rang 11 (550 Hz)

On observe clairement sur cette figure que la valeur de l'impédance augmente de façon significative pour des fréquences se situant autour de 550 Hz. Si la charge génère des courants harmoniques de rang 11 (550 Hz), cela aura pour effet l'apparition d'harmoniques en tension sur les mêmes rangs.

Dans le cas présent, l'impédance de résonance varie avec le nombre de gradins enclenchés (augmentation de la valeur de la capacité). Plus ce nombre est élevé, plus la fréquence de résonance se rapproche des faibles rangs harmoniques.

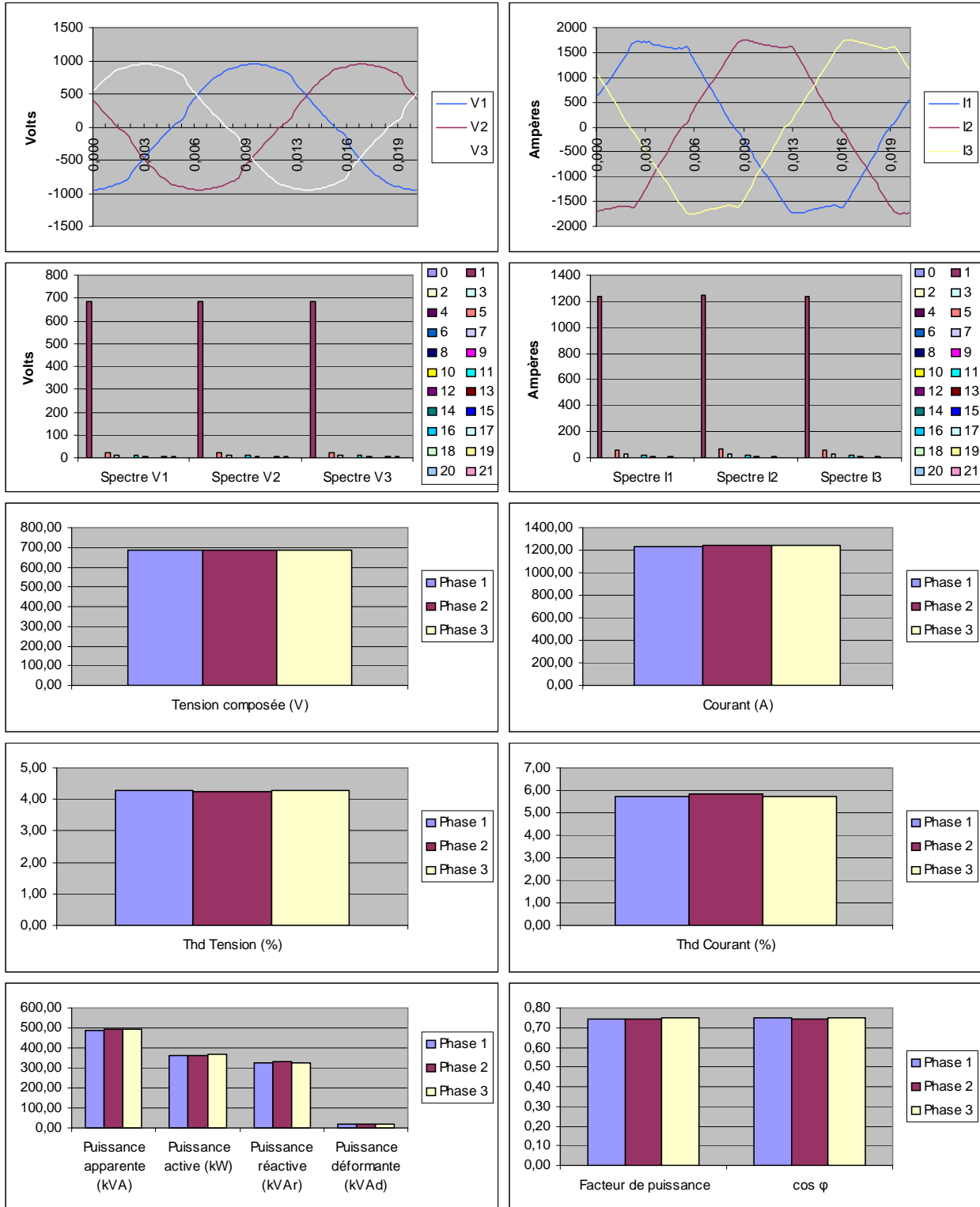
4 Analyse détaillée du départ S21 (cas particulier choisi au hasard sur les départs BT)

Nous avons effectué des mesures sur le départ S21, toutes batteries de condensateurs déconnectées, puis toutes batteries de condensateurs connectés, et enfin, avec le nombre de batteries correspondant à la situation la plus dégradée (maximum du taux de distorsion harmonique en tension).

Voir figures ci-dessous.

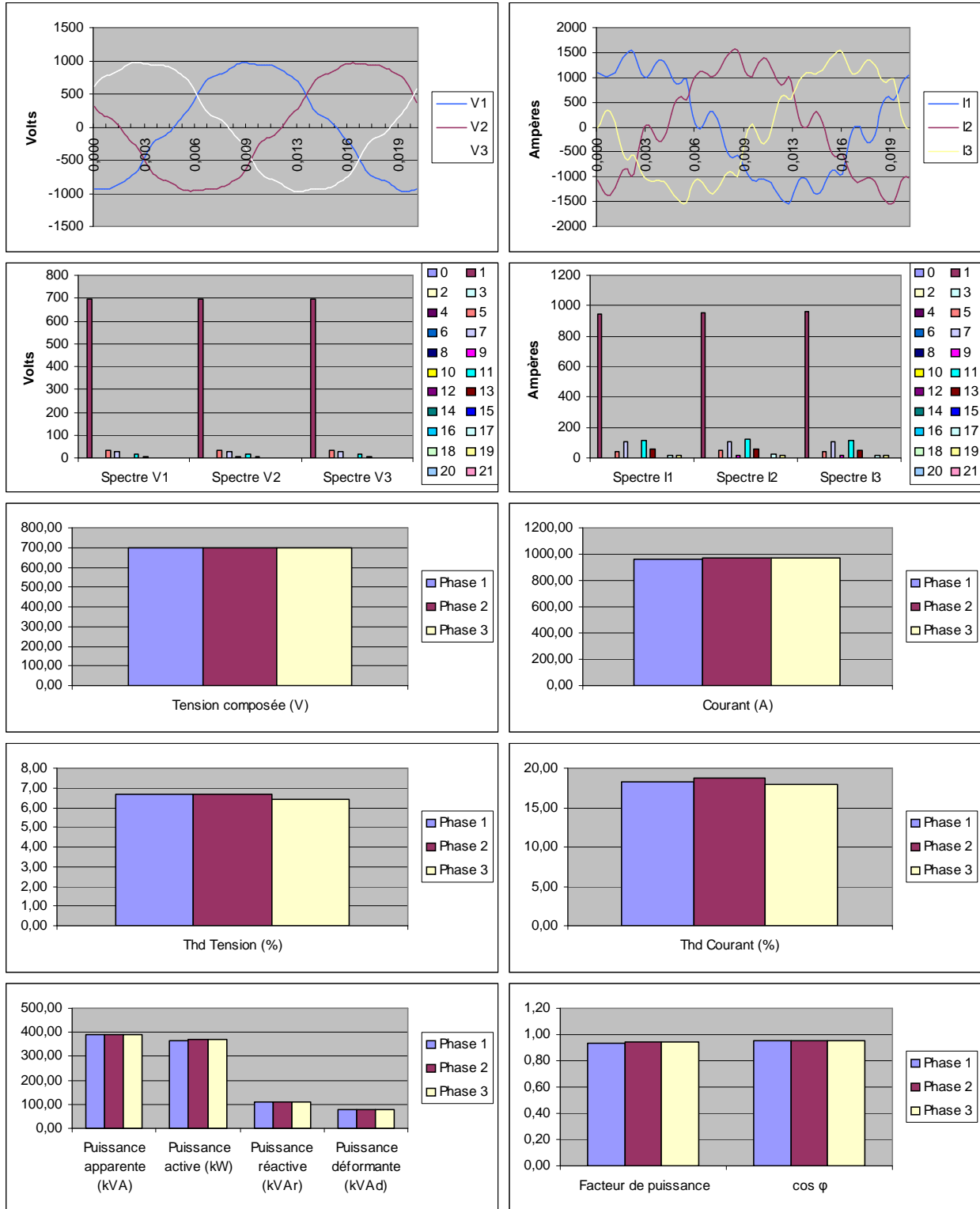
4.1 Sans condensateur

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	685,35	1234,60	489,10	364,70	325,42	17,74	0,75	0,75	4,28	5,72
Phase 2	685,56	1246,58	492,86	365,30	330,37	18,14	0,74	0,74	4,23	5,81
Phase 3	685,59	1243,53	492,17	368,64	325,59	18,16	0,75	0,75	4,28	5,73
Neutre		22,39								
Total			1474,14	1098,65	981,38	54,04				



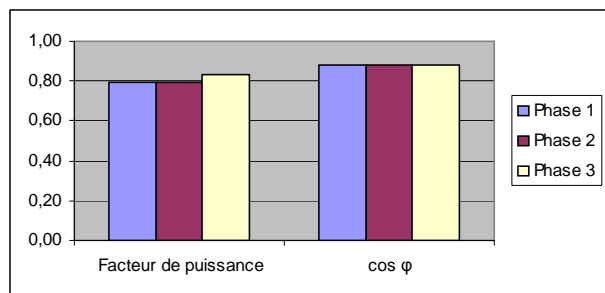
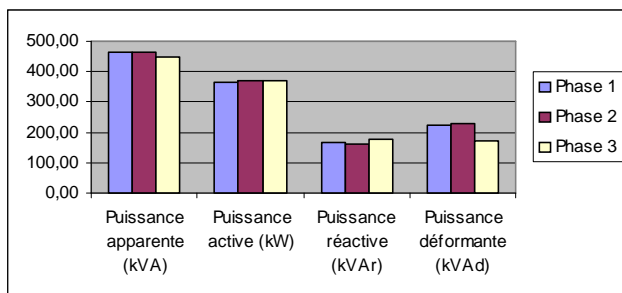
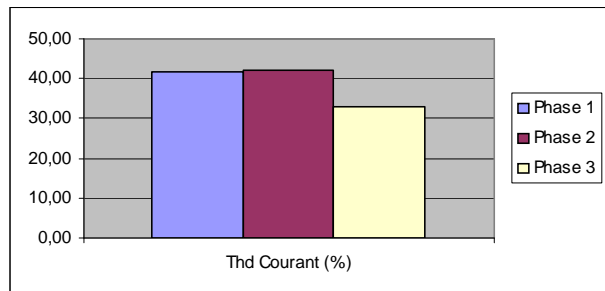
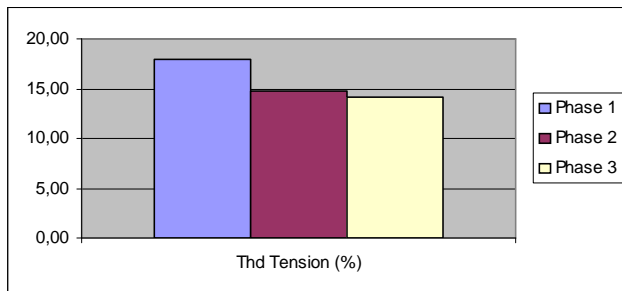
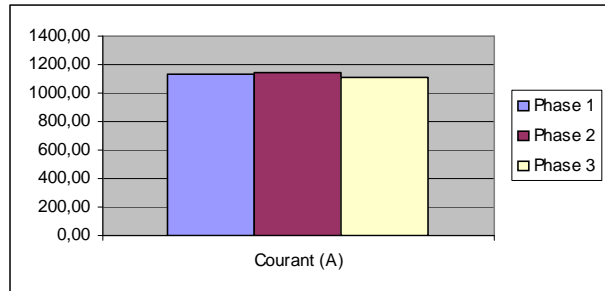
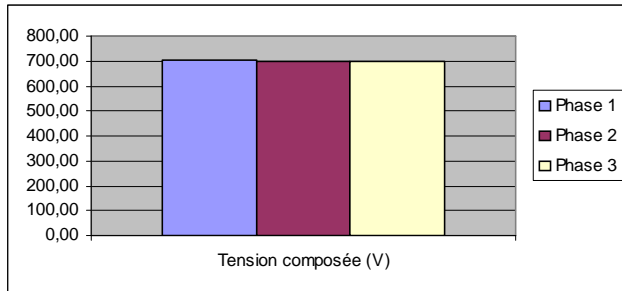
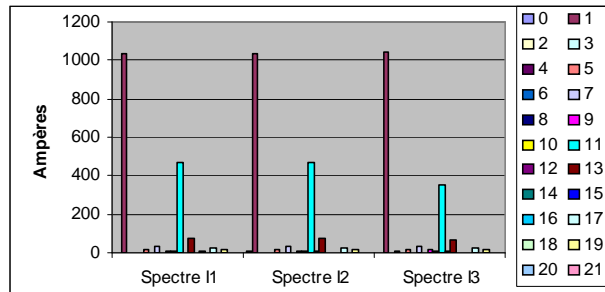
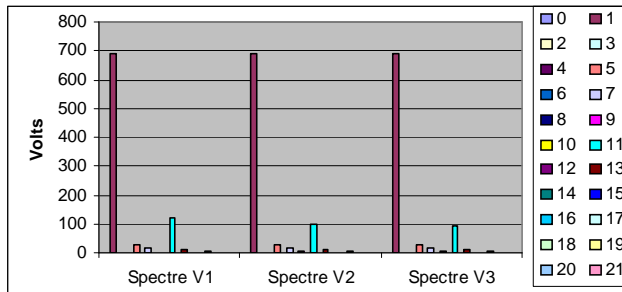
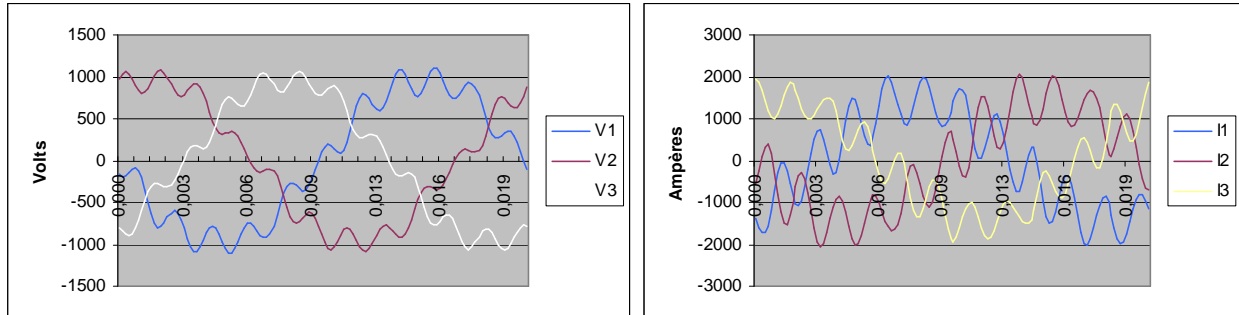
4.2 Avec toutes les batteries de condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	698,93	963,31	389,20	365,10	110,85	76,75	0,94	0,95	6,69	18,21
Phase 2	697,90	971,79	391,43	367,28	109,72	79,25	0,94	0,96	6,67	18,67
Phase 3	698,90	974,67	392,94	369,37	110,11	76,47	0,94	0,96	6,44	17,94
Neutre		13,06								
Total			1173,57	1101,75	330,68	232,47				



4.3 Plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	703,01	1138,03	461,27	366,59	166,32	225,21	0,79	0,88	17,93	41,69
Phase 2	699,15	1145,47	463,82	368,12	163,70	229,81	0,79	0,88	14,78	42,07
Phase 3	699,03	1106,14	445,65	370,77	176,70	172,94	0,83	0,88	14,12	32,99
Neutre		16,12								
Total			1370,73	1105,48	506,73	627,97				



4.4 Conclusions pour le départ 21

Lorsque aucune batterie de condensateur n'est enclenchée, on observe de faibles taux de distorsion harmoniques en tension (4,3%) et en courant (5,8%), avec comme composantes harmoniques principales les rangs 5, 7, 11 et 13.

L'énergie déformante est faible (54 kVAd), mais l'énergie réactive est très importante (981 kVAr), avec un $\cos \varphi = 0,75$.

Lorsque l'on enclenche les batteries de condensateurs afin de relever le facteur de déplacement, on voit apparaître des résonances en courants de plus en plus importante jusqu'à atteindre un maximum lorsque les gradins sont enclenchés pour un équivalent de compensation de puissance réactive à hauteur de 380 kVAr.

Les taux de distorsion harmonique sont alors très élevés en tension (15%) et en courant (40%).

Si l'on continue d'enclencher des gradins jusqu'à atteindre le maximum de compensation d'énergie réactive, on observe une diminution du phénomène de résonance, avec un retour à des valeurs de taux de distorsion harmonique acceptables : 6,6% en tension et 18,5% en courant.

L'énergie déformante appelée par le départ est donc relativement faible : 232 kVAd, ainsi que l'énergie réactive appelée : 330 kVAr, ce qui correspond à un $\cos \varphi = 0,95$ (supérieur au minimum fixé par EDF en deçà duquel des pénalités sont appliquées).

Nous envisageons deux solutions afin de répondre au besoin du client.

Première solution

Pour ce départ, une première solution consistera à :

- ne pas enclencher les gradins sur la période de mars à octobre (pas de pénalité appliquée par EDF pour l'énergie réactive fournie), et ce afin de ne pas utiliser les batteries de condensateurs (allongement du temps de vie) ;
- enclencher tous les gradins de condensateurs sur la période de octobre à mars afin de compenser l'énergie réactive appelée sur ce départ en compensant l'énergie déformante due aux harmoniques de courant par un compensateur actif d'harmonique (type Sinewave, MGE) pour les rangs les plus impactant (i.e. rangs 7 et 11).

Dans cette configuration, un soin particulier devra être apporté aux batteries de condensateurs. En effet, si certains des condensateurs venaient à se détériorer cela décalerait les rangs harmoniques et l'on risquerait de se retrouver dans la situation de plus forte résonance. Situation pour laquelle le compensateur se trouverait alors sous-dimensionné.

Le choix du compensateur actif d'harmonique devra faire l'objet d'essais afin de déterminer le nombre d'ampères déformants nécessaires pour chaque départ.

En effet, lorsque aucun gradin n'est enclenché, le nombre d'ampères déformants est alors de 75A par phase. Par contre, si tous les gradins sont enclenchés, le nombre d'ampères déformants est de 175A par phase.

On comprend dès lors la difficulté de choix du compensateur actif d'harmonique : il est impossible de savoir a priori si ce dernier est capable de faire disparaître les harmoniques de courant, évitant ainsi le phénomène d'amplification pendant les phases transitoires lors de l'enclenchement des batteries de condensateurs.

Seuls des essais pourront permettre de conclure quant à savoir si le départ 21 nécessite une compensation des harmoniques déformants à hauteur de 75A, ou de 175A, ou une quelconque autre valeur comprise entre ces deux limites.

Deuxième solution

Une autre solution consisterait à augmenter le facteur d'amortissement du circuit résonant RLC en venant placer une résistance d'amortissement en série de faible valeur (quelques $m\Omega$ pour limiter la chute de tension) sur chacune des lignes des câbles d'alimentation des batteries de condensateur. Cela aurait pour effet de venir amortir le phénomène de résonance, les harmoniques de courant auront alors plus de difficultés à venir impacter la tension au travers des faibles impédances de source (surdimensionnement de l'installation).

Là encore des essais devront être mis en place afin de parfaitement déterminer les valeurs des résistances à installer.

Il est possible que l'association des deux solutions proposées soit nécessaire, sur certains départs afin de parvenir au résultat escompté (voir analyse de chaque départ)

Analyse individuelle de chaque départ BT

Départs Machine 1

Départ S1

Batteries de condensateur

kVAr	K	L	M
1	50	50	50
2	50	50	50
3	50	50	50
4	50	50	50
5	50	50	50

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	683,57	951,67	375,96	261,00	270,23	14,28	0,69	0,70	4,67	6,14
Phase 2	683,04	965,11	380,50	263,57	274,00	15,31	0,69	0,69	4,71	6,21
Phase 3	683,91	956,26	377,30	259,20	273,80	14,09	0,69	0,69	4,44	6,05
Neutre		11,06								
Total			1133,76	783,77	818,04	43,67				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	698,21	758,05	305,93	275,62	14,85	131,93	0,90	1,00	9,18	42,66
Phase 2	698,49	763,22	307,46	279,09	14,50	128,20	0,91	1,00	9,79	41,07
Phase 3	699,12	777,69	313,87	278,42	14,88	144,15	0,89	0,99	9,91	45,25
Neutre		10,23								
Total			927,27	833,13	44,23	404,27				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	697,03	935,28	376,20	280,03	133,25	212,97	0,74	0,86	17,62	49,54
Phase 2	692,08	925,58	371,18	283,57	137,37	196,19	0,76	0,86	13,01	46,02
Phase 3	693,69	877,56	350,36	281,56	151,96	142,79	0,80	0,86	14,07	35,57
Neutre		12,57								
Total			1097,75	845,16	422,58	551,95				

Conclusions pour ce départ

- Les batteries de condensateurs compensent parfaitement l'énergie réactive ($\cos \varphi = 1$) avec une fourniture de réactif de 774 kVAr toutes batteries enclenchées pour 750 kVAr annoncés.
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est trop élevé (9,9%). Il convient donc d'adopter pour ce départ une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 60 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 325 A)

Départ S2

Batteries de condensateur

kVAr	J	K	L
1	45	50	50
2	45	50	50
3	50	38	50
4	50	50	50
5	50	50	50

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	677,46	1371,88	537,14	405,09	351,90	24,30	0,75	0,76	4,38	5,59
Phase 2	677,33	1361,67	532,38	396,21	354,78	24,21	0,74	0,75	4,40	5,70
Phase 3	678,09	1367,08	534,76	401,95	351,86	24,40	0,75	0,75	4,30	5,60
Neutre		25,48								
Total			1604,28	1203,25	1058,53	72,90				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	706,05	908,19	370,50	351,79	35,57	110,67	0,95	0,99	8,37	30,37
Phase 2	706,08	897,08	365,64	347,60	38,45	106,69	0,95	0,99	8,35	29,64
Phase 3	706,59	898,27	366,23	347,68	36,76	109,07	0,95	0,99	8,37	30,29
Neutre		22,22								
Total			1102,37	1047,07	110,78	326,44				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	702,25	1017,84	411,70	352,01	147,61	154,25	0,86	0,90	14,75	35,88
Phase 2	704,49	1064,92	433,06	352,03	139,00	210,46	0,81	0,90	16,50	46,02
Phase 3	700,52	1047,79	424,87	353,42	141,91	188,33	0,83	0,90	12,45	42,15
Neutre		20,63								
Total			1269,62	1057,47	428,52	553,04				

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs compensent parfaitement l'énergie réactive ($\cos \varphi = 0,99$) avec une fourniture de réactif de 948 kVar toutes batteries enclenchées pour 750 kVar annoncés.
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est trop élevé (8,37%). Il convient donc d'adopter pour ce départ une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 80 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 280 A)

Départ S3

Charge alimentée : pulpeur et agitateur

Batteries de condensateur

kVAr	I	J
1	50	50
2	50	50
3	50	50
4	50	Hors service
5	50	50

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	690,05	647,80	258,47	199,58	163,72	13,20	0,77	0,77	4,70	7,17
Phase 2	689,82	634,00	252,32	194,10	160,62	13,73	0,77	0,77	4,78	7,38
Phase 3	691,16	635,83	253,55	194,23	162,47	12,90	0,77	0,77	4,63	7,12
Neutre		15,43								
Total			764,34	587,91	486,81	39,83				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	699,40	553,68	223,67	204,39	1,87	90,84	0,91	1,00	7,51	40,68
Phase 2	699,54	548,78	221,45	198,10	-0,59	98,97	0,89	1,00	7,46	44,45
Phase 3	699,58	538,74	217,71	198,11	3,97	90,20	0,91	1,00	7,01	41,41
Neutre		12,99								
Total			662,83	600,59	5,25	280,01				

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs compensent parfaitement l'énergie réactive ($\cos \varphi = 1$) avec une fourniture de réactif de 481 kVar toutes batteries enclenchées pour 450 kVar annoncés.
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est inférieur (7,5%) au maximum prescrit par la norme (8%). Il n'est donc pas nécessaire pour ce départ de mettre en place des solutions. Toutefois, si des problèmes venaient à apparaître, il conviendra donc d'adopter une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 50 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 230 A)

Départ S6

Batteries de condensateur

kVAr	I	J
1	50	50
2	50	39
3	50	35
4	25	34
5	50	32

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	400,28	800,79	185,17	144,95	113,39	20,55	0,78	0,79	5,89	7,37
Phase 2	400,01	799,29	184,49	146,01	110,99	19,93	0,79	0,79	5,82	7,32
Phase 3	399,31	787,82	181,67	144,77	108,02	19,39	0,80	0,80	5,71	7,31
Neutre		24,13								
Total			551,33	435,73	332,41	59,86				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	406,76	747,56	175,88	152,99	-33,90	79,87	0,87	0,98	8,22	46,48
Phase 2	407,18	746,12	174,95	148,03	-42,54	82,98	0,85	0,97	8,09	48,89
Phase 3	407,17	751,43	176,82	153,84	-42,61	76,03	0,87	0,97	7,96	44,40
Neutre		22,98								
Total			527,65	454,86	-119,05	238,88				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	405,39	765,85	179,89	153,20	36,05	87,12	0,85	0,96	11,44	46,21
Phase 2	406,12	767,74	179,16	153,29	35,58	85,64	0,86	0,96	12,52	45,25
Phase 3	406,13	769,80	180,77	150,94	31,61	94,32	0,83	0,96	12,31	49,62
Neutre		22,94								
Total			539,82	457,43	103,24	267,08				

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs surcompensent l'énergie réactive ($\cos \varphi \text{ AV} = 0,98$) avec une fourniture de réactif de 450 kVar toutes batteries enclenchées pour 500 kVar annoncés.
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est proche (8,2%) au maximum prescrit par la norme (8%). Il n'est donc pas nécessaire pour ce départ de mettre en place des solutions. Toutefois, si des problèmes venaient à apparaître, il conviendra donc d'adopter une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 60 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 350 A)

Départ S9

Batteries de condensateur

kVAr	E	F	G
1	50	Hors service	40
2	50	50	50
3	35	50	40
4	40	40	50
5	50	40	40

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	395,11	1109,03	253,26	198,80	156,42	12,19	0,78	0,79	5,12	5,01
Phase 2	395,28	1105,01	252,03	202,34	149,82	11,58	0,80	0,80	5,10	5,32
Phase 3	394,85	1131,91	257,94	206,15	154,78	8,98	0,80	0,80	4,97	4,75
Neutre		45,06								
Total			763,23	607,28	461,02	32,75				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	407,01	1042,19	244,94	203,51	-80,83	109,76	0,83	0,94	9,30	48,15
Phase 2	407,05	1059,95	248,96	200,35	-85,70	120,39	0,80	0,94	8,82	51,44
Phase 3	406,52	1038,69	243,90	204,32	-79,65	106,76	0,84	0,94	8,68	46,88
Neutre		55,03								
Total			737,80	608,18	-246,18	336,91				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	399,26	977,70	225,73	191,86	86,96	81,13	0,85	0,90	9,79	33,43
Phase 2	398,45	982,24	225,95	193,68	86,05	78,35	0,86	0,90	7,88	31,52
Phase 3	398,45	965,84	221,86	193,31	92,94	56,72	0,87	0,90	7,73	23,57
Neutre		58,12								
Total			673,54	578,85	265,95	216,20				

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs surcompensent l'énergie réactive ($\cos \phi AV = 0,94$) avec une fourniture de réactif de 707 kVar toutes batteries enclenchées pour 750 kVar annoncés.
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est trop élevé (9,3%). Il convient donc d'adopter pour ce départ une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 65 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 505 A)

Départ S10

Charge alimentée : station d'épuration

Batteries de condensateur

kVAr	
1	80
2	40
3	80
4	80

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	400,71	487,65	112,98	83,95	75,25	7,42	0,74	0,75	4,83	6,59
Phase 2	400,88	503,78	116,52	86,87	77,30	7,51	0,75	0,75	4,72	6,77
Phase 3	401,07	497,66	115,14	84,49	77,88	7,40	0,73	0,74	4,58	6,44
Neutre		29,16								
Total			344,65	255,31	230,42	22,33				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	410,09	384,25	91,11	86,13	-0,71	29,68	0,95	1,00	7,02	33,77
Phase 2	409,90	396,04	93,72	89,11	1,86	28,97	0,95	1,00	7,05	31,99
Phase 3	410,39	391,02	92,53	87,25	1,55	30,75	0,94	1,00	7,18	34,30
Neutre		27,31								
Total			277,35	262,50	2,71	89,40				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	405,18	485,97	113,75	101,82	34,18	37,47	0,90	0,94	9,44	33,09
Phase 2	405,65	508,90	119,12	105,45	34,65	43,24	0,89	0,94	10,35	36,33
Phase 3	405,31	500,65	117,14	103,11	35,16	43,06	0,88	0,93	9,10	36,64
Neutre		27,06								
Total			350,02	310,39	103,99	123,77				

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs compensent parfaitement l'énergie réactive ($\cos \varphi = 1$) avec une fourniture de réactif de 230 kVar toutes batteries enclenchées pour 280 kVar annoncés.
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est inférieur (7,2%) au maximum prescrit par la norme (8%). Il n'est donc pas nécessaire pour ce départ de mettre en place des solutions. Toutefois, si des problèmes venaient à apparaître, il conviendra donc d'adopter une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 35 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 130 A)

Départs S4, S5, S7, S8

Charge alimentée : variateurs de vitesse et ventilateurs

Départ S4

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	704,31	854,15	346,42	316,40	63,81	125,81	0,91	0,97	10,18	30,76
Phase 2	700,38	862,06	349,02	323,95	52,22	118,94	0,93	0,98	9,82	30,02
Phase 3	700,54	879,51	358,67	333,97	62,28	115,00	0,93	0,98	9,43	29,45
Neutre		13,21								
Total			1054,11	974,32	178,30	359,75				

Départ S5

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	703,99	849,85	342,85	315,33	62,28	119,32	0,92	0,98	10,00	30,06
Phase 2	701,09	856,49	347,99	323,51	48,81	118,56	0,93	0,98	9,80	29,80
Phase 3	701,78	865,97	354,82	329,44	62,97	115,76	0,93	0,98	9,29	29,22
Neutre		10,28								
Total			1045,67	968,28	174,07	353,64				

Départ S7

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	699,54	846,77	341,02	315,83	61,85	112,79	0,93	0,98	10,17	29,59
Phase 2	697,68	857,54	348,18	321,73	56,09	120,71	0,92	0,98	10,02	29,36
Phase 3	700,08	865,38	349,67	324,48	65,91	112,42	0,93	0,98	9,55	28,76
Neutre		15,74								
Total			1038,87	962,05	183,85	345,91				

Départ S8

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	698,13	669,31	270,36	251,67	49,67	85,35	0,93	0,98	8,11	28,50
Phase 2	696,76	652,40	265,57	248,17	36,12	87,39	0,93	0,99	8,75	29,46
Phase 3	698,69	643,48	257,71	238,32	41,48	88,86	0,92	0,98	8,73	30,17
Neutre		12,82								
Total			793,64	738,16	127,27	261,60				

Départ S8 - Mesures effectuées avec les condensateurs des départs S3 et S6 enclenchés

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	703,35	651,55	264,55	247,90	38,47	83,98	0,94	0,98	7,96	28,04
Phase 2	704,72	635,96	258,27	242,49	29,36	83,89	0,94	0,99	8,28	28,88
Phase 3	704,96	621,45	254,68	237,03	36,44	85,76	0,93	0,99	8,07	29,91
Neutre		14,28								
Total			777,50	727,41	104,27	253,63				

Le cos ϕ étant supérieur à 0,93 pour chacun de ces départs il n'est pas nécessaire d'installer des batteries de condensateurs. Par ailleurs, ces départs n'alimentant que des variateurs de vitesse et des ventilateurs, il n'est pas nécessaire de compenser l'énergie déformante si aucun dysfonctionnement n'est observé.

L'enclenchement de batteries de condensateurs sur d'autres départs n'a pas d'influence sur ces départs.

Départs Machine 2

Départ S21

Batteries de condensateur

kVAr	Face S27	S21
1	50	
2	50	50
3	50	45
4	50	50
5	90	100
6	90	

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	685,35	1234,60	489,10	364,70	325,42	17,74	0,75	0,75	4,28	5,72
Phase 2	685,56	1246,58	492,86	365,30	330,37	18,14	0,74	0,74	4,23	5,81
Phase 3	685,59	1243,53	492,17	368,64	325,59	18,16	0,75	0,75	4,28	5,73
Neutre		22,39								
Total			1474,14	1098,65	981,38	54,04				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	698,93	963,31	389,20	365,10	110,85	76,75	0,94	0,95	6,69	18,21
Phase 2	697,90	971,79	391,43	367,28	109,72	79,25	0,94	0,96	6,67	18,67
Phase 3	698,90	974,67	392,94	369,37	110,11	76,47	0,94	0,96	6,44	17,94
Neutre		13,06								
Total			1173,57	1101,75	330,68	232,47				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	703,01	1138,03	461,27	366,59	166,32	225,21	0,79	0,88	17,93	41,69
Phase 2	699,15	1145,47	463,82	368,12	163,70	229,81	0,79	0,88	14,78	42,07
Phase 3	699,03	1106,14	445,65	370,77	176,70	172,94	0,83	0,88	14,12	32,99
Neutre		16,12								
Total			1370,73	1105,48	506,73	627,97				

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs compensent suffisamment l'énergie réactive (cos ϕ = 0,95) avec une fourniture de réactif de 650 kVAr toutes batteries enclenchées pour 650 kVar annoncés.
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est inférieur (6,7%) au maximum prescrit par la norme (8%). Il n'est donc pas nécessaire pour ce départ de mettre en place des solutions. Toutefois, si des problèmes venaient à apparaître, il conviendra donc d'adopter une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 75 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 175 A)

Départ S22

Batteries de condensateur

kVAr	Face S26A	Face S27
1	50	50
2	50	50
3	50	50
4	50	45
5	60	100

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	675,10	1709,58	667,46	536,71	395,97	25,71	0,80	0,81	4,13	5,22
Phase 2	674,43	1751,37	681,11	546,75	405,33	26,21	0,80	0,80	4,17	5,36
Phase 3	675,27	1750,23	682,11	546,53	407,34	25,55	0,80	0,80	3,94	5,10
Neutre		38,11								
Total			2030,68	1629,99	1208,63	77,47				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	691,86	1564,91	624,90	550,96	233,39	180,22	0,88	0,91	13,94	23,41
Phase 2	688,75	1591,21	634,14	556,50	237,57	189,72	0,88	0,91	11,16	23,77
Phase 3	689,07	1571,26	623,98	558,69	247,02	127,24	0,90	0,91	10,10	16,62
Neutre		38,14								
Total			1883,01	1666,15	717,97	497,18				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée est celle où tous les condensateurs sont enclenchés.

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs ne compensent pas suffisamment l'énergie réactive (cos $\phi = 0,91$). avec une fourniture de réactif de 491 kVar toutes batteries enclenchées pour 600 kVar annoncés.
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est trop élevé (14%). Il convient donc d'adopter pour ce départ une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 90 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 370 A)

ATTENTION : si de nouvelles batteries de condensateurs sont installées sur ce départ, cela aura un impact sur le dimensionnement de la résistance d'amortissement et/ou sur la valeur maximum des ampères déformants à compenser. Il est par ailleurs légitime de penser (d'après l'analyse des autres départs) que plus la puissance des batteries de condensateurs sera élevée, meilleur sera le taux de distorsion harmonique en tension, tout en minimisant le niveau d'ampères déformants à compenser.

Départ S24

Batteries de condensateur

kVAr	Face S26A	Face S27
1	50	50
2	50	50
3	50	Hors service
4	50	Hors service
5	100	100

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	395,06	1617,35	368,73	247,31	273,24	11,97	0,67	0,67	4,83	4,21
Phase 2	395,21	1651,86	376,69	251,59	280,10	11,82	0,67	0,67	4,78	4,23
Phase 3	395,22	1664,02	380,11	252,04	284,29	11,70	0,66	0,66	4,71	4,01
Neutre		41,04								
Total			1125,53	750,94	837,63	35,49				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	404,26	1208,88	282,09	241,89	127,26	69,76	0,86	0,88	6,64	22,39
Phase 2	404,08	1239,61	289,33	246,34	130,31	77,76	0,85	0,88	6,52	24,42
Phase 3	404,19	1240,30	289,38	247,42	134,10	67,37	0,86	0,87	6,13	21,34
Neutre		29,33								
Total			860,80	735,66	391,67	214,89				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	408,29	1371,06	322,19	227,45	143,91	177,10	0,71	0,81	16,46	48,03
Phase 2	406,02	1413,87	332,90	230,51	150,15	187,47	0,69	0,80	12,24	48,76
Phase 3	405,16	1289,74	301,32	227,85	166,64	105,41	0,76	0,79	10,78	30,75
Neutre		32,70								
Total			956,41	685,80	460,69	469,98				

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs ne compensent pas suffisamment l'énergie réactive (cos ϕ = 0,88). avec une fourniture de réactif de 446 kVar toutes batteries enclenchées pour 500 kVar annoncés.
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est inférieur (6,64%) au maximum prescrit par la norme (8%). Il n'est donc pas nécessaire pour ce départ de mettre en place des solutions. Toutefois, si des problèmes venaient à apparaître, il conviendra donc d'adopter une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 70 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 270 A)

Départ S27

Batteries de condensateur

kVAr	
1	50
2	50
3	90

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	399,61	655,03	151,28	131,40	74,30	9,91	0,87	0,87	5,43	8,08
Phase 2	399,37	634,73	146,27	128,18	69,62	10,93	0,88	0,88	5,05	8,46
Phase 3	399,84	619,00	142,83	123,66	70,91	8,92	0,87	0,87	4,56	7,64
Neutre		56,99								
Total			440,38	383,25	214,82	29,77				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	406,59	586,91	137,92	131,17	3,33	42,48	0,95	1,00	9,09	31,33
Phase 2	406,94	577,24	135,44	128,25	-0,43	43,54	0,95	1,00	9,40	32,60
Phase 3	407,58	554,16	130,44	122,68	0,86	44,33	0,94	1,00	9,57	34,39
Neutre		66,34								
Total			403,80	382,10	3,75	130,35				

La mesure correspondant à la plus forte résonance observée est celle avec tous les condensateurs enclenchés

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs compensent parfaitement l'énergie réactive ($\cos \varphi = 1$)
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est trop élevé (14%). Il convient donc d'adopter pour ce départ une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 55 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 184 A)

Départs S23, S25, S26

Charge alimentée : variateurs de vitesse et ventilateurs

Départ S23

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	702,24	1211,78	498,74	465,61	91,29	153,65	0,93	0,98	11,47	27,17
Phase 2	700,90	1181,66	472,11	437,61	81,47	157,31	0,93	0,98	11,58	27,99
Phase 3	707,27	1189,64	487,33	449,03	94,54	164,09	0,92	0,97	10,93	28,38
Neutre		19,43								
Total			1458,17	1352,25	267,30	475,06				

Départ S25

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	700,22	862,98	349,37	324,99	61,50	112,51	0,93	0,98	10,43	28,85
Phase 2	697,51	854,96	346,34	322,29	58,53	112,49	0,93	0,98	10,45	28,64
Phase 3	700,71	894,95	360,93	334,60	69,16	116,34	0,93	0,97	9,85	28,21
Neutre		35,41								
Total			1056,65	981,88	189,19	341,35				

Départ S26

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	699,42	1064,99	429,02	400,75	75,83	133,07	0,93	0,98	11,35	26,35
Phase 2	698,26	1047,95	421,30	393,44	73,80	131,35	0,93	0,98	11,35	26,85
Phase 3	694,13	1042,85	421,17	392,08	86,57	127,14	0,93	0,97	11,52	27,18
Neutre		9,18								
Total			1271,49	1186,27	236,20	391,55				

Le cos φ étant supérieur à 0,93 pour chacun de ces départs il n'est pas nécessaire d'installer des batteries de condensateurs. Par ailleurs, ces départs n'alimentant que des variateurs de vitesse et des ventilateurs, il n'est pas nécessaire de compenser l'énergie déformante si aucun dysfonctionnement n'est observé.

L'enclenchement de batteries de condensateurs sur d'autres départs n'a pas d'influence sur ces départs.

Départs Transforming

Départ TR1

Les transformateurs alimentant les départs TR1 et TR2 sont parallélisés. Les batteries de condensateurs sont installées sur le jeu de barre commun pour une puissance de 200 kVAr (une armoire condamnée sur les deux).

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	398,38	935,77	215,32	169,56	129,13	30,62	0,79	0,80	5,51	10,24
Phase 2	398,27	959,71	220,76	174,64	131,51	30,69	0,79	0,80	5,37	10,05
Phase 3	398,18	938,63	215,63	172,98	125,14	30,24	0,80	0,81	5,18	10,01
Neutre		51,23								
Total			651,71	517,17	385,78	91,56				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	400,67	1021,03	236,40	210,14	93,52	54,60	0,89	0,91	7,42	18,10
Phase 2	400,24	1062,29	245,63	217,62	99,72	55,06	0,89	0,91	7,25	17,54
Phase 3	400,41	1037,57	239,52	215,19	90,62	53,39	0,90	0,92	7,28	17,45
Neutre		65,06								
Total			721,55	642,95	283,86	163,05				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos ϕ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	396,84	1122,95	257,33	209,80	139,01	53,64	0,82	0,83	8,93	15,77
Phase 2	396,78	1145,74	262,59	214,78	140,73	54,93	0,82	0,83	9,02	15,84
Phase 3	396,41	1118,18	255,80	210,80	134,41	54,16	0,82	0,84	8,72	16,21
Neutre		76,99								
Total			775,72	635,39	414,14	162,73				

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs ne compensent pas suffisamment l'énergie réactive (cos $\phi = 0,91$).
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est inférieur (7,42%) au maximum prescrit par la norme (8%). Il n'est donc pas nécessaire pour ce départ de mettre en place des solutions. Toutefois, si des problèmes venaient à apparaître, il conviendra donc d'adopter une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 100 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 160 A)

ATTENTION : si de nouvelles batteries de condensateurs sont installées sur ce départ, cela aura un impact sur le dimensionnement de la résistance d'amortissement et/ou sur la valeur maximum des ampères déformants à compenser. Il est par ailleurs légitime de penser (d'après l'analyse des autres départs) que plus la puissance des batteries de condensateurs sera élevée, meilleur sera le taux de distorsion harmonique en tension, tout en minimisant le niveau d'ampères déformants à compenser.

Départ TR2

Les transformateurs alimentant les départs TR1 et TR2 sont parallélisés. Les batteries de condensateurs sont installées sur le jeu de barre commun pour une puissance de 200 kVAr.

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	396,41	1051,24	240,50	190,21	142,24	37,83	0,79	0,80	6,77	10,79
Phase 2	396,21	1068,90	244,78	194,05	144,06	38,87	0,79	0,80	6,56	10,90
Phase 3	395,74	1065,73	243,34	192,28	144,12	38,37	0,79	0,80	6,39	10,82
Neutre		55,99								
Total			728,63	576,54	430,42	115,06				

Mesures avec tous les condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	402,41	924,21	214,70	196,89	73,06	44,66	0,92	0,93	7,16	16,50
Phase 2	401,88	930,99	216,27	197,35	76,09	45,12	0,91	0,93	7,09	16,68
Phase 3	401,86	936,16	216,99	198,34	75,77	44,80	0,91	0,93	7,03	16,30
Neutre		54,90								
Total			647,96	592,57	224,91	134,58				

Mesure correspondant à la plus forte résonance observée

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	398,33	1014,50	233,09	191,25	124,59	47,24	0,82	0,83	8,19	15,66
Phase 2	398,54	1025,48	236,14	194,98	123,84	49,06	0,83	0,84	8,44	16,17
Phase 3	397,59	1013,64	232,76	190,71	124,25	48,67	0,82	0,83	7,93	16,32
Neutre		61,91								
Total			701,99	576,94	372,68	144,96				

Conclusions pour ce départ

- les batteries de condensateurs compensent parfaitement l'énergie réactive ($\cos \varphi = 0,93$)
- Lorsque toutes les batteries de condensateurs sont enclenchées, le taux de distorsion harmonique est inférieur (7,16%) au maximum prescrit par la norme (8%). Il n'est donc pas nécessaire pour ce départ de mettre en place des solutions. Toutefois, si des problèmes venaient à apparaître, il conviendra donc d'adopter une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 120 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : 155 A)

Départ TR3

Mesures sans condensateurs

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	405,25	813,12	190,09	139,92	128,38	8,76	0,74	0,74	4,43	6,29
Phase 2	405,18	793,53	185,62	132,66	129,54	8,60	0,71	0,72	4,57	6,55
Phase 3	405,04	808,96	189,35	138,28	129,05	8,84	0,73	0,73	4,35	6,44
Neutre		43,77								
Total			565,06	410,85	386,98	26,19				

Conclusions pour ce départ

- Il n'y a pas de batterie de condensateurs installés sur ce départ ($\cos \varphi = 0,74$)
- Il faudrait installer 250 kVAr de batteries de condensateurs sur ce départ pour ramener le $\cos \varphi$ à 0,95.
- Comme il n'est pas possible de prédire le comportement des harmoniques suite à l'installation des batteries de condensateurs, il conviendra faire une mesure du taux de distorsion harmonique en tension une fois toutes les batteries installées et enclenchées. Si le taux de distorsion harmonique en tension ainsi mesuré est inférieur à 8% il ne sera pas nécessaire d'envisager des solutions de compensation d'harmonique, sinon, on pourra envisager de mettre en place une des solutions mentionnées dans le chapitre 4.4 :
 - Une résistance d'amortissement à dimensionner, ou
 - Un compensateur actif d'harmoniques (valeur minimum des ampères déformants à compenser : 55 A, valeur maximum des ampères déformants à compenser : à définir)

5 Répercussion du phénomène sur la HT

L'ensemble des mesures effectuées sur la HTA 20 kV ou sur la HTB 63 kV mettent en évidence que les filtrages réalisés par les transformateurs HTA/BT (2500 kVA, et 800 kVA) et le transformateur HTB/HTA (36 MVA) limitent les phénomènes harmoniques de résonance décrits sur la BT - qui doivent donc être traités comme indiqué au §4 – mais que ces phénomènes influencent légèrement la consommation d'énergie réactive.

De plus, ce double interfaçage entre BT et HTB conduit à une consommation d'énergie réactive de nature inductive au niveau des deux niveaux de HT sensiblement plus élevée que celle mesurée sur la BT. Il convient, en effet, de rajouter à la puissance réactive consommée sur la BT par la charge de production, celle nécessaire à la magnétisation de tous les transformateurs HT/BT au niveau du 20 kV et à la magnétisation du transformateur HTB/HTA au niveau du 63 kV.

Le comptage étant effectué au niveau de la HTB, il convient donc de surcompenser au-delà de la limite de pénalisation (facteur de déplacement = 0,928) sur la BT pour obtenir cette limite sur la HTB.

Mesures utilisées pour établir le besoin complémentaire en énergie réactive

Sans condensateur – 63 kV

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	63601,95	185,89	6810,87	5656,83	3744,05	608,52	0,83	0,83	0,75	8,17
Phase 2	63745,49	186,42	6860,11	5672,10	3796,72	687,94	0,83	0,83	0,75	9,50
Phase 3	63592,89	184,53	6790,97	5591,46	3803,39	622,22	0,82	0,83	0,89	8,79
Neutre		20,48								
Total			20461,94	16920,38	11344,16	1918,68				

Sans condensateur – 20 kV

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	20015,44	555,67	6411,06	5436,20	3330,30	677,20	0,85	0,85	5,47	7,72
Phase 2	19993,69	549,80	6331,08	5378,38	3265,44	701,79	0,85	0,85	5,50	7,94
Phase 3	20014,59	556,07	6452,02	5520,58	3269,95	677,64	0,86	0,86	5,38	7,73
Neutre		7,25								
Total			19194,17	16335,16	9865,69	2056,62				

Avec tous les condensateurs – 63 kV

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	63936,43	162,21	5975,10	5567,53	1949,87	949,96	0,93	0,94	0,92	15,00
Phase 2	64050,93	163,42	6043,06	5618,98	1986,55	999,63	0,93	0,94	0,84	16,00
Phase 3	63852,76	160,78	5939,69	5549,15	1906,60	922,91	0,93	0,95	0,94	15,36
Neutre		19,95								
Total			17957,85	16735,66	5843,02	2872,50				

Avec tous les condensateurs – 20 kV

	Tension composée (V)	Courant (A)	Puissance apparente (kVA)	Puissance active (kW)	Puissance réactive (kVAr)	Puissance déformante (kVAd)	Facteur de puissance	cos φ	Thd Tension (%)	Thd Courant (%)
Phase 1	20701,38	486,60	5799,18	5480,16	1631,11	968,39	0,94	0,96	7,53	14,30
Phase 2	20686,73	483,40	5768,99	5448,13	1607,90	1006,86	0,94	0,96	7,47	14,63
Phase 3	20675,59	487,56	5841,67	5539,41	1588,58	957,33	0,95	0,96	7,29	14,19
Neutre		6,72								
Total			17409,84	16467,70	4827,59	2932,58				

Les 4 tableaux ci-dessus (valeurs caractéristiques mesurées en amont et en aval du transformateur HTB/HTA, sans compensation et avec la totalité de la compensation sur la BT) mettent en évidence les résultats suivants :

La mise en service de toutes les batteries de condensateurs apporte une compensation comprise entre 5 et 5,5 MVar (la variation est liée à la modification d'énergie réactive consommée par les

transformateurs selon la tension à leurs bornes et les courants qui les parcourent en présence ou absence d'harmoniques). Dans l'état de charge où les mesures ont été faites, cette compensation permet d'atteindre un facteur de déplacement ($\cos \phi$) supérieur à 0,928 sur la HTB mais ce n'est pas toujours le cas.

Dans l'hypothèse d'une puissance active totale consommée sur la HTB que nous fixerons à 17 MW, la puissance réactive totale hors de toute compensation serait voisine de 11,5 MVar (premier tableau). Pour atteindre un facteur de déplacement qui éviterait tout paiement de pénalité, il faudrait que le réactif total consommé au niveau HTB soit au maximum de $17 \times 0,4$ ($\tan \phi = 0,4$) soit 6,8 MVar. Il conviendra donc d'obtenir une compensation de $11,5 - 6,8 = 4,7$ MVar au niveau de la HTB. Pour obtenir ce résultat, la compensation étant installée sur la BT, il convient d'y ajouter toute la consommation de réactif de l'ensemble des transformateurs du site.

Cette valeur pour le transformateur HTB/HTA est obtenue par la différence des puissances réactives mesurées en son amont et son aval dans la situation actuelle avec compensation soit 1,1 MVar. Cette valeur peut paraître élevée mais il est en fait aisé de la justifier à partir des informations constructeur fournies et déterminées par les essais à vide, en court-circuit et la mesure des résistances d'enroulements

Pour l'ensemble des transformateurs HT/BT, elle est fournie par la différence entre la compensation réelle et en fonctionnement installée sur la BT (estimée en sommant les valeurs fournies dans les tableaux du §4 – réactif avec et sans compensation) et la mesure effectuée en aval du transformateur HT/BT avec tous les condensateurs en service, soit : $5,2 - 4,8 = 0,4$ MVar.

Il convient donc de disposer d'une disponibilité totale de $4,7 + 1,1 + 0,4 = 6,2$ MVar sur la BT pour réaliser une compensation adaptée sur la HTB qui permettra d'éviter le paiement de pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive sur le site.

6 Conclusions générales

ATTENTION, LES RESULTATS PRESENTES DANS CE RAPPORT NE VALENT QUE POUR LE NIVEAU DE CHARGE ACTUEL MESURE LORS DE NOTRE INTERVENTION.

Afin de s'affranchir du paiement des pénalités de puissance réactive sur la période de octobre à mars, nous vous préconisons de :

- Ne pas enclencher les gradins de condensateurs sur la période de avril à octobre inclus (pas de pénalité appliquée par EDF pour l'énergie réactive fournie), et ce afin de ne pas utiliser les batteries de condensateurs (allongement du temps de vie). Lorsque aucune batterie de condensateurs n'est mise en service, les taux de distorsion harmonique en tension mesurés sur l'ensemble des départs sont bas (de l'ordre de 5%), et aucun problème de qualité de l'énergie n'est à déplorer.
- Enclencher tous les gradins de condensateurs présents sur le site sur la période de novembre à mars afin de compenser l'énergie réactive appelée. Toutefois, la puissance totale de compensation réactive installée à ce jour n'est pas suffisante pour garantir un $\cos \phi > 0,928$ en amont du transformateur HTB/HTA. Il convient en effet de rajouter 1000 kVar de puissance de compensation sur l'ensemble des départs :
 - 250 kVar sur le départ TR3 sur lequel aucune batterie n'est installée
 - 200 kVar sur les départ TR1 et TR2 (parallélisés)
 - 350 kVar sur le départ S24
 - 200 kVar sur le départ S22

Dès lors que des gradins de condensateurs sont enclenchés, il y a risque de résonance due aux courants harmoniques appelés par les charges non linéaires alimentées. Nous avons constaté sur tous les départs ayant des batteries de condensateurs et sur lesquels nous avons procédé à des

mesures, que la résonance apparaissait pour un nombre de gradins enclenchés ne correspondant pas au maximum de gradins présents sur le départ.

Le taux de distorsion harmonique en tension passe donc par un maximum pour un certain nombre de gradins enclenchés, avant de diminuer de nouveau si le nombre de gradins enclenchés augmente.

Pour les départs présentant un taux de distorsion harmonique en tension supérieur au maximum défini par la norme EN50160 (8%) lorsque tous les gradins de condensateurs dudit départ sont enclenchés, il conviendra de mettre en place une des solutions mentionnées au paragraphe 4.4 :

- Une résistance d'amortissement (voir document en annexe) à installer au niveau des batteries de condensateurs, ou
- Un compensateur actif d'harmoniques (à dimensionner en fonction d'essais à réaliser sur site).

Ces deux solutions doivent être testées avant d'être mise en œuvre sur l'ensemble des départs concernés : S22, S27, S9, S1, S2, S3, S6 (par ordre d'importance décroissante).

Dans cette configuration, un soin particulier devra être apporté aux batteries de condensateurs. En effet, si certains des condensateurs venaient à se détériorer, cela décalerait les rangs harmoniques et l'on risquerait de se retrouver dans la situation de plus forte résonance, situation pour laquelle la solution adoptée (résistance d'amortissement et/ou compensateur actif) se trouverait alors sous-dimensionnée.