



Projet Acoustique :
Comparaison de trois qualités vocales en
comédie musicale
Analyse statistique de données répétées

-
Tutrices : Adeline Samson-Leclercq (LJK)
Maëva Garnier (GIPSA-LAB)

-
Auteurs
Tiphaine BITH
Gameli AMEDON

-
Master 2 Mathématiques et Informatique Appliquées - Statistiques

Table des matières

1	Contexte du projet	2
1.1	Présentation du GIPSA-LAB	2
1.2	Présentation de la base de données	2
1.3	Objectifs du projet	4
1.4	Méthodologie statistique	5
2	Analyse exploratoire des 8 descripteurs	5
3	Comparaison des 3 qualités pour chaque descripteur	7
3.1	Approche naïve par classification supervisée	8
3.2	Analyse de la Variance	9
3.2.1	Modèle mathématique	9
3.2.2	Résultats	11
4	Construction de profils pour chaque qualité	14
4.1	Modèle logistique	16
4.2	Résultats	16
4.2.1	Comparaison des deux qualités “Legit” et “Belt”	16
4.2.2	Comparaison des deux qualités “Chesty Belt” et “Twangy Belt”	17
5	Conclusion	19
6	Diagramme de Gantt	21
Annexes		22
1	ANOVA à effets aléatoires	25
2	ANOVA individus par individus	26
3	Graphiques des interactions	30
4	Régression logistique	36

1 Contexte du projet

1.1 Présentation du GIPSA-LAB

Le GIPSA-LAB (Grenoble, Images, Parole, Signal, Automatique) est un laboratoire de recherche mixte du CNRS, Grenoble-INP, de l'Université Joseph Fourier et de l'Université Stendhal, qui travaille sur la production et la perception de la parole. Il comprend trois départements :

- Automatique,
- Images-Signal,
- Parole-Cognition.

Nous effectuons notre projet avec Maëva Garnier, chercheur de l'équipe Parole Cerveau Multimodalité Développement, dans le département Parole-Cognition.

1.2 Présentation de la base de données

Notre projet s'inscrit dans le cadre de la thèse de doctorat de Tracy Bourne, réalisée à l'Université de Sydney, et encadrée par Maëva Garnier. En parallèle de sa thèse, Tracy est professeur de chant, responsable du département "comédie musicale" de l'Université de Ballarat (Australie). Elle a composé et produit plusieurs shows en Australie depuis une dizaine d'années. Sa recherche s'inscrit dans une démarche pédagogique, de façon à mieux comprendre et enseigner les techniques vocales utilisées dans les comédies musicales. En effet, de nombreuses recherches en acoustique de la voix ont déjà été menées sur les techniques vocales "lyriques" utilisées par les chanteurs d'opéra. Du fait de leur antériorité et de leur caractère élitiste, ces techniques sont souvent considérées comme une référence en terme esthétique mais aussi d'optimisation de la production vocale. A l'inverse, peu de connaissances ont pour l'instant été apportées sur d'autres techniques vocales utilisées dans des styles musicaux plus contemporains (Jazz, Pop, Rock, Métal). En Europe, ces styles musicaux sont souvent appris en autodidacte, si bien que les timbres de voix qui les caractérisent ont tendance à être considérés comme "non travaillés", voire même à risque pour la santé vocale. En effet, le succès d'émissions grand public comme Star Académie, La nouvelle star, The voice, ... ont amené beaucoup de jeunes amateurs à imiter ces voix sans l'encadrement d'un professeur de chant. Ces amateurs sont parfois trop jeunes par rapport au développement de leur larynx, ce qui a augmenté considérablement le nombre de consultations chez les phoniâtres et les orthophonistes et entretenu un doute quant à la dangerosité de ces pratiques vocales.

Tracy Bourne s'intéresse donc à caractériser 3 qualités vocales typiquement utilisées en comédie musicale : "Legit", "Chesty Belt" et "Twangy Belt". Après avoir réalisé une étude de ces 3 qualités pour les voix de femme¹, elle a ensuite mené une deuxième étude auprès de 6 chanteurs hommes. Le but de cette étude est d'identifier des caractéristiques acoustiques et physiologiques, descripteurs du son et du geste vocal produits, permettant de distinguer les qualités "Legit" et "Belt", et de distinguer les deux types de "Belt", "Chesty" et "Twangy". Dans cette expérience, il a été demandé aux chanteurs

1. Bourne et Garnier, JASA 2012

de produire des notes tenues pendant 10 secondes. Pour comparer les 3 qualités, celles-ci devaient être produites sur quatre mêmes notes (de Mi3 à La3), deux voyelles (/o/ et /ε/), et répétées plusieurs fois (en moyenne 5 fois). Au cours des 10 secondes de chacune de ces productions, 3 signaux ont été enregistrés simultanément, desquels ont été extraits 8 descripteurs :

- LE SIGNAL AUDIO a été acquis avec un microphone de pression, situé à 30 cm des lèvres du chanteur. Deux principaux descripteurs acoustiques ont été extraits :
 - Le niveau de pression acoustique (en anglais, Sound Pressure Level (SPL)) correspondant à l’intensité sonore de la voix. Il peut prendre des valeurs comprises entre 75 et 120 dB (donc nécessairement positives).
 - Le coefficient Alpha, correspondant au rapport entre l’énergie acoustique de la voix au-dessus et en dessous de 1kHz, et renseignant sur l’équilibre du timbre vocal en basses et hautes fréquences. Ce coefficient est exprimé en décibels. Il peut prendre des valeurs comprises entre -20 et +20 dB.
- LE SIGNAL ELECTROGLOTTOGRAPHIQUE (EGG) a été acquis avec un électroglottographe. Il s’agit d’un dispositif de mesure permettant d’explorer de manière non invasive le degré de contact entre les deux cordes vocales pendant leur vibration. Concrètement, deux électrodes sont situées sur le cou du chanteur, de parts et d’autres de son cartilage thyroïde (la “pomme d’Adam” bien visible chez les hommes). Un très faible courant les parcourt, de façon à mesurer la résistance électrique entre les deux électrodes. Cette résistance diminue avec le degré de contact entre les cordes vocales. Elle augmente, au contraire, lorsque les cordes vocales sont ouvertes. De ce signal EGG ont été extraits 3 descripteurs du comportement glottique :
 - L’amplitude du signal EGG(EGG amp), renseignant sur l’amplitude de la vibration des cordes vocales.
 - Le quotient ouvert (en anglais, Open Quotient (OQ)) correspondant au pourcentage de temps durant lequel les cordes vocales sont ouvertes au cours d’un cycle vibratoire. Il peut prendre des valeurs de 0 à 1.
 - Le quotient de vitesse de contact (en anglais, Contact Speed Quotient (Qcs)) correspondant au rapport entre l’amplitude des pics négatifs et positifs de la dérivée du signal EGG (marquant les instants d’ouverture et de fermeture des cordes vocales), renseignant sur le degré de symétrie du cycle vibratoire. Ce quotient peut prendre des valeurs strictement positives, de 1 à 10 environ.
- L’IMPÉDANCE ACOUSTIQUE DU CONDUIT VOCAL est acquise, en réponse à un signal d’excitation large bande. Le conduit oral est le conduit qui relie le larynx aux lèvres, également couplé avec le conduit nasal. Il peut être considéré comme un résonateur acoustique, avec une extrémité fermée au niveau de la glotte et ouverte au niveau des lèvres. L’impédance du conduit vocal permet de mesurer la fréquence des trois premières résonances du conduit vocal (R1, R2, R3). Ces fréquences varient avec les mouvements articulatoires (des lèvres, de la mâchoire, de la langue, ...) qui modifient la forme du conduit vocal, et par conséquent ses cavités de résonances. La longueur globale du conduit vocal et son ouverture

vs. rétrécissement aux extrémités affectent principalement la première résonance. Ainsi, R1 est principalement contrôlé par l'ouverture des lèvres et de la mâchoire et par les mouvements verticaux du larynx. Le principal point de constriction du conduit vocal est déterminé par la position de la langue, plus ou moins avant ou arrière dans la cavité buccale, et affecte la deuxième résonance (R2). Enfin, la troisième résonance (R3) est affectée par les mouvements d'étirement vs. d'arrondissement des lèvres.

Pour résumer, ces 8 descripteurs (R1, R2, R3, SPL, EGGamp, Alpha, OQ, Qcs) ont été mesurés chez 6 chanteurs (B2, B3, B5, B6, B10, B11) lors de 677 productions caractérisées par la qualité ("Legit", "Chesty Belt" et "Twangy Belt"), la note, la voyelle et la répétition. Une description plus précise de ces productions est donnée en Annexe. Nous sommes en présence de données appariées. On appelle "données appariées" des mesures recueillies chez plusieurs individus dans les mêmes conditions (ici les facteurs qualité, note et voyelle). Ceci crée une variabilité inter-individuelle, c'est-à-dire que les individus peuvent ne pas réagir de la même façon, mais avec une certaine variabilité par rapport à la tendance moyenne dans la population. De plus, on dispose de données répétées, puisque chaque production de chant a été répétée en moyenne 5 fois. On suppose dans la suite que ces répétitions sont indépendantes les unes des autres (il n'y a pas de phénomène d'apprentissage au fur et à mesure des répétitions). Ces répétitions permettront de mesurer la variabilité intra-individuelle, qui se distingue donc de la variabilité inter-individuelle décrite précédemment.

1.3 Objectifs du projet

Les objectifs de ce projet sont au nombre de deux.

1. Le premier objectif de notre étude est de voir s'il y a une différence significative entre les différentes qualités vocales de notre base. Plus précisément, pour chacun des 8 descripteurs peut-on distinguer la qualité "Belt" de la qualité "Legit" et peut-on distinguer "Chesty Belt" de "Twangy Belt" ?
2. Le deuxième objectif est complémentaire. Il s'agit pour chacune des 3 qualités de sélectionner les descripteurs qui la caractérisent, et ainsi proposer un profil synthétique de chaque qualité. Ceci permettra aux professionnels de bien caractériser ces différentes qualités pour mieux les enseigner, et mesurer les risques pour la santé vocale.

Les livrables attendus dans ce projet sont les résultats et analyses qui doivent permettre de répondre aux deux objectifs de ce projet. Une partie des livrables sera constituée des modèles optimaux des ANOVA qui permettent de voir la significativité du facteur qualité par rapport aux différents descripteurs. La deuxième partie va fournir un profil des différentes qualités en fonction des différents descripteurs avec un ajustement sur les facteurs Note et Qualité.

1.4 Méthodologie statistique

La première étape indispensable est exploratoire (section 2) et consiste à étudier les caractéristiques de notre base en général, les données marginales. Pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés dans ce projet, nous aurons à utiliser des méthodes et techniques statistiques bien précises pour chacune des deux objectifs énumérés plus haut.

Ainsi pour le premier objectif, nous ferons une classification supervisée (section 3.1) pour savoir si l'on peut séparer en 3 groupes les différentes qualités. Ce sera une approche univariée c'est à dire que nous prendrons les descripteurs un par un et qu'on essaiera de regrouper en 3 groupes qui devraient correspondre aux différentes qualités vocales. Toujours pour le premier objectif, nous allons faire une Analyse de la Variance (ANOVA, section 3.2). Nous ferons deux étapes avec cette technique. La première étape sera une approche par groupe et par descripteur. On appelle "approche par groupe" le fait d'analyser les données des 6 chanteurs simultanément (il faut alors tenir compte des deux types de variabilités décrits ci-dessus). Si les résultats de l'approche par groupe ne permettent pas de distinguer les différents types de qualités, on fera une approche par individu pour voir si cela donne plus d'informations que l'approche par groupe. L'approche individu par individu consiste à s'intéresser aux données des descripteurs par chanteur. La variabilité inter-individuelle n'intervient plus dans ce cas.

Pour le deuxième objectif, qui est de voir quelles sont les variables qui sont significatives pour expliquer un groupe de qualité, nous allons faire une régression logistique (section 4). Nous sommes cette fois ci dans une approche multivariée où nous prenons ensemble toutes les variables dans notre modèle pour faire l'analyse.

Pour chaque section, nous commençons par présenter la méthodologie statistique utilisée puis les résultats obtenus et les conclusions que nous pouvons en tirer.

2 Analyse exploratoire des 8 descripteurs

Nous avons effectué une analyse exploratoire de notre base de données dont les résultats sont présentés dans la Table 1 et la Figure 1. Elle a été faite étape par étape en partant d'une analyse univariée jusqu'à l'analyse multidimensionnelle qu'on effectuera en composantes principales.

Les 8 descripteurs se séparent en trois groupes : les descripteurs glottiques, les descripteurs acoustiques et descripteurs articulatoires du conduit vocal. Leurs indicateurs statistiques (moyenne, quartile, coefficient de variation...) sont donnés dans la Table 1.

Pour pouvoir comparer les descripteurs entre eux, nous utilisons un coefficient de variation. Il s'agit de la moyenne de chaque descripteur sur son écart-type. On observe un coefficient de variation deux fois plus fort pour le descripteur du conduit vocal R3 que pour les descripteurs R1 et R2. On remarque pour les descripteurs acoustiques un contraste entre le coefficient de variation qui est très élevé pour SPL (21.15) et celui de Alpha qui est proche de 0. Le coefficient de variation est faible pour les descripteurs

	Conduit Vocal			Acoustiques		Glottiques		
	R1	R2	R3	SPL	Alpha	EGG	OQ	Qcs
1er Quartile	592	1217	2466	118.2	-2.6	0.11	0.41	0.72
Moyenne	659	1468	2616	121	-0.3	0.17	-0.44	3.6
3ième Quartile	732	1744	2778	124.5	1.7	0.23	0.48	4.68
coeff de variation	6.26	4.75	13.45	21.15	-0.07	2.689	9.84	2.41

TABLE 1 – Indicateurs statistiques des 8 descripteurs

glottiques.

Nous allons maintenant visualiser nos données avec une approche multidimensionnelle en utilisant l’analyse en composantes principales (ACP).

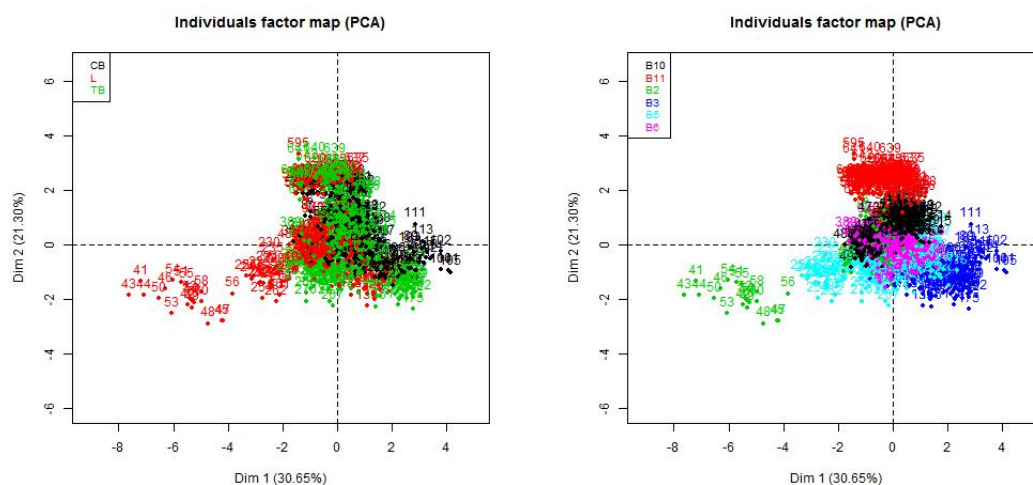


FIGURE 1 – Représentation des données selon les axes principaux de l’ACP réalisée sur l’ensemble des descripteurs, à gauche en distinguant les 3 qualités “Legit” (L), “Chesty Belt” (CB) et “Twangy Belt” (TB) et à droite en distinguant les 6 chanteurs.

Nous avons réalisé une Analyse en Composante Principale sur l’ensemble des descripteurs acoustiques, glottiques et articulatoires du conduit vocal, et toutes les observations. On représente graphiquement nos observations dans le premier plan factoriel (Figure 1). Nous trouvons un groupe de données qui est en marge des autres. Sur la figure à gauche, on a représenté les trois qualités. Il est difficile de les distinguer clairement. Sur la figure à droite, on a représenté les 6 chanteurs. Il apparaît que le groupe marginal est constitué des données du chanteur B2. En retournant écouter les productions concernées, il apparaît que ce chanteur a produit la qualité “Legit” avec un timbre effectivement très différent des autres chanteurs et des autres productions, utilisant son mécanisme larngé M2 (plus communément appelé “voix de tête”, et peu fréquemment utilisé par

les hommes) là où les autres chanteurs ont utilisé leur mécanisme M1 (ou “voix de poitrine”). De façon intéressante, l’usage de M1 vs. M2 est justement ce qui caractérise principalement la différence de qualité entre “Belt” et “Legit” chez les femmes. Il semblerait que ce ne soit pas le cas chez les hommes, sauf pour ce chanteur B2. On observe aussi une homogénéité des données d’un même chanteur, ce qui montre une grande variabilité inter-individuelle et une homogénéité intra-individuelle, quel que soit le facteur note et voyelles. Cela confirme qu’il faudra tenir compte de ces variabilités dans la suite des analyses. Nous nous sommes posés la question de savoir si les voyelles influencent la représentation des données. Nous en avons supposés que ce facteur pouvait influencer surtout sur les descripteurs du groupe lié au conduit vocal, car ces voyelles se prononcent de façon très distincte. Pour cela, on réalise une ACP sur seulement les descripteurs du conduit vocal et l’ensemble des observations. On obtient la Figure 2.

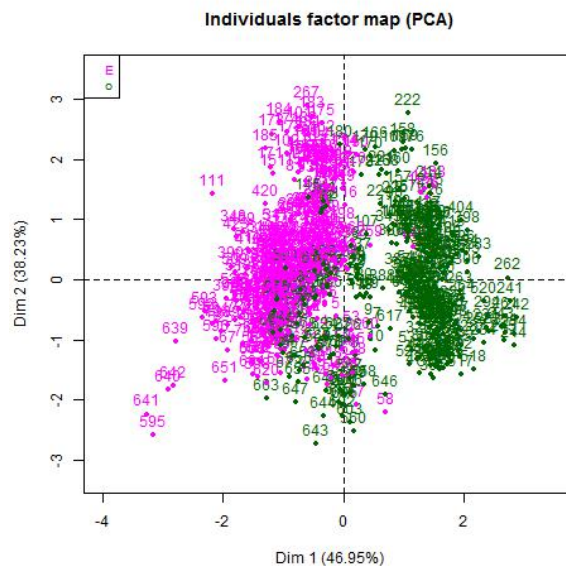


FIGURE 2 – Représentation des voyelles /o/ et /ε/ selon les axes principaux de l’ACP réalisée sur les descripteurs articulatoires (R1, R2, R3)

On observe qu’il y a clairement une séparation entre les observations produites sur la voyelle /ε/ et celles produites sur la voyelle /o/. Le facteur voyelle a donc une grande importance, dont il faudra tenir compte dans la suite.

3 Comparaison des 3 qualités pour chaque descripteur

Dans cette partie, nous allons chercher s’il y a une différence entre les trois qualités vocales. Nous allons décrire une variable quantitative (un descripteur) en fonction de trois variables qualitatives (les facteurs Qualité, Note et Voyelle). L’objectif étant de pouvoir distinguer les qualités “Legit” de “Belt”, et “Chesty Belt” de “Twangy Belt”.

3.1 Approche naïve par classification supervisée

La classification supervisée permet de modéliser une relation entre des observations (un descripteur) et un facteur explicatif (ici le facteur Qualité) pour estimer une valeur du facteur avec de nouvelles mesures du descripteur et aussi comprendre la relation entre le descripteur et le facteur. Nous faisons l’hypothèse que les classes qu’on aura à définir devraient correspondre aux 3 modalités de notre facteur Qualité, c’est à dire “Legit” (L), “Chesty Belt” (CB) et “Twangy Belt” (TB).

Nous avons eu recours à la fonction `rpart` (du package “`rpart`”) de R pour faire notre classification supervisée. Nous avons procédé de deux manières : dans un premier temps nous avons réalisé une classification de chaque descripteur selon tous les chanteurs, puis chanteur par chanteur. Dans les deux cas, la fonction `rpart` ne nous a pas permis de classifier correctement nos données, c’est à dire que les classes observées par cette méthode statistique automatique ne correspondent pas aux 3 qualités “Legit”, “Twangy Belt” et “Chesty Belt”. En effet, en utilisant les effectifs des qualités dans chaque classe de l’arbre, nous avons pu calculer le taux de bien classés, c’est à dire d’individus appartenant bien à la classe dans laquelle ils sont définis à priori. On obtient des taux de 45 à 50%. Par exemple, la Table 2 représente le pourcentage de présence de chaque qualité dans les classes définies par la fonction “`rpart`” pour le descripteur OQ, sur l’ensemble des chanteurs.

	CB	L	TB
Classe1	45%	31%	33%
Classe2	33%	16%	45%
Classe3	22%	53%	21%
Total	100%	100%	100%

TABLE 2 – Tableau des pourcentages de présence de chaque qualité dans les classes obtenues par classification sur le descripteur OQ, sur l’ensemble des chanteurs

On observe pour la classe 1, 45% de “Chesty Belt”, 31% de “Legit” et 33% de “Twangy Belt”. On ne peut donc pas labelliser cette classe comme celle correspondant à la modalité la plus représentée, “Chesty Belt”. Cela est identique pour les classes 2 et 3.

Ceci signifie qu’il nous est donc impossible d’expliquer ce facteur selon les descripteurs, que ce soit individu par individu, ou pour tous les chanteurs. Le problème de distinguer les 3 qualités L, CB et TB est donc complexe. Il provient du fait qu’il y a une forte variabilité inter individuelle déjà évoquée précédemment et que les données sont appariées. L’objectif de la deuxième approche utilisée, l’analyse de la variance (section 3.2) est de prendre en compte le caractère apparié et répété des données de la base.

3.2 Analyse de la Variance

Le but de cette méthode est d'expliquer la part de variabilité d'un descripteur par les trois qualités et les deux autres facteurs Note et Voyelle. Nous allons procéder suivant deux étapes : la première sera d'expliquer cette part de variabilité en regardant si on observe un effet de groupe, c'est à dire en analysant les données des 6 chanteurs simultanément (modèle ANOVA à effets aléatoire). Cette étape va nous permettre de tenir compte de la variabilité inter-individuelle (données appariées) de chaque descripteur, à l'aide de l'introduction d'effets aléatoires dans le modèle ANOVA. La deuxième étape sera toujours d'expliquer cette variabilité mais cette fois individu par individu (modèle ANOVA individu par individu).

Dans les deux cas, nous avons cherché à construire un modèle linéaire permettant d'expliquer chaque descripteur en fonction des variables explicatives qui sont les facteurs Qualité, Note et Voyelle. Nous avons travaillé à partir des modèles complets comprenant ces trois facteurs et toutes les interactions possibles entre ces facteurs, pour ensuite trouver un modèle dit "réduit", qui comprend moins de variables explicatives mais qui explique le maximum de la variabilité (cf Table 7). Une fois que nous avons trouvé ces modèles réduits, nous nous préoccupons seulement des modèles où le facteur Qualité apparaît. Dans ces cas là, nous effectuons un test de comparaison entre le modèle comprenant le facteur Qualité et le même modèle mais sans le facteur Qualité.

Enfin, nous procéderons à des tests de contraste. Le premier sera de tester si une différence significative existe entre la qualité "Belt" et la qualité "Legit". Pour le second, on se placera dans la qualité "Belt" et on essaiera de voir si le test nous permet de séparer "Chesty Belt" de "Twangy Belt".

Pour la suite, nous présenterons les modèles mathématiques qui correspondent à nos deux approches à savoir ANOVA à effets aléatoires et ANOVA individu par individu, les résultats obtenus après implémentation de ces modèles sous R et les conclusions des tests statistiques.

3.2.1 Modèle mathématique

Dans cette partie, on cherche à expliquer chaque descripteur l'un après l'autre en fonction des différents facteurs du protocole : Qualité, Note et Voyelle. On cherche à expliquer une variable quantitative par des facteurs qualitatifs. On utilise donc le cadre classique de l'analyse de la variance (ANOVA). Nous décrivons d'abord le modèle qui analyse les données de tous les individus en même temps (ANOVA à effets aléatoires) puis le modèle ANOVA standard individu par individu.

3.2.1.a ANOVA à effets aléatoires

Nous sommes dans le cas des modèles à effets aléatoires. On introduit dans le modèle classique d'ANOVA un effet aléatoire, c'est-à-dire une variable aléatoire qui est propre à chaque chanteur. Cette variable aléatoire va modéliser la corrélation des données d'un même individu. Sa variance mesurera la variabilité inter-individuelle. Plus précisément, on considère deux modèles à effets aléatoires différents. Le premier où on introduit deux

effets aléatoires, l'un sur l'intercept du modèle, l'autre sur le facteur Qualité. Ce modèle permet de supposer que le niveau de base du descripteur qu'on cherche à expliquer peut varier entre les individus. Ensuite, on s'intéresse à un modèle plus simple où la variabilité inter-individuelle n'influence que le niveau de base (un seul effet aléatoire sur l'intercept). Dans la suite, on testera d'abord ces deux modèles pour choisir le modèle d'effets aléatoires, puis on appliquera les tests de contraste.

- modèle avec des effets aléatoires sur le facteur Qualité et l'intercept

$$Y_{ijkl s} = \mu + a_l + a_{li} + \beta_i + \beta_j + \beta_k + \gamma_{ij} + \gamma_{jk} + \gamma_{ik} + \gamma_{ijk} + \epsilon_{ijkl s} \quad (1)$$

où $Y_{ijkl s}$ représente la valeur d'un descripteur pour l'individu l ayant chanté la qualité i , la note j , la voyelle k et la s^{eme} occurrence. Les coefficients β et γ sont des paramètres inconnus que l'on cherche à estimer. Les coefficients β modélisent les effets simples des facteurs tandis que les coefficients γ estiment les effets d'interactions possibles entre les facteurs (effets doubles ou triples). Le paramètre ϵ correspond à l'erreur induite dans le modèle, on suppose que $\epsilon_{ijkl s} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ et sont indépendants et identiquement distribués (i.i.d). Les coefficients a sont des paramètres inconnus mais aléatoires contrairement aux β et γ . Le premier, a_l représente l'aléatoire sur les individus (autrement dit sur l'intercept), et a_{li} l'aléatoire sur l'effet Qualité selon l'individu l . On suppose que les paramètres $a_{li} \sim \mathcal{N}(0, \omega_Q^2)$ et $a_l \sim \mathcal{N}(0, \omega_I^2)$.

- modèle avec l'effet aléatoire sur l'intercept

$$Y_{ijkl s} = \mu + a_l + \beta_i + \beta_j + \beta_k + \gamma_{ij} + \gamma_{jk} + \gamma_{ik} + \gamma_{ijk} + \epsilon_{ijkl s} \quad (2)$$

où on retrouve l'explication du descripteur Y pour l'individu l ayant chanté la qualité i , la note j , la voyelle k et l'occurrence s . Ici on ne retrouve que le paramètre aléatoire a_l mais avec la même hypothèse de normalité.

La formulation de nos hypothèses de test est la suivante :

1. Pour tester la présence d'un effet aléatoire sur le facteur Qualité, on testera

$$H_0 : \omega_Q^2 = 0 \text{ contre } H_1 : \omega_Q^2 \neq 0 \quad (3)$$

où a_{li} est le coefficient aléatoire lié à la variable Qualité pour l'individu l .

2. Pour tester une différence entre le groupe "Belt" et le groupe "Legit", on utilisera un test de contraste testant

$$H_0 : \beta_L - 0.5\beta_{CB} - 0.5\beta_{TB} = 0$$

contre

$$H_1 : \beta_L - 0.5\beta_{CB} - 0.5\beta_{TB} \neq 0 \quad (4)$$

Pour tester une différence entre "Chesty Belt" et "Twangy Belt", on utilisera un test de contraste testant

$$H_0 : \beta_{CB} - \beta_{TB} = 0 \text{ contre } H_1 : \beta_{CB} - \beta_{TB} \neq 0 \quad (5)$$

3.2.1.b ANOVA individu par individu

Nous présentons ici le modèle ANOVA individu par individu. Pour un chanteur donné on a

$$Y_{ijks} = \mu + \beta_i + \beta_j + \beta_k + \gamma_{ij} + \gamma_{jk} + \gamma_{ik} + \gamma_{ijk} + \epsilon_{ijks} \quad (6)$$

où Y correspond toujours à un descripteur et les indices i , j et k sont respectivement les indices pour les facteurs Qualité, Note et Voyelle. Les coefficients β et γ représentant les effets simples et d'interactions (double ou triple) et ϵ étant la partie aléatoire du modèle. Il suit $\mathcal{N}(0, \sigma^2)$.

Les modèles à effets aléatoires vont nous servir à expliquer la part de variabilité inter-individuelle en regardant si on observe un effet de groupe. Si on n'observe pas d'effet de groupe alors on fait un modèle ANOVA individu par individu, qui nous servira à expliquer cette variabilité mais individuellement.

3.2.2 Résultats

3.2.2.a ANOVA à effets aléatoires :

Si les résultats montrent un effet significatif de l'aléa sur le facteur Qualité, nous allons retenir le modèle avec l'effet aléatoire sur l'intercept et la Qualité pour la suite de l'étude et notamment pour faire les tests de contrastes. Sinon, nous gardons le modèle avec l'effet aléatoire sur l'intercept. C'est sur le modèle final retenu que nous appliquerons les tests de contrastes. La Table 3 présente les résultats du modèle à effets aléatoire avec les résultats des tests de contrastes.

Lorsqu'on teste l'effet aléatoire sur la qualité dans le modèle global (avec les triples interactions), il ressort que cet effet est significatif quelque soit la variable expliquée. Les résultats des tests de contrastes sont différents suivant les descripteurs. Pour les descripteurs R3 et OQ, il n'est ni possible de séparer la qualité "Legit" de la qualité "Belt", ni séparer la qualité "Chesty Belt" de "Twangy Belt". Pour R1 et Qcs on peut séparer "Legit" de "Belt" mais on peut séparer "Twangy Belt" de "Chesty Belt". Pour SPL et EGG, on peut bien séparer "Legit" de "Belt" et "Twangy Belt" de "Chesty Belt".

La Figure 3 représente les graphes d'interactions du descripteur R1 sur les trois facteurs Qualité, Note et Voyelle. On a vu que le test de contraste entre "Legit" et "Belt" est non significatif. On remarque qu'il y a une interaction entre Note et Qualité comme le confirme le modèle obtenu (Table 7 en Annexes).

Analyse de la variance à effets aléatoires sans le chanteur B2

Dans cette partie nous effectuons une analyse de variance en enlevant le chanteur B2 de la base de données. Le principe est identique que précédemment, mais nous voulons voir si il y a une influence de ce chanteur dans les résultats. Nous avons vu dans la partie exploratoire des données (section 2) un groupe marginal constitué uniquement

	Effet aléatoire sur Quality		Contrastes	
			<i>Legit vs Belt</i>	<i>Chesty vs Twangy</i>
R1	avec Quality aléa	< .0001	0.068	0.043
	sans Quality aléa		(-42.49 Hz)	(-59.13 Hz)
R2	avec Quality aléa	$8e - 04$	0.0011	0.00021
	sans Quality aléa		(-127.06 Hz)	(-153.13Hz)
R3	avec Quality aléa	NA	0.049	0.87
	sans Quality aléa		(36.04 Hz)	(-3.55 Hz)
SPL	avec Quality aléa	< .0001	0.12	$1.03e - 05$
	sans Quality aléa		(-4.00 dB)	(4.80 dB)
Alpha	avec Quality aléa	< .0001	0.0023	0.0039
	sans Quality aléa		(-5.73 dB)	(-2.82 dB)
EGG_amp	avec Quality aléa	< .0001	0.048	0.0066
	sans Quality aléa		(-0.04)	(0.04)
OQ	avec Quality aléa	< .0001	0.064	0.55
	sans Quality aléa		(0.02)	(-0.00)
Qcs	avec Quality aléa	< .0001	0.065	0.00033
	sans Quality aléa		(-1.03)	(1.19)

TABLE 3 – Tableau résumé des résultats des tests de contraste obtenus sur le modèle ANOVA à effets aléatoires pour chaque descripteur normalisé avec le chanteur B2 (Dans les contrastes, on affiche la p.valeur et entre parenthèse la valeur de l’estimation)

du chanteur B2. Ce chanteur peut donc influencer l’analyse. La Table 4 présente ces résultats :

Sans le chanteur B2, on ne peut distinguer “Legit” de “Belt” pour les descripteurs R3, SPL, EGG_amp et OQ. Pour le test de contraste entre “Chesty Belt” et “Twangy Belt”, on remarque que les valeurs des descripteurs R3, EGG_amp et OQ ne sont pas significatives. Contrairement à la première étude tenant compte du chanteur B2, on retrouve les descripteurs R3 et OQ qui ne peuvent distinguer “Legit” de “Belt” et “Twangy Belt” de “Chesty Belt”. Pour le descripteur EGG_amp avec les données contenant tous les chanteurs, on pouvait distinguer les deux groupes, mais sans les données de B2 cela n’est plus possible.

3.2.2.b ANOVA individu par individu

Maintenant nous n’allons pas tenir compte de la variabilité entre les chanteurs, l’ANOVA sera réalisée sur les descripteurs et par chanteurs. Comme dans le paragraphe précédent nous effectuerons les tests de contrastes sur le modèle retenu (Table 11) avec les mêmes objectifs qui sont de tester une différence entre la Qualité “Belt” et “Legit” d’un côté

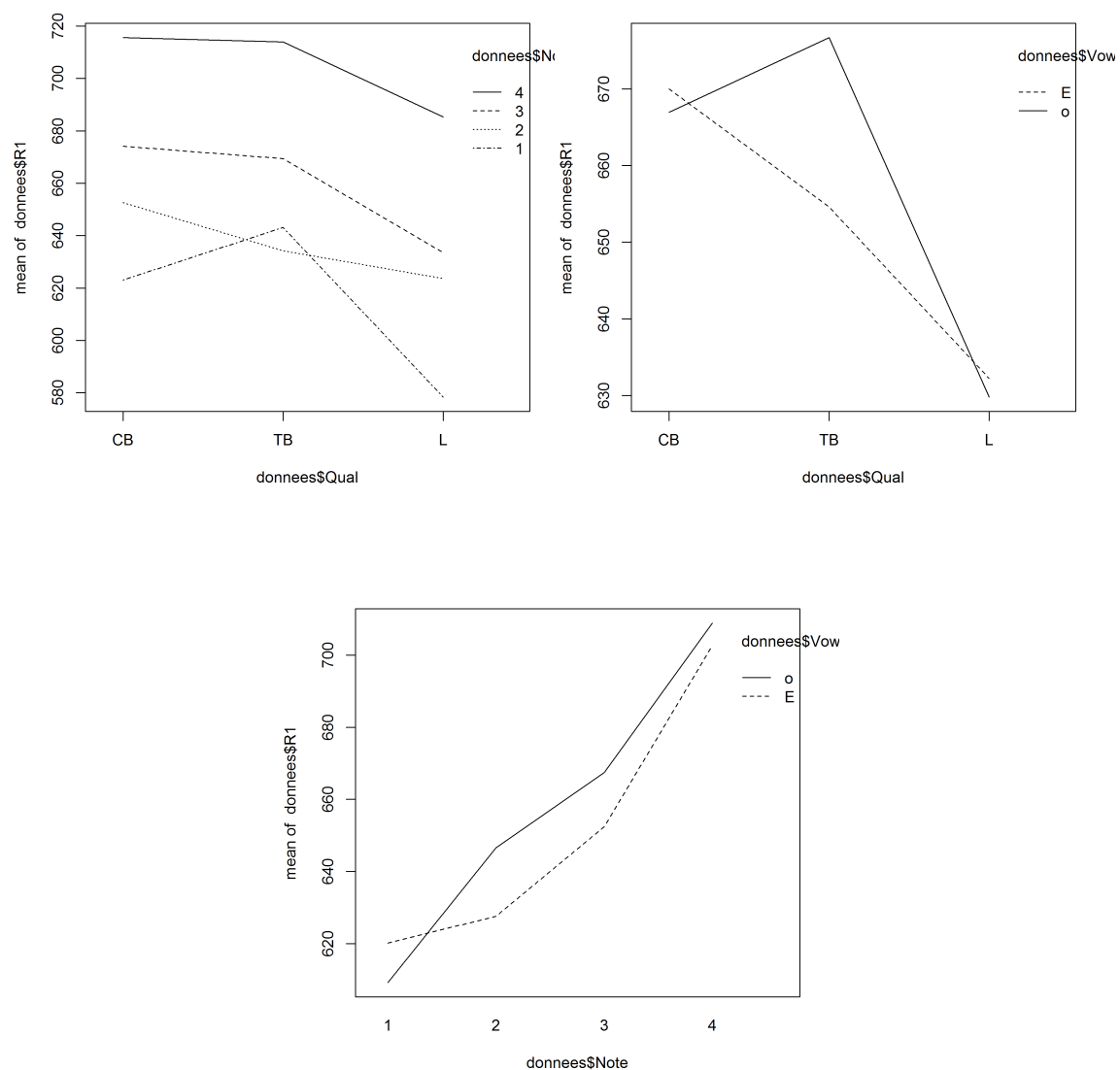


FIGURE 3 – Variation du descripteur R1 en fonction d’un facteur pour différentes valeur d’un deuxième facteur (En haut à gauche en fonction de Qualité pour les valeurs de Note, en haut à droite en fonction de Qualité pour les valeurs de Voyelle, en bas en fonction de Note pour les valeurs de Voyelle)

et d’un autre entre “Chesty Belt” et “Twangy Belt”. Nous ne testons que les contrastes pour les descripteurs ayant eu des p.valeurs non significatives dans les tests de contrastes pour le modèle ANOVA à effets aléatoires. Cela concerne donc les descripteurs R1, R3, OQ et Qcs.

	Effet aléatoire sur Quality		Contrastes	
			<i>Legit vs Belt</i>	<i>Chesty vs Twangy</i>
R1	avec Quality aléa	<0.0001	0.089	0.0044
	sans Quality aléa		(-32.18 Hz)	(-69.66 Hz)
R2	avec Quality aléa	NA	0.00018	0.024
	sans Quality aléa		(-128.35 Hz)	(-86.47 Hz)
R3	avec Quality aléa	NA	NA	NA
	sans Quality aléa		NA	NA
SPL	avec Quality aléa	<.0001	0.39	3.7e-7
	sans Quality aléa		(-1.02 dB)	(4.65 dB)
Alpha	avec Quality aléa	<.0001	0.00085	0.01
	sans Quality aléa		(-3.33 dB)	(-2.25 dB)
EGG_amp	avec Quality aléa	<.0001	0.5	0.19
	sans Quality aléa		(-0.01)	(0.02)
OQ	avec Quality aléa	<.0001	0.43	0.83
	sans Quality aléa		(0.01)	(-0.00)
Qcs	avec Quality aléa	NA	1.8e-9	8.5e-13
	sans Quality aléa		(-1.09)	(1.54)

TABLE 4 – Tableau résumé des résultats des tests de contraste obtenus sur le modèle ANOVA à effets aléatoires pour chaque descripteur normalisé sans le chanteur B2

La Table 8 (Annexes) nous indique que pour le chanteur B11 sur le descripteur R1, on ne peut distinguer la qualité “Legit” de “Belt”, ni “Twangy Belt” de “Chesty Belt”. Lorsque l’on prend l’ensemble des descripteurs individuellement par chanteur, il est beaucoup plus difficile de distinguer “Twangy Belt” de “Chesty Belt”, sauf par exemple pour le chanteur B5 pour le descripteur OQ ou B3 pour R1. Par contre, il est plus facile de distinguer “Legit” de “Belt”, par exemple pour le chanteur B6 quelque soit le descripteur.

La Figure 4 représente les graphiques d’interactions du descripteur R1 selon B2.

4 Construction de profils pour chaque qualité

Dans cette partie du projet, nous allons nous intéresser aux descripteurs qui permettent de caractériser une qualité donnée. Il s’agit ici de décrire un facteur qualitatif (le facteur Qualité) en fonction de variables quantitatives (les descripteurs). Nous utiliserons donc le cadre classique de la régression logistique. L’objectif est de définir un profil pour une qualité en fonction des différents descripteurs. La première étape consiste à trouver le meilleur modèle. Avant de voir les descripteurs qui sont significatifs, il faut d’abord trouver le meilleur modèle. Pour trouver le meilleur modèle, nous allons procéder étape par étape en partant du modèle global avec tous les descripteurs et enlever en-

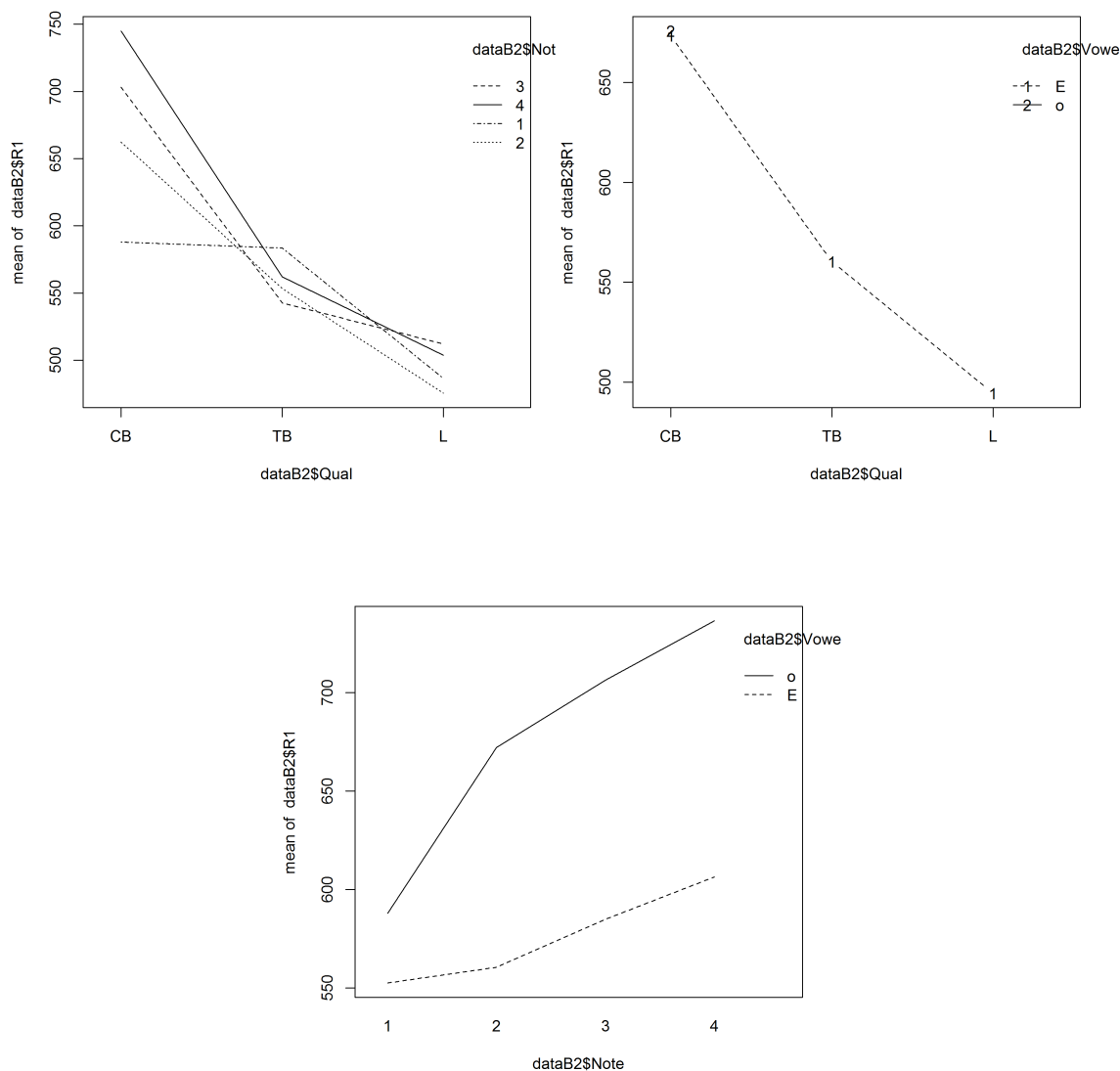


FIGURE 4 – Variation du descripteur R1 selon le chanteur B2 en fonction d'un facteur pour différentes valeur d'un deuxième facteur (En haut à gauche en fonction de Qualité pour les valeurs de Note, en haut à droite en fonction de Qualité pour les valeurs de Voyelle, en bas en fonction de Note pour les valeurs de Voyelle)

suite ceux qui ne sont pas significatifs en faisant le test de Fisher. Nous aboutissons à notre meilleur modèle. Les résultats fournis par le meilleur modèle que nous avons retenu précédemment vont nous permettre d'établir les profils. Les interprétations porteront sur la valeur des estimations, les intervalles de confiance et les odds ratio. L'odds

ratio est une mesure qui permet de voir le lien entre les deux modalités de la variable expliquée suivant la variable explicative. Dans notre cas, les variables explicatives sont les descripteurs et les modalités de la variable expliquée sont les différentes qualités. La régression logistique que nous allons appliquer prend en compte une variable expliquée avec deux modalités, ainsi dans le cadre de l'étude, nous serons amenés à regrouper "Chesty Belt" et "Twangy Belt" dans une même variable qu'on appellera "Belt". Nous nous intéresserons aussi aux deux types de qualités "Twangy Belt" et "Chesty Belt" dans la deuxième partie de l'étude.

4.1 Modèle logistique

Nous allons partir du modèle global avec tous les descripteurs et avec le facteur Qualité regroupé en deux classes ("Belt" et "Legit"). Nous allons aboutir au meilleur modèle en suivant la méthodologie énoncée plus haut (Table 12). Nous gardons comme classe de référence la classe "Belt", elle est choisie par défaut par le logiciel R. Dans une régression logistique avec une variable expliquée binaire, la modalité de référence est celle sur laquelle on se base pour interpréter les résultats en fonction de la deuxième modalité. Le modèle mathématique de la régression logistique s'écrit ainsi

$$\text{logit } p(\text{Quality}|M_i, N, V) = \beta_0 + \sum_{i=1}^8 M_i + N + V \quad (7)$$

où les M_i sont les descripteurs, β_0 l'intercept et N et V sont les facteurs Note et Voyelle avec lesquels on fera l'ajustement. On utilise la transformation logistique

$$\text{logit } p(\text{Quality}|M_i, N, V) = \ln \left(\frac{p(\text{Quality} = \text{"Legit"}|M_i, N, V)}{1 - p(\text{Quality} = \text{"Legit"}|M_i, N, V)} \right) \quad (8)$$

dans le cas où l'on cherche à distinguer "Legit" de "Belt".

Dans le cas où l'on teste "Chesty Belt" versus "Twangy Belt", on utilise

$$\text{logit } p(\text{Quality}|M_i, N, V) = \ln \left(\frac{p(\text{Quality} = \text{"Twangy Belt"}|M_i, N, V)}{1 - p(\text{Quality} = \text{"Twangy Belt"}|M_i, N, V)} \right) \quad (9)$$

avec "Chesty Belt" comme classe de référence.

4.2 Résultats

4.2.1 Comparaison des deux qualités "Legit" et "Belt"

Nous remarquons que seules les descripteurs du signal glottique (EGG, OQ) ont une valeur d'odds ratio supérieure à 1. Par rapport à ce modèle, on peut dire que lorsqu'on augmente d'une valeur de EGG et OQ, la possibilité d'être une voyelle produite en qualité "Belt" plutôt que "Legit" est supérieure à 1. C'est le contraire pour les autres descripteurs.

Legit Vs Belt	Estimation	IC 95%	Pvaleur	odds ratio	IC odds ratio
Intercept	-1.81	[-5.33;1.70]	0.31	0.16	[0.004,5.47]
R2	-2.31	[-3.01;-1.61]	9.01e-11	0.09	[0.049,0.19]
R3	-0.59	[-1.06;-0.12]	0.01	0.55	[0.34,0.88]
SPL	-2.1	[-2.79;1.41]	2.03e-09	0.12	[0.06,4.09]
Alpha	-1.74	[-2.21;-1.27]	2.94e-13	0.17	[0.010,2.08]
EKG	1.09	[0.50;1.68]	0.00	2.98	[1.64,5.36]
OQ	1.46	[0.80;2.12]	1.34e-05	4.31	[2.22,8.33]
Qcs	-1.3	[-1.87;-0.73]	7.17e-06	0.27	[0.15,0.48]

TABLE 5 – Régression logistique à effets aléatoire entre les deux modalités “Legit” et “Belt”, avec ajustement sur les facteurs Note et Voyelle

Nous évaluons la qualité de notre modèle en visualisant la Courbe ROC (Figure 5) de notre Modèle. Cette courbe est un indicateur de la qualité de prédiction de notre modèle. Ici l’aire sous la courbe est 92.68%

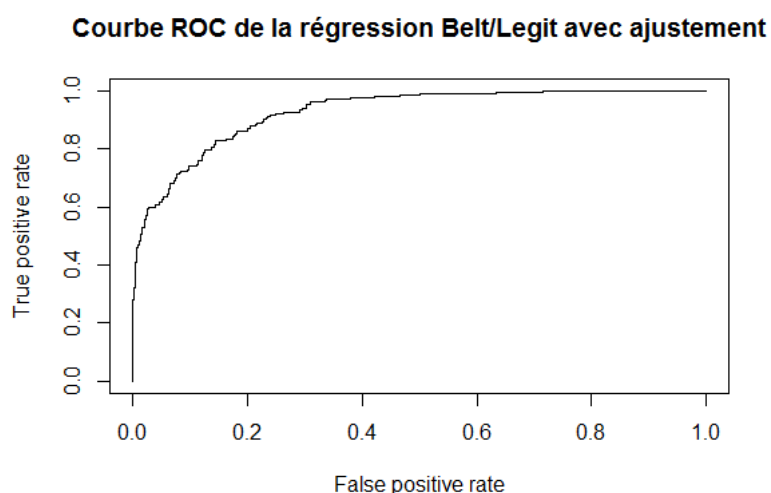


FIGURE 5 – Courbe ROC correspondant au modèle final de régression logistique à effets aléatoire de la qualité “Legit” versus la qualité “Belt”. L’aire sous la courbe vaut 92.68%.

4.2.2 Comparaison des deux qualités “Chesty Belt” et “Twangy Belt”

Cette partie prend en compte les deux qualités “Chesty Belt” et “Twangy Belt” et vise à de répondre au même objectif que dans le cas “Belt” versus “Legit”. D’après les résultats de la Table ??, ici seul le descripteur Alpha a un odd ratio supérieur à 1. Il est de 6.01 contre des valeurs très faibles pour les odds ratio des autres descripteurs.

En prenant une unité de ce descripteur, la possibilité que la qualité soit “Twangy Belt” augmente de 6.01 fois la possibilité d’être “Chesty Belt”. Les autres descripteurs retenus dans le modèle final ont une grande significativité mais leurs odds ratio sont très faibles. L’aire sous la courbe est de 96.18%

Twangy Vs Chesty	Estimation	IC 95%	Pvaleur	odds ratio	IC odds ratio
Intercept	-2.95	[-5.78 ; -0.29]	0.31	0.05	[3.08e-03 ; 0.74]
SPL	-5.80	[-7.37 ; -4.46]	9.01e-11	0.003	[6.29e-04 ; 0.0115]
Alpha	1.79	[1.11 ; 2.54]	0.01	6.01	[3.03 ; 12.67]
Qcs	-2.95	[-3.96 ; -2.07]	2.03e-09	0.05	[0.01 ; 0.12]

TABLE 6 – Régression logistique à effets aléatoire entre les deux modalités “Twangy Belt” et “Chesty Belt”, avec ajustement sur les facteurs Note et Voyelle

Bien que SPL et Alpha soient tous deux des descripteurs liés au signal audio, ils ont des odds ratio très différents lorsqu’on fait la régression logistique avec effet aléatoire sur l’intercept. La valeur de l’intercept est assez élevée pour Alpha (6.01) contre 0.003 pour SPL. En augmentant alors d’une unité la valeur de Alpha, la possibilité que ce soit “Twangy Belt” est de 6.01, alors qu’elle est de 0.003 pour SPL. En changeant de classe de référence, on a l’inverse des odds ratio et là les conclusions sont contraires, on a l’odds ratio de Alpha qui est très élevé et celui de SPL très faible. La possibilité d’être “Chesty Belt” en augmentant d’une unité SPL est plus important que celle de Alpha.

Courbe ROC de la régression Twangy/Chesty avec ajustement

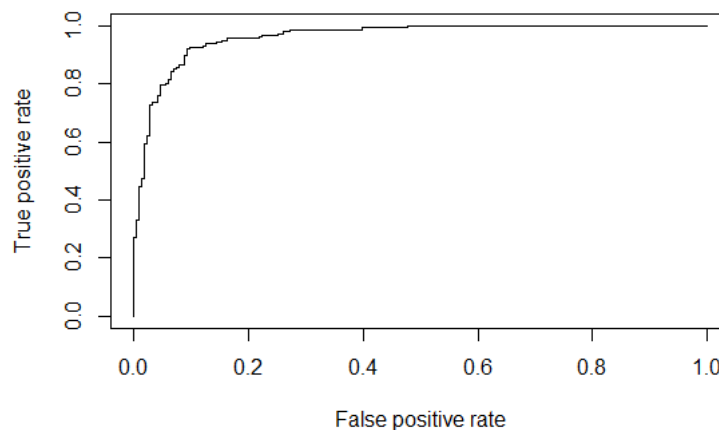


FIGURE 6 – Courbe ROC correspondant au modèle final de régression logistique à effets aléatoire de la qualité “Twangy Belt” versus la qualité “Chesty Belt”. L’aire sous la courbe vaut 96.18%.

5 Conclusion

Le premier objectif de ce projet est de différencier les trois qualités vocales “Legit”, “Chesty Belt” et “Twangy Belt”, utilisés dans les comédies musicales. Pour cela, nous avons dans un premier temps pensé à distinguer ces trois classes à l’aide de la classification supervisée. Cette méthode ne nous a pas permis de caractériser ces 3 qualités car elle ne prend pas en compte la variabilité inter-individuelle liée à l’aspect apparié des données.

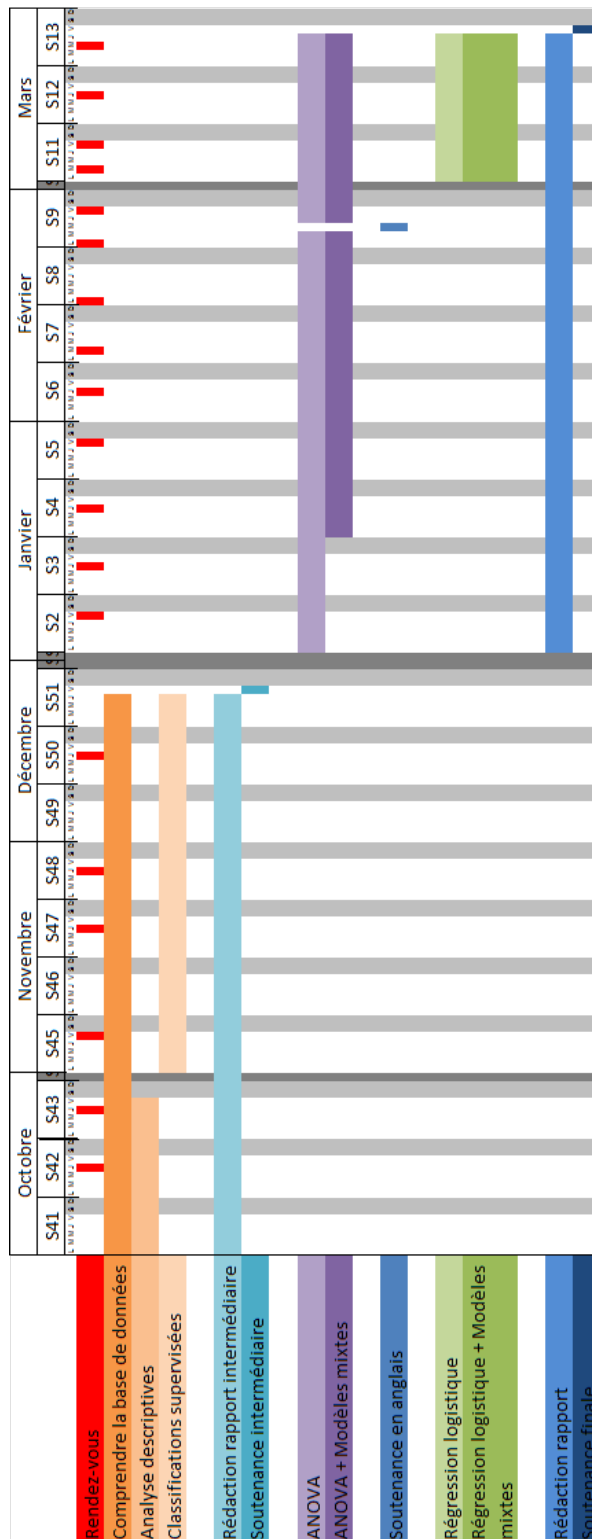
Nous nous sommes donc tournés vers l’ANOVA (analyse de la variance). En utilisant les deux approches, analyse globale (ANOVA à effets aléatoire) et l’analyse univariée (ANOVA individu par individu), nous avons pu caractériser ces qualités pour certains descripteurs. En effet, l’ANOVA a montré une tendance générale sur les 6 chanteurs à produire la qualité “Belt” avec des fréquences de R2 significativement plus élevées que pour la qualité “Legit” (-127.16 Hz, traduisant une position de la langue plus vers l’avant que pour la qualité “Belt”). La qualité “Belt” a une fréquence R3 plus faible (36.04 Hz) que la qualité “Legit”. Cela se distingue par un étirement des lèvres plus conséquent pour la qualité “Legit”. L’ANOVA a permis de voir aussi une amplitude du signal EGG_amp significativement plus importante pour la qualité “Belt” que pour “Legit”. Cela implique un contact accru entre les cordes vocales pendant leur vibration. L’analyse individuelle a montré que pour 3 chanteurs (B2, B5, B10), la qualité “Belt” était également produite avec des fréquences de R1 significativement plus élevées que pour la qualité “Legit” (traduisant une ouverture de mâchoire et des lèvres plus grande dans la qualité “Belt”). Les 3 autres chanteurs n’ont pas produit ces deux qualités avec des fréquences de R1 significativement différentes. De même, 4 chanteurs sur 6 (B2, B5, B6, B10) ont montré une différence significative d’effort vocal entre leur productions “Belt” et “Legit”, se traduisant non seulement par une intensité vocale significativement plus grande de la qualité “Belt”, mais s’accompagnant également de valeurs significativement plus faibles de OQ (traduisant un temps de contact entre les cordes vocales plus long).

L’ANOVA a également montré des différences significatives, pour les 6 chanteurs, entre les deux types de qualités “Belt” : “Twangy” et “Chesty”. R1 et R2 significativement plus élevés pour “Twangy Belt” que pour “Chesty Belt” (-59.13 Hz et -153.13 Hz, traduisant une articulation plus ouverte et antérieure de la qualité “Twangy Belt”). Les descripteurs SPL et Qcs sont significativement plus grands, et EGG_amp et Alpha sont significativement réduits pour “Chesty Belt” (respectivement 4.80 dB, 1.19, 0.04, -2.82 dB, traduisant un effort vocal plus important pour la qualité “Chesty Belt”) Au niveau individuel, seuls 2 chanteurs (B5 et B6) ont montré une différence significative de OQ entre ces deux qualités (respectivement 0.02 et 0.03). Deux chanteurs (B5 et B11) ont également montré une différence significative de fréquence de R3 entre ces deux qualités, mais avec des tendances contraires (202.42 Hz contre -951.6 Hz).

Le second objectif fut de déterminer un profil caractérisant ces qualités vocales. La régression logistique a permis d’avoir une vision plus globale et multivariée sur la distinction de ces qualités. Globalement, “Legit” se distingue principalement de “Belt” par

l'augmentation de l'amplitude du signal EGG et du quotient ouvert (OQ). De même, la qualité "Twangy Belt" se distingue principalement de "Chesty Belt" par une augmentation du coefficient Alpha.

6 Diagramme de Gantt



Annexes

Liste des tableaux

1	Indicateurs statistiques des 8 descripteurs	6
2	Tableau des pourcentages de présence de chaque qualité dans les classes obtenues par classification sur le descripteur OQ, sur l'ensemble des chanteurs	8
3	Tableau résumé des résultats des tests de contraste obtenus sur le modèle ANOVA à effets aléatoires pour chaque descripteur normalisé avec le chanteur B2 (Dans les contrastes, on affiche la p.valeur et entre parenthèse la valeur de l'estimation)	12
4	Tableau résumé des résultats des tests de contraste obtenus sur le modèle ANOVA à effets aléatoires pour chaque descripteur normalisé sans le chanteur B2	14
5	Régression logistique à effets aléatoire entre les deux modalités "Legit" et "Belt", avec ajustement sur les facteurs Note et Voyelle	17
6	Régression logistique à effets aléatoire entre les deux modalités "Twangy Belt" et "Chesty Belt", avec ajustement sur les facteurs Note et Voyelle	18
7	Modèles ANOVA à effets aléatoire (Q = Qualité, N = Note, V = Voyelle, * = effets de d'interaction, + = effet simple)	25
8	Tableau résumé des résultats du modèle individu par individu sur les descripteurs normalisés	26
9	Tableau résumé des résultats du modèle individu par individu sur les descripteurs normalisés	27
10	Tableau résumé des résultats du modèle individu par individu sur les descripteurs normalisés	28
11	Modèles ANOVA à effets aléatoire (Q = Qualité, N = Note, V = Voyelle, * = effets de d'interaction, + = effet simple)	29
12	Modèles optimaux pour la régression logistique	36

Table des figures

1	Représentation des données selon les axes principaux de l'ACP réalisée sur l'ensemble des descripteurs, à gauche en distinguant les 3 qualités "Legit" (L), "Chesty Belt" (CB) et "Twangy Belt" (TB) et à droite en distinguant les 6 chanteurs.	6
2	Représentation des voyelles /o/ et /ε/ selon les axes principaux de l'ACP réalisée sur les descripteurs articulatoires (R1, R2, R3)	7
3	Variation du descripteur R1 en fonction d'un facteur pour différentes valeur d'un deuxième facteur (En haut à gauche en fonction de Qualité pour les valeurs de Note, en haut à droite en fonction de Qualité pour les valeurs de Voyelle, en bas en fonction de Note pour les valeurs de Voyelle)	13
4	Variation du descripteur R1 selon le chanteur B2 en fonction d'un facteur pour différentes valeur d'un deuxième facteur (En haut à gauche en fonction de Qualité pour les valeurs de Note, en haut à droite en fonction de Qualité pour les valeurs de Voyelle, en bas en fonction de Note pour les valeurs de Voyelle)	15
5	Courbe ROC correspondant au modèle final de régression logistique à effets aléatoire de la qualité "Legit" versus la qualité "Belt". L'aire sous la courbe vaut 92.68%.	17
6	Courbe ROC correspondant au modèle final de régression logistique à effets aléatoire de la qualité "Twangy Belt" versus la qualité "Chesty Belt". L'aire sous la courbe vaut 96.18%.	18

1 ANOVA à effets aléatoires

Descripteurs	Modèles avec B2	Modèles sans B2
R1	Q^*N^*V	Q^*N^*V
R2	Q^*N^*V	Q^*N^*V
R3	$Q^*N + N^*V$	N^*V
SPL	Q^*N^*V	Q^*N^*V
Alpha	Q^*N^*V	Q^*N^*V
EGG_amp	Q^*N^*V	Q^*N^*V
OQ	Q^*N^*V	Q^*N^*V
Qcs	Q^*N^*V	Q^*N

TABLE 7: Modèles ANOVA à effets aléatoire
(Q = Qualité, N = Note, V = Voyelle, * = effets de d'interaction, + = effet simple)

2 ANOVA individus par individus

Mesure	Chanteur	Contrastes	
		<i>Legit vs Belt</i>	<i>Twangy vs Chesty</i>
R1	B10	0.043 (-30.28 Hz)	0.0015 (53.96 Hz)
	B11	0.079 (18.01 Hz)	0.11 (20.25 Hz)
	B2	1.3e-5 (-99.25 Hz)	0.84 (-4.5 Hz)
	B3	0.51 (-9.9 Hz)	0.037 (36.6 Hz)
	B5	0.025 (-58.8 Hz)	0.12 (44.4 Hz)
	B6	0.15 (37.4 Hz)	0.11 (49.6 Hz)
R2	B10	1.4e-21 (-257.87 Hz)	0.00017 (89.34 Hz)
	B11	0.79 (-10 Hz)	0.0064 (-256 Hz)
	B2	2.06e-6 (-152.7 Hz)	2.2e-17 (391.8 Hz)
	B3	0.001 (-103.50 Hz)	0.00012 (141.8 Hz)
	B5	0.72 (11.84 Hz)	1.6e-8 (221.91 Hz)
	B6	8.4e-15 (-193.72 Hz)	0.38 (-22.78 Hz)
R3	B10	0.0025 (-60.07 Hz)	0.19 (28.10 Hz)
	B11	2.1e-8 (334.20 Hz)	7.2e-11 (-951.60 Hz)
	B2	0.016 (66.31 Hz)	0.67 (12.22 Hz)
	B3	0.2 (57 Hz)	0.83 (-10.80 Hz)
	B5	0.95 (1.98 Hz)	2.4e-8 (202.42 Hz)
	B6	0.2 (-39.9 Hz)	0.31 (-36.6 Hz)

TABLE 8: Tableau résumé des résultats du modèle individuel par individu sur les descripteurs normalisés

Mesure	Chanteur	Contrastes	
		<i>Legit vs Belt</i>	<i>Twangy vs Chesty</i>
SPL	B10	5.4e-10 (-3.98 dB)	4.8e-13 (-5.39 dB)
	B11	0.78 (-0.28 dB)	0.97 (-0.08 dB)
	B2	4.9e-27 (-18.69 dB)	1.53e-5 (-5.54 dB)
	B3	0.055 (-1.73 dB)	2.88e-5 (-4.75 dB)
	B5	3.4e-5 (-3.17 dB)	1.5e-19 (-9.06 dB)
	B6	2.3e-5 (-2.27 dB)	0.071 (-1.06 dB)
Alpha	B10	1.8e-18 (-5.24 dB)	1.6e-13 (4.53 dB)
	B11	1.9e-5 (-3.72 dB)	7.7e-13 (16.32 dB)
	B2	5.4e-33 (-17.11 dB)	2.6e-9 (5.86 dB)
	B3	3.9e-6 (-3.61 dB)	0.0059 (2.38 dB)
	B5	0.11 (-1.09 dB)	0.64 (0.34 dB)
	B6	0.38 (-0.35 dB)	0.19 (0.64 dB)

TABLE 9: Tableau résumé des résultats du modèle individuel par individu sur les descripteurs normalisés

Mesure	Chanteur	Contrastes	
		<i>Legit vs Belt</i>	<i>Twangy vs Chesty</i>
EGG_amp	B10	0.014 (-0.01)	0.0037 (-0.02)
	B11	0.43 (0.01)	0.16 (0.04)
	B2	1.9e-32 (-0.17)	1.6e-21 (-0.12)
	B3	0.017 (-0.02)	0.75 (0.00)
	B5	4.7e-26 (-3.10)	1.6e-48 (-4.33)
	B6	1.8e-21 (0.06)	0.79 (0.00)
OQ	B10	0.03 (0.01)	0.48 (-0.00)
	B11	0.91 (-0.00)	0.63 (0.01)
	B2	3.08e-5 (0.11)	0.51 (0.01)
	B3	0.044 (0.01)	0.15 (0.01)
	B5	0.00046 (0.02)	2.9e-6 (0.03)
	B6	0.73 (0.00)	8.4e-5 (0.02)
Qcs	B10	0.0079 (0.57)	0.18 (-0.30)
	B11	0.045 (0.26)	0.0038 (-0.91)
	B2	1.03e-19 (-2.63)	0.078 (-0.41)
	B3	6.44e-10 (-1.82)	0.021 (-0.78)
	B5	2.4e-17 (-3.10)	2.2e-23 (-4.33)
	B6	7.3e-11 (1.26)	0.47 (0.13)

TABLE 10: Tableau résumé des résultats du modèle individu par individu sur les descripteurs normalisés

Descripteurs	B10	B11	B2	B3	B5	B6
R1	Q^*N+N^*V	$Q+N$	Q^*N	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V
R2	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N+N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N+N^*V
R3	$Q^*N+Q^*V+N^*V$	Q^*N^*V	Q^*N+V	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V
SPL	Q^*N+N^*V	Q^*N^*V	Q^*N+N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V
Alpha	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N+N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V	$Q^*N+Q^*V+N^*V$
EGG_amp	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N+N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V	$Q^*N+Q^*V+N^*V$
OQ	Q^*N+Q^*V	Q^*N^*V	Q^*N	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V
Qcs	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N+N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V	Q^*N^*V

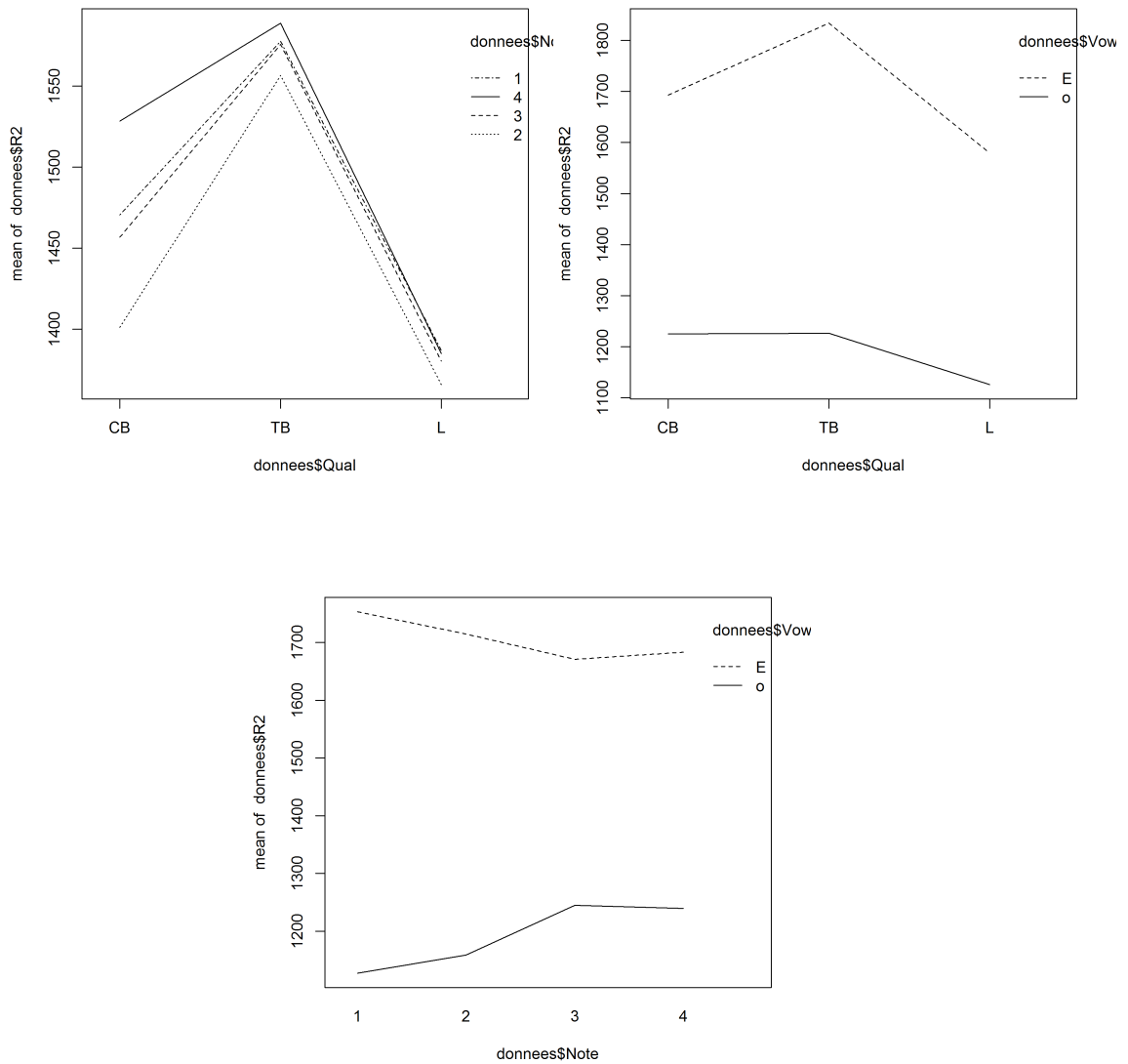
TABLE 11: Modèles ANOVA à effets aléatoire

(Q = Qualité, N = Note, V = Voyelle, * = effets de d'interaction, + = effet simple)

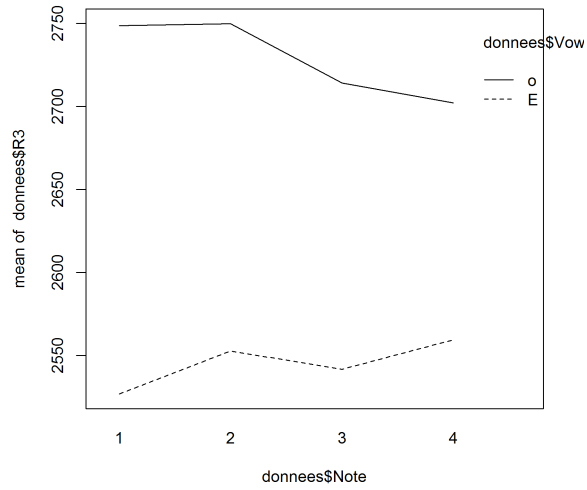
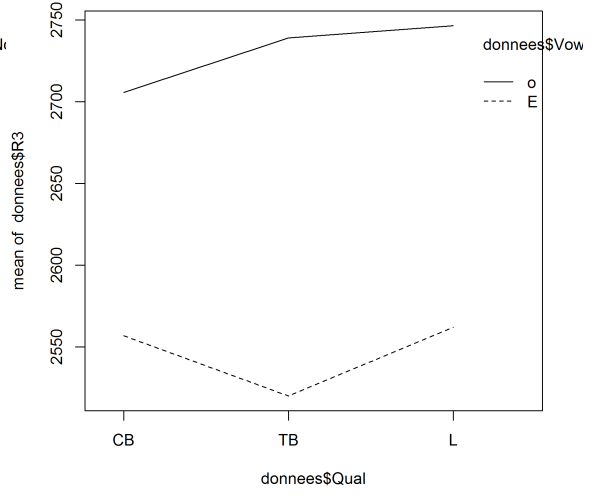
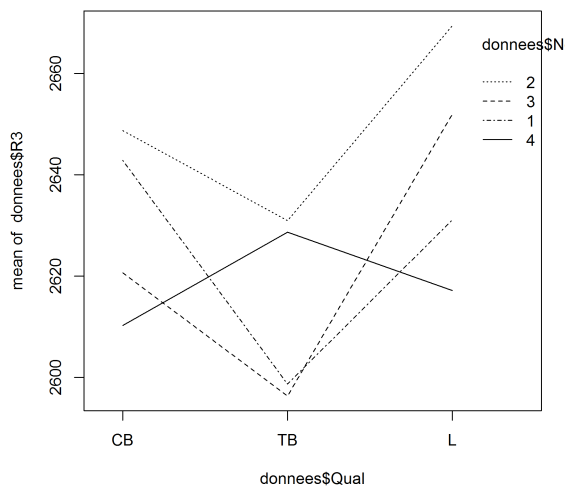
3 Graphiques des interactions

Légende pour les graphiques suivants : Variation du descripteur X en fonction d'un facteur pour différentes valeur d'un deuxième facteur (En haut à gauche en fonction de Qualité pour les valeurs de Note, en haut à droite en fonction de Qualité pour les valeurs de Voyelle, en bas en fonction de Note pour les valeurs de Voyelle).

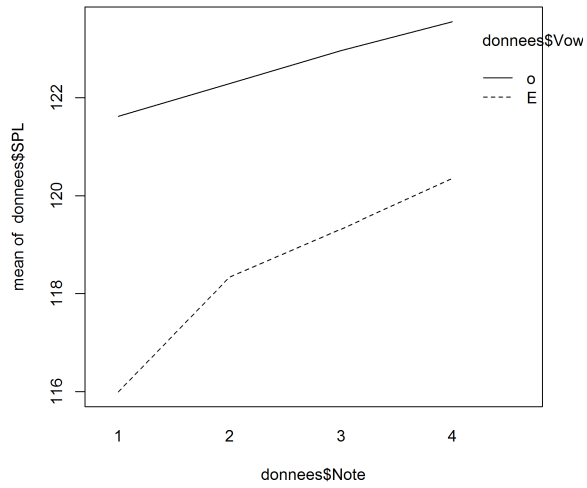
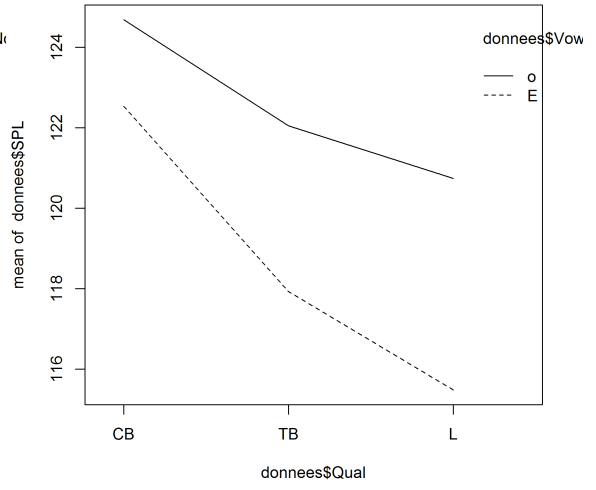
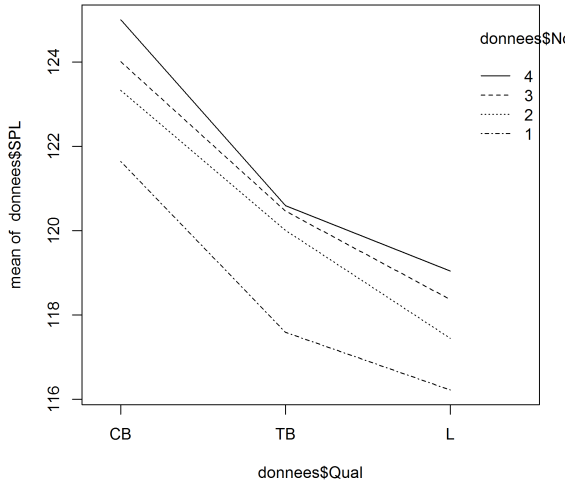
R2



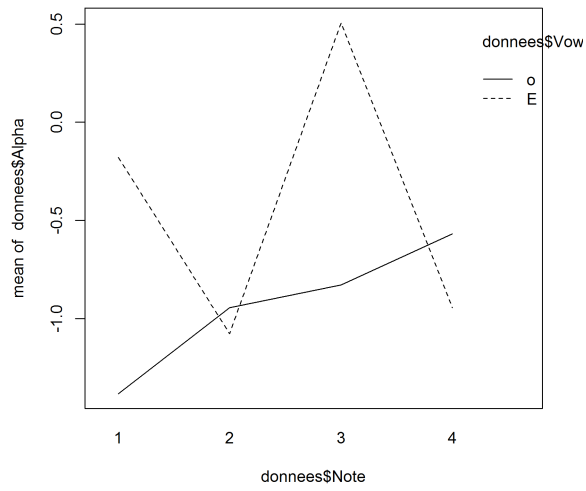
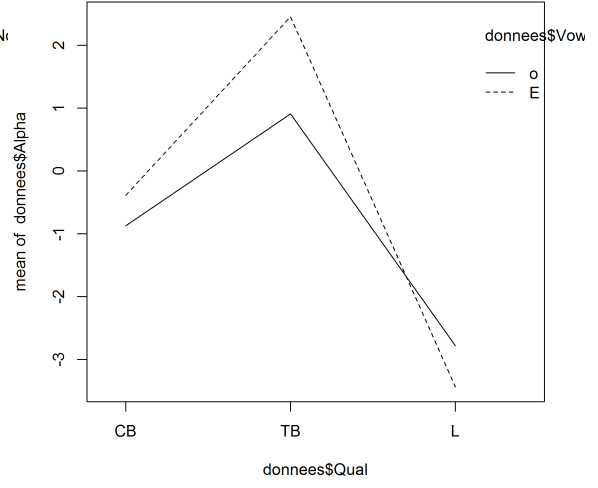
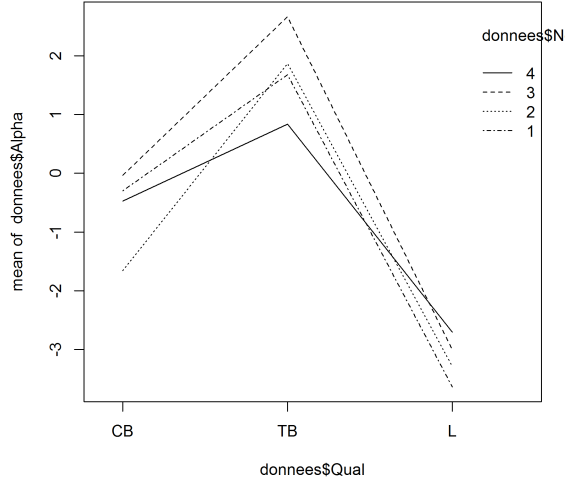
R3



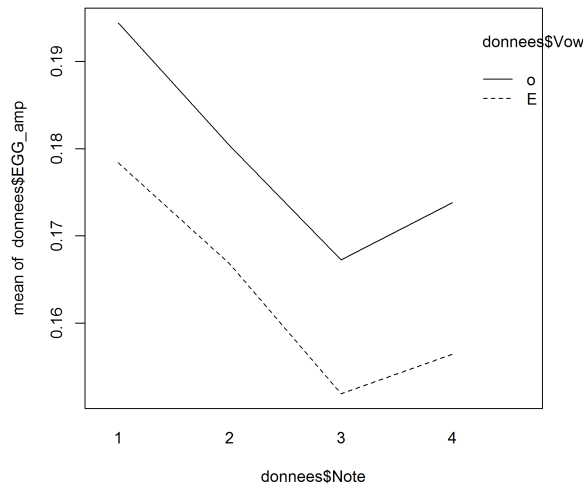
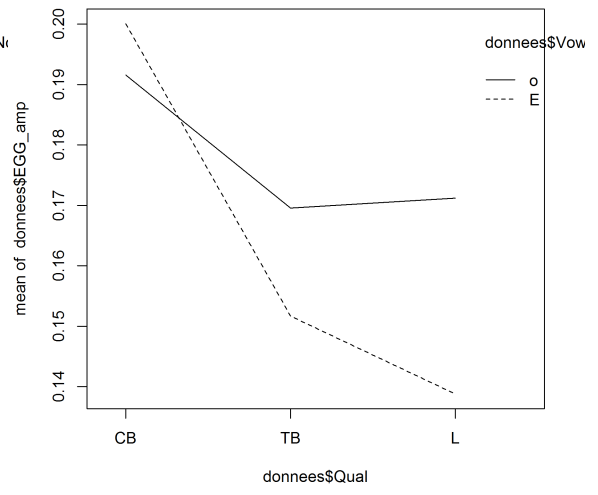
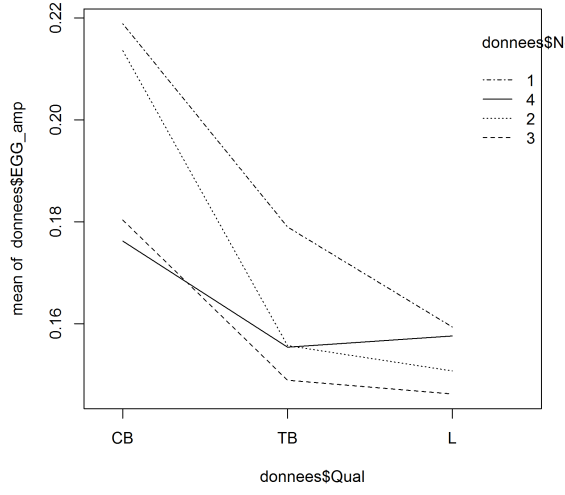
SPL



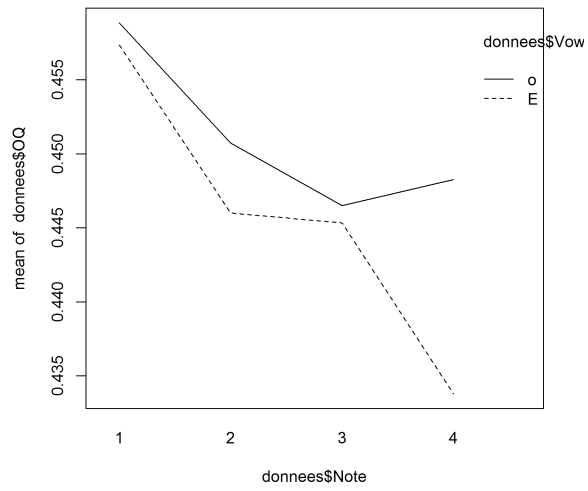
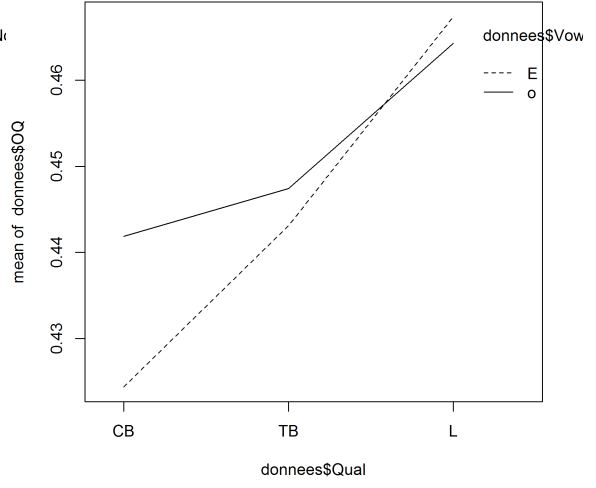
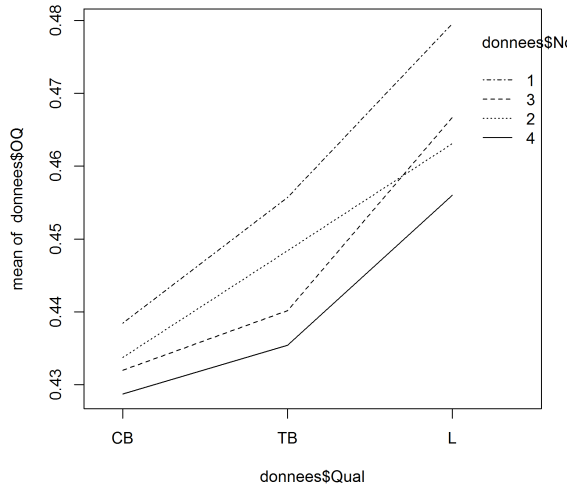
Alpha



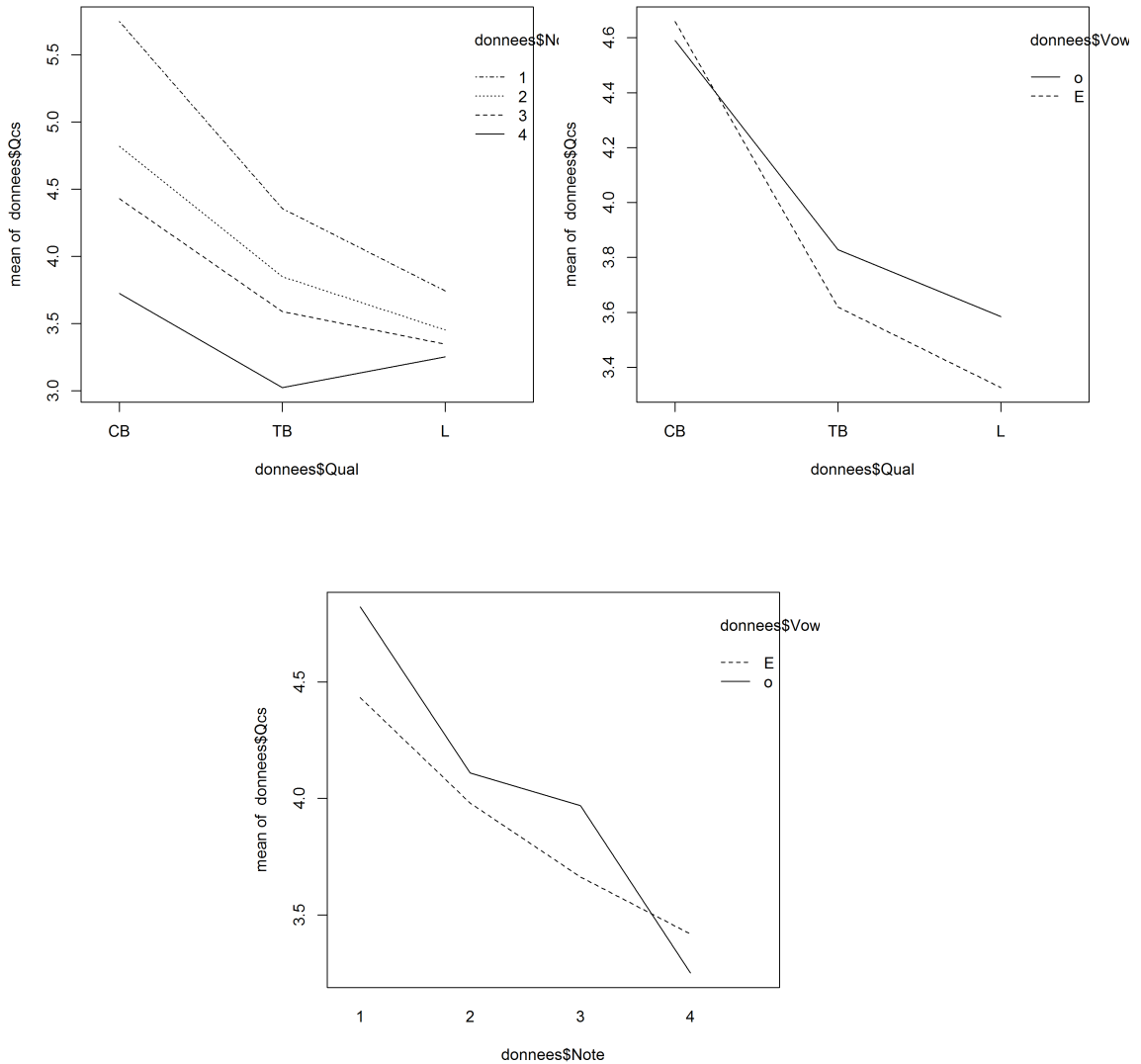
EGG_amp



OQ



Qcs



4 Régression logistique

Estimation	Modèle optimal
Belt / Legit	Note * Vowel + R2 + R3 + SPL + Alpha + EGG_amp + OQ + Qcs + (1 Singer)
Twangy Belt / Chesty Belt	Note * Vowel + SPL + Alpha + Qcs + (1 Singer)

TABLE 12 – Modèles optimaux pour la régression logistique