

3
713242
No. 16
(4)

1. Avril. 1942.

BULLETIN

DE

LA FACULTÉ DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITÉ FRANCO-CHINOISE DE PEIPING

ETUDE COMPARATIVE DE L'EFFET BARKHAUSEN
CIRCULAIRE DES FILS DE FER ET DE NICKEL.

PAR

MA CHE-SIAU et WANG CHOU-YING

PUBLIÉ PAR
L'UNIVERSITÉ FRANCO-CHINOISE DE PEIPING

鐵絲與鎳絲之圓形 Barkhausen

效應之比較研究

引 言

通交流電流於導線，導線附近所具之環形交流磁場，永位於與導線垂直之平面；故套導線以感應圈，在感應圈導線內，並無感應電流存在，但導線原質屬於鐵線等磁鐵性金屬時，則在感應圈導線內，恒顯然有感應電流產生。解釋此種事實，當承認除交流電流所產生之環形交流磁場外，尚有其他磁場，使透過感應圈之磁場強度發生變化。此種磁場，大致不外磁鐵性金屬體內，各具有磁性之極小部分，受環形交流磁場之影響，自行轉動所形成。

倘在磁場內，用電解方法，製備純鐵，則自純鐵得出之磁化循環圖線 cycle d'aimantation 極與長方形相接近。(1) 如將細鎳絲復熱後，先極力伸長，次輕繞於細圓柱，然後再張直納入於細玻璃管中；此種曾受機械力鎳絲之磁化循環圖線，亦極與長方形相類似。(2) R. Forrer 根據是種結果，推想在磁鐵性金屬體內，各極小部分所具磁矩，moment magnétique 當由互相垂直之二個或數個磁矩所組成。因是將飽和磁化 aimantation à saturation 及剩餘磁化 aimantation rémanente 加以比較，假定鎳之磁性，係自互相垂直之二磁矩，而鐵則係自互相垂直之三磁矩所組成。磁矩在晶網 réseau 內之分佈情形，有如 Fig. 1. 所示。

1. Ch. Maurain. L'éclairage électrique, t. 26, février, 1901.
2. R. Forrer. Journ. de Phys., 6^e série, t. 7, 1926, p. 109.

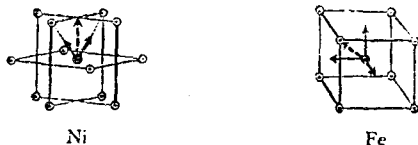


Fig. 1.

且在鐵之磁性場合，二磁矩可位於同一方向，隨其相加或抵銷，能形成兩種不對稱狀態。(4) 略如 Fig. 2. 所示。



Fig. 2.

爾後更加仔細研究，知此種不對稱狀態晶網，在鐵內確實存在；且當復熱溫度為 600°C ，或鐵內含有其他雜質時，不對稱狀態較易發生(4)

鐵線等金屬體內，各極小部分之磁性組成，若果如上述情形之不同，則各極小部分，受環形交流磁場之影響，自行轉動時，所形成感應電流之強度變化，當亦有顯然差異。欲發現此種差異，於是更有鐵絲與線絲之圓形 Barkhausen 效應之比較研究。

3. R. Forrer. Journ. de Phys., 6^e série, t. 10, 1929, p. 247

4. R. Forrer et J. Martak. Journ. de Phys., 7^e série, t. 3, 1932, p. 408.

I. 試驗之方法:

金屬絲之安置. 金屬絲之一端: 用夾持鎖頭方法, 由四小塊銅片固定於銅軸中央. 銅軸上附有一大齒輪及刻度圓盤. 大齒輪下部與另一小齒輪相銜接. 銜接處相當完密; 即在轉動小齒輪使圓盤旋轉 $\frac{1}{2}^{\circ}$ 時, 所生誤差亦永較 $\frac{1}{20}^{\circ}$ 為小. 另一端則鐸固於鉛質支架, 支架兩端, 上下均具滑軸, 使外加張力, 隨傾斜角度更改, 自動變換方向, 永與金屬絲相平行. 且在此情形, 摩擦力影響極小, 故計算金屬絲所受張力時, 若將支架重力一併加入, 則誤差可減至極微. 銅軸及支架係分別固定於長方形木板. 在木板一端, 另備有一三足木製支架, 支架可自由伸縮, 使金屬絲在地磁場內, 能取任何之位置.

整流器之選擇. 取十數個氧化銅整流器, 分別測其特性曲線, 加以比較. 就中發現二個整流器, 其特性曲線極相接近, 如 Fig. 3. 所示.

二整流器電阻與電壓間關係之特性曲線, 在電壓微小時, 均大致為一直線. 且加 90Ω 電阻於特性曲線較低之整流器導線內時, 兩特性曲線並能彼此重合. 因是採取之作爲試驗之用. 爲保持應用時特性曲線之不變起見: 置整流器於盛有乾燥劑之銅桶, 用錫嚴密錐封, 以防濕潮; 然後再沉銅桶於恒溫器水內. 恒溫器係一大型杜瓦 Dewar 瓶所改造, 備有香樹脂 toluene 調節器, 電熱器, 冰水管, 氣泡攪拌器等裝置, 以調節溫度: 使恒溫器內部, 在 $\frac{1}{15}^{\circ}\text{C}$ 之誤差下, 永維持 $17^{\circ}.3\text{C}$ 之恒溫.

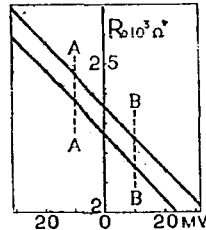
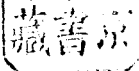


Fig. 3.

感應圈之構造. 由圓形 Barkhausen 效應所產生之感應電動力, 既隨試驗情形不同, 相差極巨; (5) 因之利用整流器整流時, 整流特性曲線之應用

南京大學理學院特刊, No. 14.



(南)

部分，亦當依試驗情形各異，彼此自有區分。故在此情形，欲根據一組曲線之形狀變化，推測某一因子之單獨影響，實際方面係不可能。若採用若干線圈，按試驗情形，時常更換，則除客觀條件不能一致外；更換線圈時，意外之誤差，亦極易發生。後乃決定按層數分成應圈為十六等份，各層圈數均等。並將極外與極內，次外與次內對應各份，兩兩聯接，組成八組。使各組電阻彼此相同。該線圈之特性數值，如下表所示。

長度	外徑	內徑	總圈數	總電阻	層數
55mm.	20mm.	4mm.	32000.	2350.	64.

成應電動力隨八組線圈之聯接方法：串聯，並聯，或混聯，各具不同之值。為表示便利計，姑假定此諸不同之值，實由若干線圈所產生。此種理想線圈，稱為相當線圈。在試驗時，可斟酌相當線圈圈數，使整流器兩端之電位差，永較 10mV. 為小；特性曲線之應用部分，常位於 AA 及 BB 兩磁線之間。（參看 Fig. 3.）

儀器之裝置。選定之二整流器，係按相反方向，平行聯接。如 Fig. 4

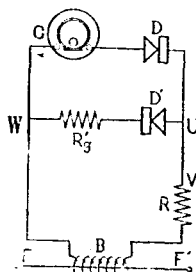


Fig. 4.

所示。在並聯之二導線內：其一具有一靈敏電流計 G，G 之靈敏度為 10^{-10} A，內電阻為 462Ω。另一則與電阻 R'g 相串聯。R'g 值恰與電流計內電阻及 90Ω 之和相等。其目的在免除整流作用之影響，使感應電流不致變形。R 乃一外加電阻，其值恒按線圈聯接方法更改，係用以矯正感應圈之電阻變化，使總電阻永維持一固定值。

成應電動力隨試驗情形，有時甚為強大。雖將上述八組線圈，盡行並聯，其變化仍非電流計 G 所能觀測。在此種場合'

恒於 WV 及 VU 之間，分別加一適當電阻，使相當線圈圈數再行減少，而總電阻值仍維持不變。

電源之調整：通過金屬絲之交流電流，係取自尋常燈用電源。電源經容量較大之變壓器降低電壓後，在次級兩極間，組成二並聯電路：一電路具自感線圈，有大量電流通過，所以維持交流電流形狀；另一則與其活動鐵心線圈及金屬絲相串聯。金屬絲內電流，按強度大小，採用各種靈敏度不同之交流電表加以測量；更利用返射鏡將電表指針影像返射於望遠鏡內，與電流計之標尺移距一同觀測。故在此情形，可隨時更動線圈內活動鐵心，使電流強度之相對誤差，永較 $\frac{1}{1000}$ 為小。

金屬絲之復熱。用交流電流在空氣中復熱，在手續方面雖較簡易，但在此情形，恒有：a. 復熱溫度難於確定，b. 溫度分配不易均勻，c. 氧化情形難於操縱，諸弊。因是更採用高電壓裝置內之耐火磁管，自製一內徑為 12mm. 長度為 440mm. 之小型電爐，直接加熱，並利用純化合物熔點，校正一 platine-nichrome 熱電偶，用熱電偶以規定復熱時溫度。

復熱金屬絲經伸直及洗滌後，下端鑿一 20g. 鉛錘，使之張直；然後懸於電爐磁管中央，並封閉磁管兩端，實行數次抽氣與灌氣。灌氣時：係先將空氣用還原銅除去氧氣，再經過 pyrogallol, K^+MnO_3 , KOH, 等溶液及乾燥劑，始行灌入。故若封閉完密，氧化作用決無由產生。起始復熱期間：恒一面增加溫度，一面減少壓力，為使金屬絲內部或表面所附着氣體易於放散。(6) 俟溫度升至 $900^{\circ}C$. 壓力減至 4—5mm. Hg. 時，維持溫度不變，歷五小時許，乃開始降低溫度，直至全部冷卻，再放入氣體，取出金屬絲；並於絲表面塗以膠棉，collodion 預防氧化。

6. 純鐵絲硬度與鋼絲相仿，其內部常含有大量輕氣。

按上述手續，曾復熱數根鐵絲及線絲，復熱結果：除硬度大減外，外表則與未復熱前完全相同。茲將此兩種金屬絲之大小及成分，列表如次：

	成分	長度	直徑	出產公司
鐵絲	純鐵。(分析化學用)	25 2mm.	0.57 mm.	德國 Merck 公司
線絲	純線。	25 2mm.	N°22 SWG.	大華公司轉購。

II. 試驗結果之比較

A. 三種曲線之比較

影響於圓形 Barkhausen 效應之因子，計有磁場、電流、扭力、張力，四種。(7) 磁場作用直接與磁化循環圖線相關聯，係 R. Forrer 假設所從出，故現在只就其他三種因子比較鐵絲與鎳絲，以驗其能否與磁性組成之理論相符合。

a. 電流圖線

沿地磁場方向，斜置金屬絲；絲外套以外徑為 7mm. 玻璃管，管內通有極清潔流水；為使金屬絲溫度，雖電流加強，仍與流水溫度相接近。玻璃管中腰，纏有一長度為 50mm. 之感應圈；感應圈分為三組，每組圈數為 500，隨感應電動力大小，可以串聯或並聯。試驗時，無論採用何種聯接方法，均需另加一適當電阻，使感應圈之總電阻恒為 2350μ ，俾客觀條件永久一致。在鐵絲採用並聯，鎳絲採用串聯，外加張力均為 10g 場合；所得結果如 Fig. 5. 所示。

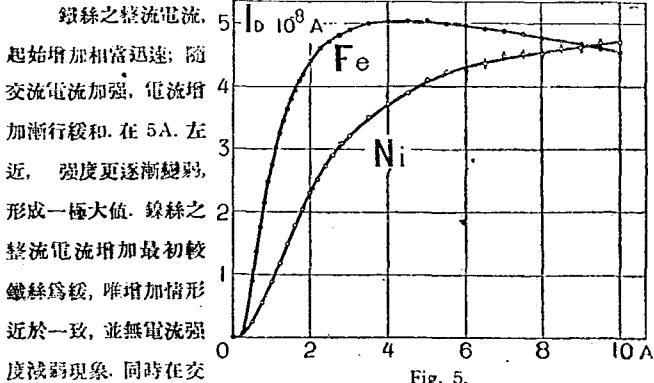


Fig. 5.

流電流較強時：整流電流在極小範圍內，忽大忽小極不穩定。此種現象在圖內係用雙方出頭之圓圈所表示。隨外加張力增強，整流電流漸趨穩定。在張力為 100g. 時，不穩定現象幾不能觀測。

b. 扭力圖線。

與地磁場垂直位置置金屬絲，並加以 100g. 張力；然後串聯八組線圈，通金屬絲以微小交流電流；為使扭力曲線形狀，不致因電流強度影響，發生變化。在鐵絲採用 60 MA. 鎳絲採用 120 MA. 之電流強度場合；所得結果如 Fig. 6. 所示。

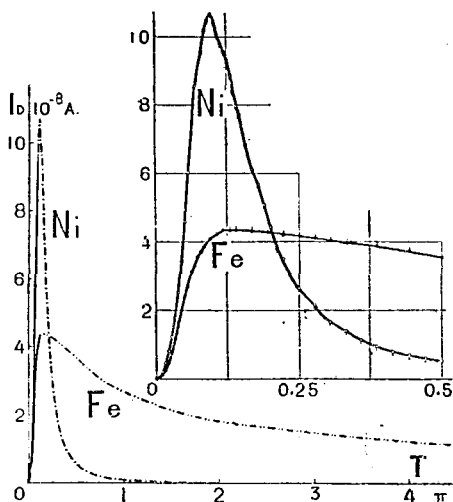


Fig. 6.

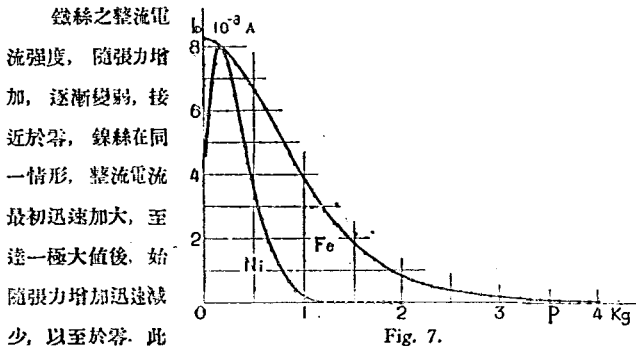
每次扭力增加後，整流電流不久即達於平衡狀態，維持一固定值。固定值隨扭力加強，迅速增加，如圖內實線所表示。至扭力達於一相當值後，再繼續加強扭力；則電流最初勢將達於平衡狀態，不久仍隨時間緩緩變化，變化方向與鐵絲與鎳絲相反，在圖內分別用

種斷線所表示。此外曲率 *courbure* 變化，在此情形極不規則，為顯明此種現象：更在圖內上方，作一放大圖形；同時用一方出頭之圓圈，以指示電流隨時間緩緩變化之方向。根據以上圖形，不難看出下列各項情況：

1. 整流電流隨時間緩緩變化之現象產生，鐵絲較鎳絲為遲；而整流電流之強度變弱，鐵絲亦較鎳絲為緩。
2. 整流電流隨時間緩緩變化現象：鐵絲係逐漸增強，鎳絲係逐漸變弱，變化方向完全相反。
3. 在整流電流隨時間緩緩變化之現象產生後，曲線曲率時生不連續變化，此種不連續變化，似由此組極小晶體與彼組極小晶體，因金屬絲拉力過度加大，突然沿一定滑面移動所形成。

C. 張力圖線。

斜置金屬絲與地磁場平行。然後串聯八組線圈，通金屬絲以強度為 600MA. 之交流電流。作張力曲線。鐵絲與鎳絲在是種場合所得結果，如 Fig. 7. 所示。



種極大值之產生，與通過金屬絲之電流強度有關，暫不敘述。至於張力之影響，則在線絲似較鐵絲更為顯明。

B. 電流強度之影響

隨交流電流之強度加大，環形交流磁場逐漸增強，各具有磁性之極小部分運動，亦因之愈形激烈。當運動由緩和變為激烈時：感應電流之變化情形，定因各極小部分之磁性組成不同，致生更改。今試比較由交流電流強度所生之影響，以顯示此種更改；俾磁性組成理論或可自是得以證明。

a. 電流強度對於扭力曲線之影響

1. 與地磁場垂直場合：位置金屬絲與地磁場垂直，加以 10g. 張力，然後依次通金屬絲以強度不同之交流電流，並按一定循環方向加以扭力，作相關之扭力曲線。在作扭力曲線時，恆依電流強弱規定相當線圈函數：使

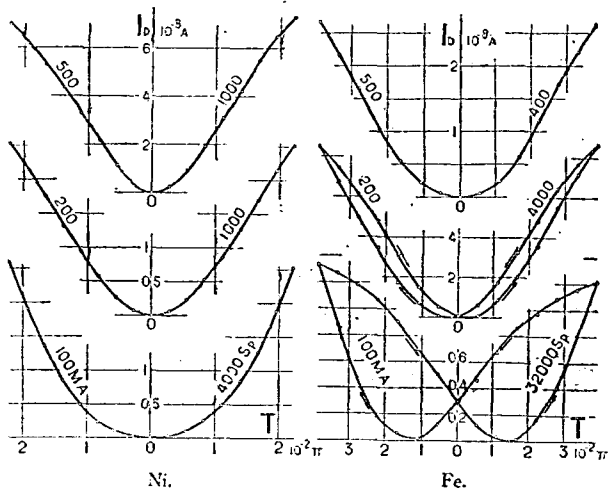


Fig. 8.

最大之感應電動力值，雖電流強度增大，仍較 10MV. 為小，如是將鐵絲與線絲用三種不同強度電流，分別加以試驗；所得結果，如 Fig. 8. 所示。

在圖形內各對應曲線，電流強度彼此相等；至於相當線圈函數：線絲改變較少；在鐵絲則起始較線絲甚大，隨電流加強，迅速減少，最終則較線絲為微。是以知扭力作用，當電流微小時，在線絲較鐵絲為顯；至電流達一相當值後，則線絲反不及鐵絲顯明。關於各組曲線之形狀變化：在鐵絲最初具有甚強之滯後現象，hystéresis 隨電流加強，滯後現象逐漸消失，終至變為一種對稱可逆曲線。至於線絲則與鐵絲相反，無顯然之滯後現象存在，唯曲線形狀，仍因電流強度加大，逐漸變為尖峭。

2. 與地磁場平行場合：斜置金屬絲與地磁場平行，加以 30g. 扭力，然後依次通金屬絲以強度不同之交流電流，並按同一方法規定相當線圈函數，作各種電流強度之扭力曲線，如是將鐵絲與線絲用四種不同強度電流；分別加以試驗；所得結果，如 Fig. 9. 所示。

圖形內諸對應曲線，電流強度均係彼此相等；至於相當線圈函數：線絲仍改變甚少；在鐵絲則起始函數甚多，隨電流增強，迅速減少，與垂直情形亦相類似。關於各組曲線之形狀變化：在線絲，除無顯然之滯後現象外；各曲線形狀，彼此間大致相仿。至於鐵絲，則曲線形狀最初不甚規則，且有相當之滯後現象；不規則形狀，隨電流強度增加，逐漸更改，變為一種對稱下降曲線；下降曲線更因電流加強，逐漸減少其下降程度，在左右兩方各形成一極小值；最終則滯後現象完全消失，仍與垂直情形相仿，變為一種對稱可逆曲線。

根據多次試驗之結果；尚知曲線形狀變化，在線絲永無甚更改；鐵絲則隨復熱情形不同，下降程度能相差極巨；在復熱時間較久，冷卻較慢時，下降現象恒相當顯著。

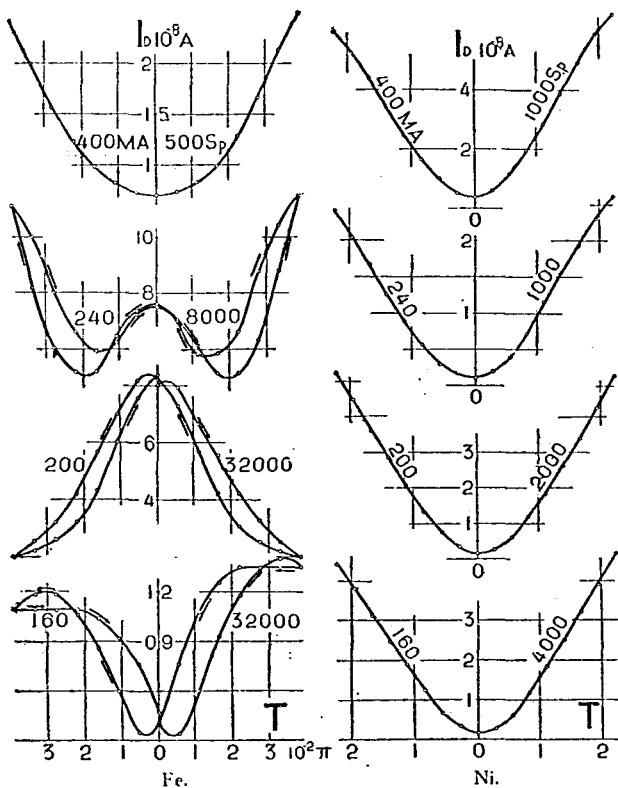


Fig. 9.

b. 電流強度對於張力曲線之影響

在交流電流強度較大時，鎢絲之張力曲線但具有一極大值；但在鎢絲，則只電流強度較小時，此種極大值始能存在，故欲根據極大值之變化情形

比較電流強度對於張力曲線之影響；在採取電流強度方面，鐵絲與鎳絲自不能仍如以上之一致，因是對此兩種金屬絲各選定若干不同強度之交流電流，按次作相關之張力曲線，在相當線圈匝數：鐵絲為 500；鎳絲為 16000；金屬絲與地磁場平行場合，所得結果，如 Fig. 10. 所示。

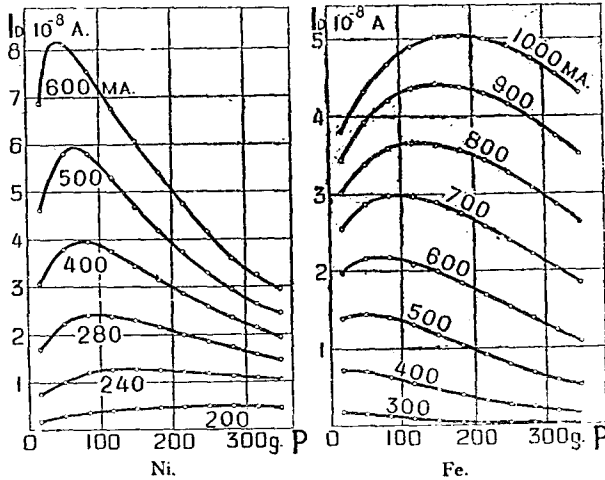


Fig. 10.

在兩組張力曲線內，各曲線均具有一極大值。極大值形狀，鎳絲較鐵絲為尖峭；至於極大值位置，隨電流強度增加，亦緩緩更動。更動方向鐵絲與鎳絲相反：是與磁伸縮現象 magnetostriction 在磁場微小之變化情形，極為類似。

III. 試驗結果之解釋.

磁場對於複矩之影響. R. Forrer 假定鐵線等金屬體內, 各極小磁性為二個或數個磁矩所組成; 因是稱之為複矩: multiplet 在複矩受有外部磁場影響時, 隨影響情形, 可發生下列諸種變動:

a. 複矩在晶網內, 受原子間之結構磁場 champ structural 影響, 具有若干正常位置, position normale 不克自由旋轉; 只在外部加有磁場時, 複矩始能隨磁力作用轉動, 令磁化現象產生.

b. 倘複矩受有阻礙, 不克自行轉動時, 反向磁場能令複矩內一組成磁矩: moment constituant 顛倒, 使結果磁矩: moment résultant 除方向更改外, 強度亦有時變更.

c. 複矩受磁力作用轉動時, 有時達於不穩定狀態, 自動翻轉, 另取一種正常位置; 使磁化方向驟行更改.

d. 複矩依所受磁力之大小, 逐漸變形; 使複矩內諸組成磁矩, 漸漸與磁場方向相接近.

今試用上述之數種變動, 以解釋試驗所得之各種結果:

電流圖線與不對稱複矩. 當鐵線等金屬絲與地磁場平行時, 絲內各複矩, 依磁力方向, 自行轉動; 使諸磁矩在金屬絲中軸上射影, 恰與金屬絲所應具之磁化強度相同. 爾時如通金屬絲以交流電流, 則各複矩因受有環形交流磁場影響, 即不隨往復擺動; 磁化強度既與諸磁矩之射影相等, 亦當隨之忽大忽小時時變化, 在感應圈導線內, 因之遂有感應電流產生. 隨交流電流加強: 複矩擺動漸漸加大; 感應電流逐漸增強. 至電流強度達一相當值後, 則複矩除擺動激烈外; 並能發生變形, 使諸組成磁矩互相接近, 形成一種不穩定狀態; 致感應電流強度時大時小, 亦有不穩定情況產生.

銀絲之電流曲線，與上述理論完全相符；至於鐵絲，則曲線形狀，除上升較速外，尚有一極大值存在。對於此種事實，磁性組成理論亦當具有一合理說明：在三組成磁矩場合，複矩有對稱與不對稱兩種，引言內已略敘述。在對稱複矩，組成磁矩受反向磁場作用顛倒時；與二組成磁矩情形相仿，結果磁矩除方向更改外，強度永屬不變。但在不對稱複矩，則隨反向磁力作用，平行二組成磁矩有時能自行抵銷，致結果磁矩之強度及方向均發生顯然變更，如 Fig. 11. 所示。

對稱複矩所形成之剩餘磁化係 $\frac{1}{2}$ ⁽⁸⁾，鐵絲之剩餘磁化較此值為大；是以知不對稱複矩。

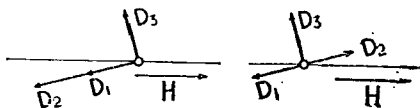


Fig. 11.

在鐵絲內多在結果磁矩較大狀態。此種複矩與對稱複矩相混，隨環形交流磁場往復擺動，擺動情況：有時係受磁場作用自動翻轉；有時係一組成磁矩顛倒變化。故感應電流雖因結果磁矩稍大，上升較銀絲為速；但在適當場合，各對組成磁矩當仍不斷自行抵銷，使磁化強度逐漸變弱。此種現象最初為擺動增強之效果所掩蔽，不克顯露。至擺動接近其極限，不能再行加強時，始行顯示其效果，令感應電流漸漸降低。

此外尚知在鐵質不純時，不對稱複矩易於產生⁽⁹⁾。同時電流曲線形狀，在不純鐵絲，則上升更為迅速，極大值愈形尖峭；⁽¹⁰⁾亦與以上理論恰相符合。

8. L. Néel, Journ. de Phys., 6^e série, t. 10, 1929, p. 261.

9. R. Forrer et J. Schneider, C.R. t. 190, 1930, p. 1391.

10. 中法大學理學院特刊, No. 14.

扭力圍繞與不對稱複矩。據 R. Becker 理論: 磁鐵體 corps ferromagnétique 內晶綫變形時, 恒沿一定方向, 現有磁性。故在鐵線等金屬絲受有扭力後, 磁化作用常隨之產生。此時如通金屬絲以交流電流, 則磁化作用受環形交流磁場影響, 常不斷發生變化; 在感應圈導線內, 遂因之有感應電流產生。感應電流隨扭力加大, 迅速增強; 至扭力與各晶體間之內聚力 cohésion 平衡後, 再繼續加大扭力, 則各晶體彼此間不免相互移動, 致晶綫變形漸趨紊亂, 感應電流因之復逐漸降低。

俯視晶綫變形之現有磁性, 係複矩變動之所致。則以上理論依然存在。同時電流強度變化所顯示之各種現象, 因是亦得一合理說明: 金屬絲內諸複矩, 受環形交流磁場影響, 往復擺動; 擺動情況按交流電流之強度增加, 迭生更改: 最初, 複矩隨磁場作用發生轉動。繼則組成磁矩顛倒變化: 至電流強度達一相當值後, 複矩始能自動翻轉, 使擺動愈形激烈。線絲複矩為二磁矩所組成, 無論擺動情況若何, 結果磁矩強度永無顯然改變。故當加線絲以扭力, 令複矩隨晶體逐漸變換其方位時; 所得曲線, 其形狀恒大致相仿。至於鐵絲, 則因不對稱複矩內, 二組或磁矩能自行抵銷; 而由扭力作用所形成之複矩方位轉變, 又足以促進此種抵銷之關係。曲線之形狀變化, 自較線絲曲線為複雜。在鐵絲與地磁場垂直場合: 複矩排列較為紊亂, 故顯示一種滯後現象, 但在與地磁場平行場合: 則複矩排列接近一致, 抵銷作用因之明顯, 遂形成一種下降曲線。抵銷作用隨自動翻轉複矩之數目增加, 逐漸減小, 至只餘少數複矩, 其組成磁矩顛倒變化, 依偶然機會自行抵銷時; 曲線形狀則復與線絲曲線相近似。

此外不對稱複矩多寡, 隨復熱溫度可任意改變; (11) 同時下降程度, 亦因復熱情形相差極巨, 是與上述理論恰相符合。

11. R. Forrer et J. Schneider, loc. cit.,

張力圈轉與磁伸縮現象：電子在軌道運轉時，能形成一種小磁矩。倘視複矩內磁矩與此種極小磁矩相當：則在磁化飽和時，諸磁矩均與磁場方向平行，諸軌道面當均與磁場方向垂直；爾時磁鐵性物質所具有之自動收縮現象，亦應視為無數軌道面一致與磁場方向垂直之結果。故加張力於鐵絲或鎳絲，使之伸長；電子軌道可自行轉動，使磁矩漸行與金屬絲之中軸垂直；磁化作用隨之減小，感應電流遂因之逐漸降低。

鎳絲複矩係二磁矩所組成。此二組成磁矩隨張力加大，除漸行與金屬絲之中軸垂直外，尚互相接近；使結果磁矩射影，經過一極大值後，始行減少。張力曲線因之遂有一極大值存在。在鐵絲複矩，結果磁矩之射影變化，雖不甚明顯；但當其自動翻轉時，各複矩之擺動情況，因具有三組成磁矩關係，均應視為由與磁場方向平行及垂直之兩種擺動所合成。與磁場方向垂直之擺動影響較為顯著；其射影亦隨張力作用漸漸加大，至複矩相當變形後，始逐漸減少。致張力曲線仍有一極大值產生。

此外極大值之位置更動，鐵絲與鎳絲方向相反。在扭力曲線內，整流電流隨時間緩緩變化時，鐵絲與鎳絲方向亦異。此兩種現象似均與磁伸縮現象相關聯；當不外各複矩間之相互作用及擺動方式，鐵鎳原質彼此不同之所致。現擬加大磁場強度，觀察複矩在 Villari 點附近之擺動情況，以期對於是種問題得一相當瞭解。

ETUDE COMPARATIVE DE L'EFFET BARKHAUSEN CIRCULAIRE DES FILS DE FER ET DE NICKEL.

INTRODUCTION

Le champ circulaire alternatif d'un fil conducteur parcouru par un courant alternatif est perpendiculaire au fil. De sorte que, dans une bobine entourant le fil, il ne devrait pas y avoir de courant induit. Mais si le fil conducteur est constitué par des substances ferromagnétiques, on constate toujours un courant induit sensible. Pour expliquer ce fait, il faut admettre qu'il existe, en plus du champ circulaire alternatif produit par le courant, un autre champ magnétique qui fait varier le flux traversant la bobine. Ce champ est dû probablement à ce que les petites particules aimantées du fil ferromagnétique sont en mouvement sous l'influence du champ circulaire alternatif.

Le cycle d'hystérésis du fer pur, préparé par électrolyse dans un champ magnétique, a une forme presque rectangulaire. (1) Il en est de même du nickel spécial ayant subi certaines déformations mécaniques: le fil de nickel en question a été d'abord recuit, puis étiré jusqu' à la limite de rupture. On l'enroule ensuite avec une faible tension autour d'un petit tambour et on l'introduit finalement dans un tube capillaire pour le maintenir rectiligne. (2) R. Forrer, en s'appuyant sur ces faits, a été amené à penser que les moments atomiques doivent être constitués par deux ou plusieurs moments composants perpendiculaires. Pour vérifier cette hypothèse il a comparé les aimantations saturée et rémanente de ces deux métaux et a été conduit à admettre que le moment atomique du nickel est la résultante de deux composants à angle droit, tandis que celui du fer de trois composants formant un trièdre trirectangle. La figure 1 (voir la figure 1 de la page 2) représente la distribution de ces moments constituants dans les réseaux cristallins du nickel et du fer.

1. Ch. maurain, L'éclairage électrique, t. 26, février 1901.
2. R. Forrer, Journ. de Phys., 6e série, t. 7, 1926, p. 109.

Dans le cas du fer, deux des moments composants sont quelquefois colinéaires: suivant que leurs actions s'ajoutent ou se compensent, on a les deux états dissymétriques ⁽³⁾ représentés par la figure 2 (voir la figure 2 de la page 2). En poursuivant des recherches dans cette voie, l'existence de ces états dissymétriques a été effectivement vérifiée. Le recuit à la température de 600°C et la présence d'impureté facilitent la production de l'état dissymétrique. ⁽⁴⁾

Si donc la structure magnétique du nickel et du fer présente une telle différence, la variation du courant induit, engendré par le mouvement des particules aimantées sous l'action du champ circulaire alternatif, doit être différente aussi. C'est en vue de démontrer cette différence que nous avons entrepris cette étude comparative de l'effet Barkhausen circulaire des fils de fer et de nickel.

I MÉTHODE SUIVIE DANS LES EXPÉRIENCES.

Disposition du fil soumis à l'expérience : Une extrémité du fil, par laquelle on peut exercer une torsion, est fixée à une tige de laiton de la même manière qu'une mèche dans une perceuse mécanique. La tige de laiton est solidaire d'un disque gradué et d'une grande roue dentée qui engreène avec une autre petite roue dentée. Le jeu de l'engrenage est réduit au minimum de façon qu'un dérangement de $\frac{1}{2}$ degré imprimé à la petite roue dentée n'entraîne qu'une erreur inférieure à $\frac{1}{20}$ degré sur la rotation de cette extrémité du fil. L'autre extrémité, par laquelle on exerce la traction, est soudée à un support léger d'aluminium pouvant tourner sans frottement appréciable autour d'une charnière horizontale. Lorsque des forces sont appliquées à cette extrémité du fil, l'inclinaison du support change avec leur intensité et la tension du fil peut être calculée, en tenant compte du poids du support et en négligeant les frottements, avec une erreur inappréciable.

3. R. Forrer, Journ. de Phys., 6^e série, t. 10, 1929, p. 247.

4. R. Forrer et J. martak, Journ. de Phys., 7^e série, t. 3, 1932, p. 408.

La tige de laiton et le support d'aluminium sont fixés à leur tour sur une planche rectangulaire reposant sur la table par trois pieds. En modifiant leur hauteur et l'orientation de la planche, il est possible de faire prendre au fil soumis à l'expérience une position quelconque dans le champ terrestre.

Choix du détecteur: Nous avons pris une dizaine de détecteurs d'oxyde cuivreux et déterminé les caractéristiques correspondantes, en portant en abscisse la différence de potentielle et la résistance ohmique en ordonnée. Parmi eux il nous a été possible de trouver deux détecteurs dont les caractéristiques, représentées sur la figure 3 (voir la figure 3 de la page 3), sont presque identiques. Lorsque la différence de potentielle est faible, les caractéristiques sont des droites. De plus, en ajoutant en série une résistance de 90Ω au détecteur dont la caractéristique est située un peu au dessous, les deux droites coïncident l'une avec l'autre. C'est pourquoi nous avons choisi ces deux détecteurs pour les utiliser dans nos expériences. Dans le but de conserver leurs caractéristiques invariables, nous avons placé les détecteurs avec de la matière desséchante dans un cylindre en laiton hermétiquement clos par soudure pour empêcher toute humidité de pénétrer à l'intérieur. L'ensemble est plongé dans l'eau d'un thermostat constitué par un grand vase de Dewar. La température du bain y est uniformisée par agitation par bulles d'air et contrôlée par un petit régulateur de toluène. Une résistance électrique et une circulation d'eau glacée permettent de réchauffer ou de refroidir. On maintient de cette façon la température du bain constamment égale à $17.^\circ 3$ avec une erreur inférieure à $\frac{1}{15}^\circ \text{C}$.

Constitution de la bobine: Comme la f. é. m. induite, que produit l'effet Barkhausen circulaire, peut différer énormément suivant les conditions d'expérience, (⁵) il en résulte que la portion utilisée de la caractéristique du détecteur doit différer également. Dans ces conditions il sera impossible de déduire l'influence d'un facteur donné de la variation d'allure de la courbe exprimant les résultats d'expériences. Si l'on change

5. Bulletin de la Faculté des sciences U. F. C. No. 14.

de bobine à chaque expérience, non seulement les résultats ne sont plus théoriquement comparables, mais encore la substitution d'une bobine à une autre est une source d'erreurs imprévisibles. C'est pourquoi nous avons décidé de constituer une seule et même bobine par seize enroulements coaxiaux d'un même nombre de spires distribuées sur quatre couches. L'enroulement le plus éloigné de l'axe et l'enroulement le plus proche de l'axe sont reliés ensemble pour former un même élément. Les deux enroulements contigus aux premiers sont reliés ensemble à leur tour pour former un second élément et ainsi de suite, de sorte que la bobine se trouve finalement constituée par huit bobines élémentaires de même résistance ohmique. Les caractéristiques de la bobine sont les suivantes:

Longueur	55. mm.
Diamètre extérieur	20. mm.
Diamètre intérieur	4. mm.
Nombre total de spires	32000.
Résistance totale	2350. Ω .
Nombre de couches	64.

Les huit bobines élémentaires sont reliées en série, en parallèle, ou d'une façon mixte. La f.é.m. diffère dans chaque cas. Pour simplifier le langage nous supposons que les différentes f.é.m. sont produites effectivement par des bobines différentes, que nous appellerons "bobines équivalentes". Pendant l'expérience on modifie le nombre de spires de la bobine équivalente de façon que la différence de potentielle aux bornes du détecteur soit inférieure à 10MV. et que la portion de caractéristique utilisée soit toujours comprise entre les limites AA et BB tracées en pointillé sur la figure (voir la figure 3).

Disposition des appareils: La f.é.m. induite dans la bobine B agit entre les points de jonction U et W de deux dérivation en parallèle, sur lesquelles les deux détecteurs D D' ont été montés en sens opposés (voir la figure 4 de la page 4). La dérivation UDGW comporte un galvanomètre G sensible au 10^{-10} A. et ayant une résistance intérieure de 462 Ω . L'autre dérivation U. D' R'g W comprend une résistance R'g égale à 90 Ω plus la

résistance intérieure du galvanomètre. De cette façon on parvient à supprimer l'influence de la détection et à conserver la forme du courant induit. R est une résistance variable destinée à compenser les variations de résistance de la bobine et à conserver à la résistance totale du circuit une valeur constante.

Dans certains cas d'expérience, la f.é.m. induite devient trop grande. Bien que les huit bobines élémentaires soient toutes reliées en parallèle, il est encore impossible d'en observer les variations avec le galvanomètre G. Dans ce cas on intercale entre WV et UV des résistances convenable, afin que le nombre de spires de la bobine équivalente diminue davantage encore sans que la résistance totale change.

Réglage de la source d'électricité: Le courant alternatif qui traverse la fil ferromagnétique est fourni par le réseau d'éclairage. La tension a été abaissée par un transformateur de capacité assez grande. Le secondaire est fermé sur deux circuits en parallèle. L'un des circuit, dont la self induction est faible, est parcouru par un courant intense et sert a entretenir la forme du courant. L'autre comprend une bobine avec noyau de fer mobile montée en série avec le fil soumis à l'expérience. L'intensité du courant qui traverse le fil est mesurée suivant son ordre de grandeur par des ampèremètres de diverses sensibilités. A l'aide d'un miroir l'image de l'aiguille de l'ampèremètre est renvoyée dans une lunette, à travers laquelle on fait en même temps la lecture sur l'échelle du galvanomètre. En déplaçant le noyau de fer dans la bobine on règle l'intensité du courant de façon que les erreurs relatives soient toujours inférieures à $\frac{1}{1000}$

Recuit du fil: Le recuit dans l'air par courant alternatif est l'opération la plus simple, mais il présente divers inconvénients:

- a. La température est mal déterminée.
- b. La température le long du fil est difficilement uniforme.
- c. Le degré d'oxydation n'est pas précis.

Pour éviter ces inconvénients nous avons effectué le recuit en chauffant directement le fil dans un petit four électrique. Ce four est constitué par

un tube en matière réfractaire de 1.2cm de diamètre intérieur et de 44cm de longueur. La température du four pendant l'opération de recuit est déterminée à l'aide d'un thermocouple étalonné en utilisant les points de fusion de sels purs.

Le fil à recuire, d'abord redressé et nettoyé, est tendu par un poids de plomb de 20 grammes suivant l'axe du four tubulaire. Après avoir bouché hermétiquement les deux extrémités du tube, on le remplit d'air et on fait le vide successivement plusieurs fois de suite. L'air de remplissage a passé sur du cuivre réducteur et traversé des solutions de pyrogallol, K^2MnO^4 , KOH, et de la matière desséchante. Si l'étanchéité est parfaite, on peut être certain qu'il ne peut plus se produire d'oxydation.

Au début du recuit, on augmente lentement la température et on diminue en même temps la pression à l'intérieur du tube de façon à faciliter le dégagement du gaz absorbé par le fil. (*) Lorsque la température a atteint $900^{\circ}C$, la pression a été abaissée jusqu'à 4-5 mm de mercure. La température est maintenue constante pendant cinq heures consécutives. On abaisse alors la température en diminuant l'intensité du courant. Lorsque le refroidissement est complet, on remplit le tube d'air et on sort le fil du four. Afin d'éviter l'oxydation à l'air libre, on recouvre sa surface d'une couche mince de collodion.

En opérant de la manière indiquée ci-dessus, nous avons recuit plusieurs fils de fer et de nickel. Après l'opération la dureté a beaucoup diminué, à part cela leur apparence reste la même qu'avant le recuit. Les données numériques relatives à ces deux espèces de fils sont résumées dans le tableau suivant:

Composition	longueur	diamètre	provenance
fer pur (pour analyse)	25 2mm.	0,57mm.	Merck
nickel pur	25 2mm.	No. 22 SWG.	Central company

6. La dureté du fil de fer pur est à peu près identique à celle de l'acier. Il est très probable qu'il contient une grande quantité d'hydrogène.

II COMPARAISON DES RÉSULTATS.

A. Comparaison sur trois sortes de courbes : Les facteurs qui peuvent avoir une influence sur l'effet Barkhausen circulaire sont le champ, le courant, la torsion et la traction. (7) L'hypothèse de R. Forrer est basée sur la forme du cycle d'hystérésis, c'est à dire sur l'influence du premier facteur. Il nous suffira donc de considérer les effets des trois autres facteurs pour avoir une confirmation de la théorie sur la structure magnétique du fer et du nickel.

a. Courbes d'intensité.

Le fil soumis à l'expérience est tendu suivant la direction du champ terrestre à l'intérieur d'un tube de verre de 7mm de diamètre intérieur. Une circulation d'eau pure maintient la température du fil sensiblement égale à celle de l'eau, bien que le courant qui traverse le fil soit très intense. Au milieu du tube est enroulée une bobine de 5 cm en longueur. Elle est constituée par trois bobines élémentaires de 500 spires, qui sont reliées en série ou en parallèle pour modifier la grandeur de la f.é.m. induite. Quelque soit la connexion réalisée au moment de l'expérience, il est nécessaire d'ajouter une résistance convenable, pour que la résistance totale soit égale à 2350 Ω et que les conditions d'expérience restent bien déterminées. Dans le cas où la connexion est en parallèle pour le fer, en série pour le nickel et où la tension du fil est de 10 grammes, les résultats obtenus sont représentés sur la figure 5 (voir la figure 5 de la page 7).

Le courant détecté du fil de fer augmente au début assez rapidement. Lorsque l'intensité du courant alternatif devient assez grande, l'augmentation se ralentit progressivement. Le courant détecté passe par un maximum aux environs de 5 ampères et diminue ensuite lentement. En ce qui concerne le fil de nickel, le courant détecté augmente moins vite que dans le cas du fer et une manière à peu près uniforme. On n'observe pas de maximum. Mais lorsque le courant alternatif devient assez intense, le

7. loc. cit.

courant détecté oscille dans un petit intervalle d'amplitude, augmente et diminue alternativement d'une façon assez irrégulière. Ce phénomène est représenté sur la figure par de petits cercles avec deux traits diamétralement opposés. L'instabilité des intensités devient de moins en moins sensible à mesure que la tension du fil augmente. Lorsque la tension atteint l'ordre de 100 grammes, le phénomène d'instabilité est devenue presque inobservable.

b. Courbes de torsion.

Le fil d'expérience est placé perpendiculairement au champ terrestre et soumis à une tension de 100 grammes. On relie en série les huit bobines élémentaires et on lance à travers le fil un courant faible d'intensité constante, de façon à éviter des modifications de la courbe de torsion par suite de variation d'intensité. La figure 6 (voir la figure 6 de la page 8) montre les résultats obtenus en faisant passer dans le fil de fer un courant de 60 MA, et dans le fil de nickel un courant de 120 MA.

Après chaque nouvel accroissement de torsion du fil, le courant atteint rapidement une intensité d'équilibre et conserve ensuite cette valeur constante. A mesure que la torsion augmente, l'intensité d'équilibre croît rapidement, comme l'indique la partie en trait continu des deux courbes. Lorsque la torsion du fil a atteint une certaine valeur, après un nouvel accroissement de torsion l'intensité du courant paraît d'abord parvenir à un équilibre; mais bientôt elle varie de nouveau lentement avec le temps. Le sens de cette variation pour le fil de fer est contraire à celui du nickel. Cette partie des courbes de torsion du fer et du nickel est tracée en traits suivis d'un point et traits suivis de deux points. D'autre part la variation de courbure devient très irrégulière. Pour rendre cette irrégularité plus visible, nous avons reproduit sur la même figure les courbes à une plus grande échelle. Le sens de variation du courant détecté avec le temps y est indiqué par un petit cercle avec un trait sur le côté. L'examen des courbes permet de faire les remarques suivantes:

1. Lorsque la torsion augmente progressivement, l'instabilité du courant détecté apparaît moins vite pour le fil de fer que pour le fil de nickel et la diminution d'intensité commence également plus tard pour le fer.

2. Les sens de variation du courant détecté avec le temps sont opposés pour les deux métaux, L'intensité augmente avec le temps dans le cas du fer et diminue dans le cas du nickel.

3. A partir du moment où apparaît l'instabilité du courant détecté, la pente des courbes devient discontinue. Cette discontinuité est due très probablement à des modifications dans le mode d'agrégation des cristaux à l'intérieur du fil métallique: par suite de la torsion les cristaux doivent glisser les uns sur les autres suivant certains plans.

C. Courbes de traction.

Le fil soumis à l'expérience est placé suivant la direction du champ terrestre et est parcouru par un courant alternatif de 600 MA. Les huit bobines élémentaires sont reliées en série. Les courbes de traction ainsi obtenues pour les deux métaux sont représentées sur la figure 7 (voir la figure 7 de la page 9).

Pour le fil de fer l'intensité du courant détecté diminue progressivement et tend vers zéro à mesure que la tension augmente. Avec le fil de nickel le courant commence par augmenter très rapidement, passe par un maximum et diminue ensuite assez rapidement jusqu' à zéro. L'existence du maximum est en relation étroite avec l'intensité du courant, comme nous le verrons plus en détail dans la suite. D'autre part il est à remarquer que l'influence de la torsion pour le fil de nickel est nettement plus visible que pour le fer.

B. Influence de l'intensité du courant alternatif: Lorsque l'intensité du courant alternatif augmente, l'intensité du champ circulaire alternatif augmente en même temps. Il en résulte que le mouvement des particules aimantées devient de plus en plus intense. Lorsque le mouvement croît en

intensité, le courant induit doit se modifier avec la structure de l'aimant atomique. C'est à fin de mettre en évidence cette modification, que nous entreprenons à présent l'étude de l'influence de l'intensité du courant alternatif. De cette façon nous pourrions confronter la théorie de l'aimant atomique avec les faits.

a. Influence de l'intensité du courant sur les courbes de torsion.

1. Le fil est perpendiculaire au champ terrestre : Le fil perpendiculaire au champ terrestre est soumis à une tension de 10 grammes. On fait passer dans le fil successivement des courants de diverses intensités et on construit les courbes de torsion correspondantes en modifiant la torsion suivant un cycle fermé. Pendant chaque expérience, suivant l'intensité du courant parcourant le fil, on ajuste le nombre de spires de la bobine équivalente, de façon que, même lorsque l'intensité du courant alternatif soit poussée au maximum, la f. é. m. induite reste inférieure à 10 MV. La figure 8 (voir la figure 8 de la page 10) représente les courbes de torsion des fils de fer et de nickel avec trois intensités différentes.

Sur cette figure deux courbes juxtaposées correspondent à des intensités de courant égales dans les deux sortes de fils métalliques. Quant au nombre de spires de la bobine équivalente, il change peu pour le nickel. Pour le fer le nombre de spires est assez grand au début. Il diminue assez vite, lorsque l'intensité du courant augmente, et devient finalement inférieur à celui du fil de nickel. On en tire la conclusion suivante: lorsque l'intensité du courant est faible, le fil de nickel est plus sensible à l'influence de la torsion que le fil de fer; lorsque le courant est intense, c'est le contraire qui a lieu. Comparons d'autre part la variation de forme des courbes des deux métaux. Le fil de fer possède d'abord une hystérésis assez marquée. A mesure que l'intensité du courant augmente, l'hystérésis disparaît peu à peu et les courbes deviennent finalement réversibles avec une allure symétrique. Avec le fil de nickel on n'observe pas d'hystérésis. Seulement à mesure que le courant augmente en intensité, les courbes deviennent moins arrondies.

2. Le fil est parallèle à la direction du champ terrestre : Le fil soumis à l'expérience orienté suivant la direction du champ terrestre supporte une tension de 30 grammes. On fait passer dans le fil successivement des courants de différentes intensités et on construit les courbes de torsion correspondantes. Le nombre de spires des bobines équivalentes est déterminé de la même manière que précédemment. Les résultats obtenus avec quatre intensités différentes pour chaque métal sont représentés sur la figure 9 (voir la figure 9 de la page 12).

Sur cette figure deux courbes placées l'une en face de l'autre correspondent à une même intensité du courant parcourant les fils des deux métaux. Le nombre de spires de la bobine équivalente change peu pour le nickel. Pour le fer, au contraire, le nombre de spires, assez grand au début, diminue assez rapidement quand l'intensité du courant augmente, tout à fait comme dans le cas où le fil est perpendiculaire au champ terrestre. Quant à l'allure des courbes, elle reste la même pour le nickel lorsque l'intensité du courant augmente. On n'observe pas d'hystérésis notable. Dans le cas du fer, lorsque l'intensité du courant est faible, la courbe est moins régulière et montre une hystérésis marquée. A mesure que l'intensité du courant augmente, la courbe change graduellement d'allure pour devenir descendante et symétrique. La pente de descente diminue, lorsque l'intensité de courant continue à croître, et un minimum apparaît de chaque côté de l'axe de symétrie. Finalement l'hystérésis disparaît et la courbe devient réversible et symétrique comme dans le cas où le fil est perpendiculaire au champ terrestre.

En examinant les résultats obtenus dans un grand nombre d'expériences, on remarque que la forme de la courbe pour le nickel se modifie peu. Tandis que pour le fer l'allure descendante de la courbe peut différer énormément suivant les conditions du recuit. Si la durée du recuit est longue et le refroidissement assez lent, l'allure descendante est toujours assez nette.

b. Influence de l'intensité du courant sur les courbes de traction.

La courbe de traction, pour le fil de fer, possède toujours un maximum, lorsque l'intensité du courant alternatif est suffisamment intense. Pour le fil de nickel au contraire, les maxima n'existent que lorsque l'intensité du courant n'est pas trop grande. Il en résulte que, si l'on veut déduire de la variation des maxima l'influence de l'intensité du courant sur les courbes de traction, on doit adopter pour le fer et le nickel des intensités du courant assez différentes. Nous avons été conduits ainsi à construire des courbes de traction correspondant à des intensités du courant alternatif différentes pour les deux espèces de fils métalliques. Le nombre de spires de la bobine équivalente est de 500 pour le fil de fer, et 16000 pour le fil de nickel. Dans le cas le fil est parallèle au champ terrestre, les résultats obtenus sont représentés sur la figure 10 (voir la figure 10 de la page 13).

En comparant les deux séries de courbes, on remarque facilement certaines particularités: les maxima sont plus marqués sur les courbes du fil de nickel que sur celles de fer. D'autre part ces maxima se déplacent lentement lorsque l'intensité du courant augmente et ce déplacement se fait en sens opposés pour les deux métaux. Ceci est d'accord avec les variations de magnétostriktion dans un champ magnétique faible.

III INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS D'EXPÉRIENCES.

Influence du champ magnétique sur le multiplet: D'après l'hypothèse de R. Forrer le moment atomique des corps ferromagnétiques serait la résultante de deux ou plusieurs moments constituants et il appelle l'ensemble de ces moments constituants un multiplet. Sous l'influence d'un champ magnétique extérieur le multiplet peut subir les modifications suivantes:

a. En absence du champ extérieur, le multiplet occupe des positions normales dans le réseau: un champ structural réticulaire s'oppose à sa libre rotation. Un champ extérieur seul peut lui imprimer une rotation et produire ainsi une aimantation initiale.

b. Si une cause quelconque empêche la rotation du multiplet, un champ négatif peut inverser un des constituants du multiplet. Le moment résultant change alors non seulement de direction, mais quelquefois d'intensité en même temps.

c. Si par suite d'une rotation le multiplet entier est amené à occuper une position instable. Un retournement spontané se produit jusqu' à ce que le multiplet atteigne une nouvelle position normale.

d. Le multiplet est susceptible de déformation par un champ magnétique d'une intensité suffisant. Les moments constituants se rapprochent alors de la direction du champ.

En tenant compte de ces modifications du multiplet sous l'influence d'un champ, essayons maintenant d'interpréter les résultats d'expériences.

Courbes d'intensité et multiplets dissymétriques: Lorsque le fil est parallèle au champ terrestre, les multiplets se retournent vers la direction du champ, de façon que la projection des moments sur l'axe du fil soit exactement égale à l'aimantation que le fil doit avoir. A ce moment, si l'on lance un courant alternatif dans le fil les multiplets, excités par le champ circulaire alternatif, se mettent à osciller. L'intensité d'aimantation, qui est égale à la projection des moments, augmente et diminue tour à tour. De là résulte le courant induit dans la bobine. A mesure que l'intensité du courant alternatif augmente, l'amplitude d'oscillation des multiplets croit et le courant induit devient de plus en plus intense. Lorsque l'intensité du courant a atteint une certaine valeur, les multiplets non seulement effectuent des oscillations plus violentes, mais subissent en même temps des déformations, qui résultent de ce que les moments constituants se rapprochent de la direction du champ. Les multiplets atteignent ainsi une sorte d'état instable. Le courant induit reproduit cette instabilité et varie sensiblement avec le temps.

La courbe d'intensité du nickel est exactement conforme à l'interprétation que nous venons de donner. Il n'en est pas de même pour le fer.

Non seulement la pente de la courbe est plus rapide, mais encore la courbe possède un maximum. A ces faits la théorie des aimants atomiques doit également fournir une explication raisonnable: Dans le cas du fer le moment a trois constituants et il existe deux sortes de multiplets, symétrique et dissymétrique, dont nous avons déjà dit un mot dans l'introduction. Dans multiplet symétrique, lorsqu'un champ négatif produit l'inversion d'un des moments constituants, la résultante change seulement de direction, mais non de grandeur. Il n'en est plus de même pour le multiplet dissymétrique: deux des moments constituants peuvent quelquefois se compenser. Il en résulte une modification simultanée de la grandeur et de la direction du moment résultant, comme l'indique la figure 11 (voir la figure 11 de la page 15).

L'aimantation rémanente que produisent les multiplets symétriques est égale à $\frac{1}{2}$.⁽⁸⁾ Or elle dépasse cette valeur pour le fil de fer. Nous en concluons que dans le fil de fer la majorité des multiplets dissymétriques sont dans un état tel que le moment résultant est plus grand. Ces multiplets dissymétriques s'y trouvent mêlés à des multiplets symétriques. Lorsqu'ils oscillent sous l'action du champ circulaire alternatif, tantôt des multiplets se retournent en entier, tantôt l'un des constituants du multiplet s'inverse. C'est pourquoi, le moment résultant étant plus grand, l'intensité du courant induit croît plus vite que dans le cas du nickel. Cependant dans certaines circonstances favorables, les moments constituants peuvent se compenser deux à deux et affaiblir ainsi peu à peu l'aimantation du fil. Au commencement l'effet d'augmentation de l'amplitude d'oscillation des multiplets est prédominant, et le phénomène précédent est imperceptible. Lorsque le mouvement des multiplets a atteint le maximum d'amplitude, l'effet de la compensation se manifeste et l'intensité du courant diminue progressivement.

D'autre part, la production de multiplets dissymétriques est favorisée par la présence d'impuretés dans le fer.⁽⁹⁾ Pour le fer renfermant des impuretés

8. L. Néel, Journ. de Phys., 6e série, t. 10, 1729, p. 261.

9. R. Forrer et J. Schneider, C. R. t. 190, 1930, p. 1391.

non seulement la pente de la courbe est plus rapide, mais le maximum a une forme plus pointue ⁽¹³⁾ Ceci est bien en accord avec l'interprétation que nous venons d'exposer.

Courbes de torsion et multiplets dissymétriques : D'après la théorie de R. Becker, une déformation du réseau cristallin donne naissance dans les substances ferromagnétiques à une aimantation rémanente dans une direction privilégiée. C'est pourquoi lorsqu'on tord le fil de fer ou de nickel, il es produit une aimantation le long du fil. Si à ce moment on fait passer un courant alternatif à travers le fil, sous l'action du champ circulaire alternatif l'aimantation doit varier d'une façon continue. Il en résulte un courant induit dans la bobine entourant le fil. A mesure que la torsion augmente, l'intensité du courant croit rapidement, jusqu'à ce que la force de torsion soit égale exactement à la force de cohésion entre les éléments cristallins. A partir de ce moment un nouvel accroissement de la torsion entraîne nécessairement un glissement des éléments cristallins les uns par rapport aux autres. La déformation du réseau devient ainsi de plus en plus confuse. Il en résulte un abaissement progressif de l'intensité du courant induit.

Si on considère l'aimantation produite par des déformations du réseau comme due à des modifications des multiplets, la théorie que nous venons d'exposer subsiste. De plus cette manière de voir permet d'interpréter d'une façon raisonnable les effets obtenus en modifiant l'intensité du courant alternatif. Sous l'influence de champ circulaire alteratif, les multiplets à l'intérieur du fil se mettent à osciller. A mesure que l'intensité du courant alternatif augmente, les conditions d'oscillation changent. Au commencement l'orientation des multiplets suit la variation du champ, puis des constituants des multiplets s'inversent successivement. Lorsque l'intensité du courant a atteint une certaine valeur, les multiplets se retournent spontanément en entier et les oscillations deviennent ainsi plus violentes. Le 10. Bulletin de la Faculté des sciences U. F. C. No. 14.

multiplet du nickel est constitué par deux moments composants. Quelque soit l'état d'oscillation des multiplets, le moment résultant conserve sensiblement la même grandeur. C'est pourquoi, lorsqu'on tord le fil de nickel de façon que les multiplets changent d'orientation avec les cristaux, les courbes ont toujours presque la même allure. Il n'en est pas de même pour le fer: d'abord deux des constituants du multiplet dissymétrique peuvent se compenser entre eux. Leur compensation est favorisée par les changements d'orientations du multiplet par suite de la torsion. Il en résulte que la variation d'allure de la courbe doit être plus compliquée pour le fer que pour le nickel. Dans le cas où le fil est perpendiculaire au champ terrestre, l'arrangement des multiplets est plus ou moins confus. Il ne se manifeste seulement qu'une sorte d'hystérésis. Quand le fil est disposé suivant la direction du champ terrestre, l'arrangement des multiplets se rapproche de l'uniformité. L'effet de compensation devient plus marqué et donne lieu ainsi à une sorte de courbe descendante. A mesure que le nombre de multiplets, qui se retournent spontanément, s'accroît, l'effet de compensation diminue progressivement. Lorsqu'il n'existe plus que peu de multiplets, où l'un des constituants peut s'inverser et produire la compensation suivant la loi du hasard, l'allure de la courbe redevient semblable à celle du nickel.

La quantité des multiplets dissymétriques dépend de la température du recuit et peut-être modifiée à volonté. ⁽¹¹⁾ C'est pourquoi nous avons observé que la pente descendante de la courbe diffère énormément suivant les conditions du recuit. Ceci est en parfait accord avec l'interprétation que nous avons exposée.

Courbes de traction et la magnétostriktion : Le mouvement électronique engendre un moment magnétique. Si on considère les moments constituants du multiplet comme résultant de mouvement électronique. Lorsque l'aimantation a atteint la saturation, les moments doivent être parallèles au

11. R. Forrer et J. Schneider, loc. cit.

champ et les orbites électroniques perpendiculaires. On observe effectivement un raccourcissement des substances ferromagnétiques placées dans un champ intense. Ceci doit être attribué à une diminution d'encombrement lorsque les orbites électroniques viennent se placer perpendiculairement au champ. C'est pourquoi, lorsqu'on allonge le fil de fer ou de nickel par une traction, l'orientation des orbites se trouve modifiée et les moments magnétiques tendent à devenir perpendiculaires au fil. Il en résulte que l'aimantation diminue et par suite le courant induit décroît également en intensité

Le multiplet du fil de nickel est constitué par deux moments composants. A mesure que la tension du fil augmente, ces deux moments tendent à se rapprocher et à devenir perpendiculaires à l'axe du fil. Il en résulte que la projection du moment résultant doit passer par un maximum pour diminuer ensuite progressivement. C'est pourquoi on constate l'existence d'un maximum sur les courbes de traction. Pour le fer la variation de la projection du moment résultant est moins accentuée. Mais les multiplets étant constitués par trois moments composants, au moment où ils se retournent spontanément en entier, l'oscillation du multiplet doit être considérée comme la résultante de deux oscillations, l'une parallèle et l'autre perpendiculaire au champ. L'influence de la composante perpendiculaire au champ est prédominante. A mesure que la tension du fil augmente, la projection de cette composante s'accroît graduellement, jusqu'au moment où le multiplet a été assez déformé. Elle diminue progressivement ensuite. C'est pourquoi on a encore un maximum sur la courbe de traction du fer.

Lorsque l'intensité du courant alternatif augmente, les maxima des courbes de traction des fils de fer et de nickel se déplacent en sens contraires. D'autre part lors de la construction des courbes de torsion nous avons également observé que la variation du courant détecté avec le temps a

lieu aussi en sens opposés pour les deux sortes de fils. Les deux phénomènes précédents semblent être intimement liés à l'effet de magnétostriction. Ils sont dus probablement à la différence de nature et de degrés de liberté entre les multiplets de fer et de nickel. Afin d'éclaircir cette question, nous nous proposons d'observer les effets des mouvements des multiplets au voisinage du point de Villari, en augmentant l'intensité du champ.
